

Constructiestaalsoorten met hoge sterkte

vm 125

VWM

Constructiestaalsoorten met hoge sterkte

vm 125



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/oktober 2008

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 / 353 13 41
telefax: 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl

Constructiestaalsoorten met hoge sterkte

toelichting

Voor u ligt de voorlichtingspublicatie "Constructiestaalsoorten met hoge sterkte". Deze voorlichtingspublicatie is bedoeld voor allen die te maken hebben of te maken krijgen met toepassing en verwerking van de moderne staalsoorten met hoge sterkte. Daarbij moet worden gedacht aan bijvoorbeeld constructeurs, lastechnici, werkvoorbereiders, enzovoorts.

Deze voorlichtingspublicatie is een update van een aantal bestaande voorlichtingspublicaties, te weten:

- VM 84: "Laaggelegeerd staal met hoge sterkte". Deze publicatie is opgesteld in het kader van het NIL-onderzoeksproject "Hoge sterkte staalsoorten" (1990);
- VM 17: "Staal met hoge rekgrens" (1974);
- Praktijkaanbeveling PA.00.09: "Verwerken van constructiestaal met hoge rekgrens". Deze publicatie is opgesteld door ir. H. Vuik - TNO Metaalkunde (maart 2000);
- Informatieblad V20051003: "Lassen van hoge rekgrens staalsoorten". Dit informatieblad is opgesteld door ing. W. Pors - NIL in het kader van een serie NIL-workshops "Verwerking van hoge rekgrens staalsoorten" (2005)

De updating was noodzakelijk daar zich in de afgelopen jaren een groot aantal belangrijke ontwikkelingen heeft voorgedaan op het gebied van deze constructiestaalsoorten, waardoor de toepassing ervan sterk is kunnen groeien.

Deze ontwikkelingen maakten een bundeling en updating van de nieuwe kennis en inzichten in deze staalsoorten noodzakelijk.

Het NIMR (Netherlands Institute of Metals Research) inmiddels opererend onder de naam M2i (Materials innovation institute) 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).

samengesteld door

W. Pors (NIL), A.M. Gresnigt (TU Delft, Civiele Techniek en Geowetenschappen) en J.C. (Hans) van Wortel (TNO Industrie en Techniek).

Als co-lezers hebben C. van Sevenhoven (Ministerie van Defensie), J. Vaders (Ministerie van Defensie), E. Romeijn (Huisman Itrec), G. van Wijngaarden (MCB), G.H.G. Vaessen (GVA) en O.D. Dijkstra (TNO Bouw en Ondergrond) een wezenlijke bijdrage geleverd.

Eindredactie: P. Boers (FME).

technische informatie

Nederlands Instituut voor Lastechniek

- | | |
|-------------------------|--|
| - 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 / 353 13 41 |
| - telefax | 079 - 353 13 65 |
| - e-mail | info@fme.nl |
| - website | www.fme.nl |

Inhoud

1 Inleiding	5	6 Het lassen van staalsoorten met hoge sterkte	34
1.1 Afkortingen en definities	5	6.1 Inleiding	34
1.2 Wat wordt verstaan onder "Staal met hoge sterkte"?	6	6.2 Lastoevoegmaterialen	34
1.3 Waarom toepassing van staalsoorten met hoge sterkte?	7	6.2.1 Beklede elektroden	34
1.4 Toepassingsvoorbeelden van staal met hoge sterkte	7	6.2.2 MAG-lassen	35
1.4.1 Mobiele werktuigen	7	6.2.3 Onder poeder lassen	35
1.4.2 Civiele constructies	8	6.2.4 Aandachtspunten bij het lassen	36
1.4.3 Offshore	9		
1.4.4 Diversen	9	7 Samenvattingverwerking van staalsoorten met hoge sterkte: "do's en don'ts"	37
2 Staal met hoge sterkte	10	7.1 Eisen te stellen aan het basismateriaal	37
2.1 Algemeen	10	7.1.1 Begrenzing rekgrens	37
2.2 Effect van de korrelgrootte op de mechanische eigenschappen	10	7.1.2 R_e/R_m verhouding	37
2.3 Fabricageaspecten van de verschillende staalsoorten met hoge sterkte	10	7.1.3 Kerftaaiheidseigenschappen	37
2.4 Vervaardigingsmethoden van de verschillende staalsoorten met hoge sterkte	11	7.1.4 Inwendige defecten	37
2.4.1 Normaalgeglode staalsoorten met hoge sterkte (N-soorten)	11	7.1.5 Oppervlakte-defecten	37
2.4.2 Thermomechanisch gewalst staal met hoge sterkte (TM-soorten)	13	7.1.6 Gevoeligheid voor lamellar tearing	37
2.4.3 Geharde en ontlaten staalsoorten met hoge sterkte (QT-staalsoorten)	14	7.1.7 Samenstelling	37
3 Metaalkundige eigenschappen van staal met hoge sterkte	18	7.2 Keuze lasproces en lastoevoegmateriaal	37
3.1 Algemeen	18	7.2.1 Lasproces	37
3.2 Mechanische eigenschappen	18	7.2.2 Waterstofgehalte	38
3.3 Vervormingseigenschappen	18	7.2.3 Type lastoevoegmaterialen	38
3.4 Hardheden	19	7.2.4 Sterkte van de las	38
3.5 Eigenschappen bij verhoogde temperaturen	19	7.3 Lasnaadvoorbewerking	38
3.6 Corrosieaspecten van staalsoorten met hoge sterkte	20	7.4 Lasprocedure	38
4 Constructieve aspecten	23	7.4.1 Opslag lastoevoegmateriaal	39
4.1 Inleiding	23	7.4.2 Aanbouwen	39
4.2 Eisen	23	7.4.3 Hechten	39
4.3 Statische sterkte	24	7.4.4 Doorlassen	39
4.3.1 Liggers	24	7.4.5 Vullen	39
4.3.2 Kolommen en drukstaven	25	7.4.6 Warmte-inbreng	39
4.3.3 Trekstaven	26	7.4.7 Voorwarmen	40
4.3.4 Vakwerkliggers	26	7.4.8 Arc strikes en temperbead (ontlaatsnoeren)	41
4.3.5 Geboute verbindingen	27	7.4.9 Tijdelijke lassen	41
4.3.6 Gelaste verbindingen	27	7.4.10 Reparatielassen	41
4.3.7 Buisconstructies	28	7.5 Gloeibehandelingen	41
4.3.8 Hijskranen	28	7.5.1 Normaalglouen	41
4.3.9 Transportleidingen, tanks	28	7.5.2 Spanningsarm glouen	41
4.3.10 Slotopmerkingen statische sterkte	28	7.6 Vervormen	41
4.4 Vermoeiingssterkte	29	7.6.1 Warmvervormen	41
4.4.1 Vermoeiingssterkte in het high cycle en low cycle gebied	29	7.6.2 Koudvervormen	42
4.4.2 Construeren op vermoeiing	30		
4.5 Ontwikkelingen met betrekking tot Eurocode 3	31	8 Normen met betrekking tot de fijnkorrelige staalsoorten met hoge sterkte	43
4.6 Referenties	31		
5 Fabricage aspecten	32	Bijlage A: Lasbaarheid van staal met hoge sterkte	44
5.1 Warmvervormen	32	A.1 Algemeen	44
5.2 Koudvervormen	32	A.2 Chemische samenstelling	44
5.3 Snijden	33	A.3 Afkoelsnelheid	44
		A.4 Structuur van de warmte beïnvloede zone	45
		A.5 Mogelijke defecten	46
		A.5.1 Inleiding	46
		A.5.2 Lamellaire scheurvorming	46
		A.5.3 Warmscheurvorming	46
		A.5.4 Koudscheuren	46
		A.5.4.1 Harde structuren	47
		A.5.4.2 Waterstof	47
		A.5.4.3 Spanningsniveau	47
		A.5.4.4 Vermijden van koudscheuren in de praktijk	47
		A.6 Invloed van een spanningsarmgloeïing op de mechanische eigenschappen van de lasverbinding	48

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Afkortingen en definities

Om de inhoud van de tekst over de staalsoorten met hoge sterkte begrijpelijk te houden, is een lijst van afkortingen en definities wenselijk. Daarnaast worden deze afkortingen en definities in veel andere documenten en artikelen gebruikt.

Afkortingen:

ASTM	American Society for Testing and Materials.
CEV	carbonequivalent = koolstofequivalent; kenmerkende waarde van de hardingseigenschappen van staal in de warmte beïnvloede zone van een lasverbinding; geeft het effect weer van koolstof en overige legeringselementen.
CTOD	Crack Tip Opening Displacement, verplaatsing van de opening van de tip van de scheur bij een driepuntsbuigproef aan een gekerfde proefstaaf, waarin bovendien een vermoeiingsscheur is aangebracht.
HAZ	Heat affected zone (warmte beïnvloede zone).
M	leveringstoestand: thermomechanisch gewalst.
ML	als M, echter nu met gespecificeerde minimumwaarde van de kerfslagarbeid bij temperaturen niet lager dan $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
MPa	spanning in N/mm^2 .
N	leveringstoestand: normaal gegloeid of normaliserend gewalst.
NL	als N, echter nu met gespecificeerde minimumwaarde van de kerfslagarbeid bij temperaturen niet lager dan $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
ppm	parts per million.
$R_{0,2}$	0,2% rekgrens (spanning waarbij een blijvende verlenging van 0,2% optreedt in MPa). Soms wordt ook gebruikt: $R_{e0,2}$.
R_{eH}	bovenste rekgrens (in MPa).
R_m	treksterkte (in MPa).
SMTS	specified minimum tensile strength (gespecificeerde minimum treksterkte in MPa).
SMYS	specified minimum yield strength (gespecificeerde minimum rekgrens in MPa).
TM/TMCP	thermomechanically rolled controlled processing (thermo-mechanisch walsen).
Q	leveringstoestand: gehard en ontlaten.
QL/QL1	als Q, echter nu met gespecificeerde minimumwaarde van de kerfslagarbeid bij temperaturen niet lager dan $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
QT en Q&T	Quenching and Tempering (harden en ontlaten = veredelen).
WBZ	warmte beïnvloede zone.

Definities:

Accelerated cooling	versneld koelen = afschrikken.
Aciculaire ferriet	zeer fijnkorrelige fase met een goede ductiliteit.
Afkoeltijd $\Delta t_{8/5}$	afkoeltijd in seconden van het materiaal van 800 naar $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Arc strike	plaats naast de lasverbinding waarop (ongewild) de elektrische boog is ontstoken.
Austeniet	structuurvorm van ijzer boven $911\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Bainiet	mildere vorm van de harde martensiet.
Cementiet	chemische verbinding van ijzer met koolstof (Fe_3C).
Coarse grained	grofkorrelig.

Ferriet
Fine grained
H/B scheur

Hi-lo

Koudscheur

Lamellar tearing

Low yield electrode

MAG-lassen

Martensiet

Matching

Normaalgloeien

Normaliseren

Overgangstemperatuur

Overmatching

P_{CM} -factor

Perliet

Rekgrens

Restraint

Roller quenching

Rootcrack

Static quenching

Shotpeening

Tensile strength
TIG-lassen

Toecrack

Transition temperature

Temperbead

UIT

Underbaedcrack

Undermatching

structuur van ijzer onder $911\text{ }^{\circ}\text{C}$.
fijnkorrelig.

scheur in lasmetaal, doordat de hoogte van de lasrups groter is dan de breedte van de lasrups. verschil in hoogte tussen de oppervlakken van de te verbinden delen. scheurvorming in de warmte beïnvloede zone ten gevolge van de overschrijding van de drempelwaarde van het gelijktijdig optreden van spanningen, harde structuren, waterstofgehalte; dit alles bij een temperatuur onder $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. lamellaire scheurvorming evenwijdig aan het plaatoppervlak (langs uitgewalde sulfiden en silicaten) ten gevolge van belasting van het materiaal in dikterichting. elektroden met een zeer lage rekgrens.

Metal Active Gas (gasbooglassen onder een actieve gasbescherming/ CO_2 -lassen).

harde brosse structuur ontstaan door een snelle afkoeling van staal vanuit het austenietgebied. met het basismateriaal overeenkomende sterkte.

warmtebehandeling, waarbij het materiaal weer de oorspronkelijke structuur en eigenschappen krijgt. zie normaalgloeien.

temperatuur waarbij een overgang plaats vindt van een breukvlak bij een kerfslagstaaf van 50% bros en 50% taai.

hogere sterkte dan die van het basismateriaal.

koolstofequivalent volgens AWS D1.1.

structuur bestaande uit ferriet en cementiet.

spanning waarbij de elastische rek overgaat in een plastische rek. vervormingsverhinderend.

sproei-afschrikinstallatie voor harden van plaat, ingebouwd in de walsinstallatie.

scheur uitgaande van de aansluiting van de las met het plaatmateriaal. conventionele afschrikmethode voor harden.

oppervlakteversterking door (kogel)stralen.

treksterkte.

Tungsten Inert gas (gasbooglasproces waarbij in een inerte gas-atmosfeer een boog wordt onderhouden tussen een niet-afsmeltende wolframelektrode en het werkstuk; ook bekend als argon-arc lassen).

zie rootcrack.

overgangstemperatuur.

tempersnoer.

ultrasonic impact treatment; methode om de vermoeiingssterkte van lasnaden te verhogen.

zie rootcrack.

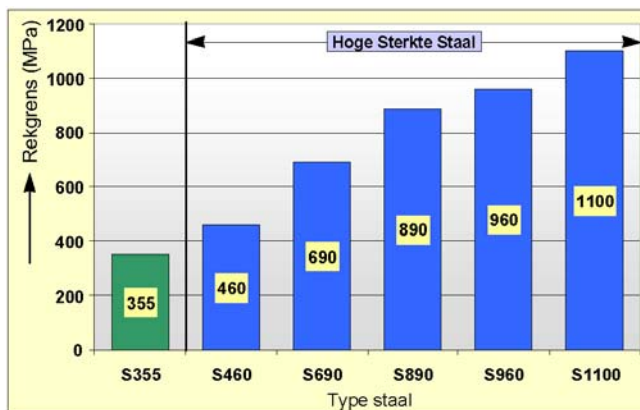
lagere sterkte dan die van het basismateriaal.

Vloeigrens	spanning waarbij vloeien van het materiaal optreedt.
Warmte-inbreng	de energie die door de lasboog per lengte-eenheid las in het materiaal wordt gebracht.
Yield strength	rekgrens.
Z-kwaliteit	aanduiding aangevende dat het materiaal bestand is tegen lamellaire scheurvorming.

1.2 Wat wordt verstaan onder “Staal met hoge sterkte”?

Staalsoorten met hoge sterkte hebben, zoals de naam al aangeeft, een hogere sterkte (rekgrens en treksterkte) dan de op dit moment voor staalconstructies veel toegepaste staalsoorten S235 (oude benaming St 37) en het S355 (oude benaming St 52). Deze staalsoorten hebben namelijk een gegarandeerde rekgrens van 235 respectievelijk 355 MPa (N/mm²).

Staalsoorten met hoge sterkte hebben een rekgrens die hoger is dan 355 MPa. Hierdoor zijn hogere spanningen in het materiaal toelaatbaar, hetgeen leidt tot dunwandiger en dus lichtere constructies. Daarnaast kunnen, vanwege de hogere toelaatbare spanningen, slankere constructies worden gerealiseerd. De staalsoorten met hoge sterkte kunnen worden ingedeeld in een aantal sterkteklassen, zoals weergegeven in figuur 1.1.



figuur 1.1 Voornaamste sterkteklassen binnen de staal-soorten met hoge sterkte

De term “hoge sterkte staalsoorten” is in de verschillende sectoren van de industrie vaak toepassingsafhankelijk. Niet in alle sectoren worden staalsoorten met dezelfde sterkte-eigenschappen als hoge sterkte staal aangeduid.

Zo worden bijvoorbeeld in de gastransportleidingssystemen staalsoorten met een rekgrens van 480 MPa (type X70) al jarenlang toegepast. Hier vinden onderzoeken plaats naar toepassing van staalsoorten met een rekgrens van boven 550 MPa (type X80).

Kijken we naar de scheepsbouw, exclusief de onderzeeboten, dan vindt gebruik van staalsoorten met een rekgrens van meer dan 420 MPa nog sporadisch plaats. In de onderzeebotenbouw daarentegen worden al veelvuldig staalsoorten met een rekgrens van 900 MPa toegepast. In de staalconstructiebouw voor moderne gebouwen vinden staalsoorten met een rekgrens van 460 MPa meer en meer toepassing, terwijl bij beweegbare bruggen staal-soorten met een rekgrens van 690 MPa bijna “standaard” staalsoorten zijn.

De drukvatenindustrie blijft nog enigszins achter wat toepassing van staalsoorten met een rekgrens van meer dan 420 MPa betreft.

Deze voorlichtingspublicatie behandelt de constructie-staalsoorten met hoge sterkte met een plaat- en/of wand-dikte vanaf 3 mm. Dunne plaat uit hoge sterkte staal wordt in deze publicatie niet besproken. Daarvoor wordt verwezen naar de publicaties die op de website www.dunneplaat-online.nl beschikbaar zijn.

Opmerking 1:

Er worden veel verschillende namen gebruikt voor de staal-soorten met hoge sterkte. De namen hebben of wel betrekking op de mechanische eigenschappen of op de wijze van vervaardigen.

Tot de eerste groep kunnen onder meer worden gerekend:

- hoge rekgrens staal-soorten;
- hoge sterkte staal-soorten;
- staal-soorten met verhoogde rekgrens;
- staal-soorten met verhoogde sterkte.

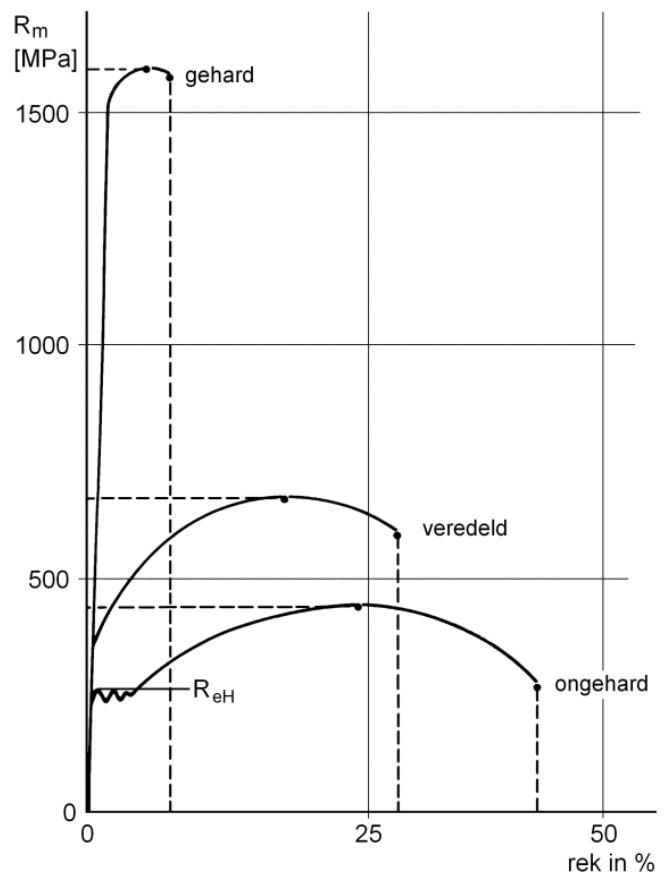
Tot de tweede groep onder meer:

- fijnkorrel staal-soorten;
- genormaliseerde staal-soorten;
- TM-staal-soorten;
- QT-staal-soorten.

In deze publicatie wordt de naam “staal(soorten) met hoge sterkte” aangehouden.

Opmerking 2:

Uit figuur 1.2 blijkt duidelijk dat met de toename van de sterkte van het materiaal door het veredelen en/of harden het fenomeen “vloeien” verdwijnt. Omdat de hoogte van de rekgrens (vloeigrens) bepalend is voor de hoogte van de toelaatbare spanning voor sterkteberekeningen, is een ander begrip ingevoerd: de 0,2% rekgrens ($R_{0,2}$). Deze grens is die spanning waarbij een blijvende verlenging (rek) optreedt van 0,2% (dit is in figuur 1.2 moeilijk aan te geven in verband met de schaal).

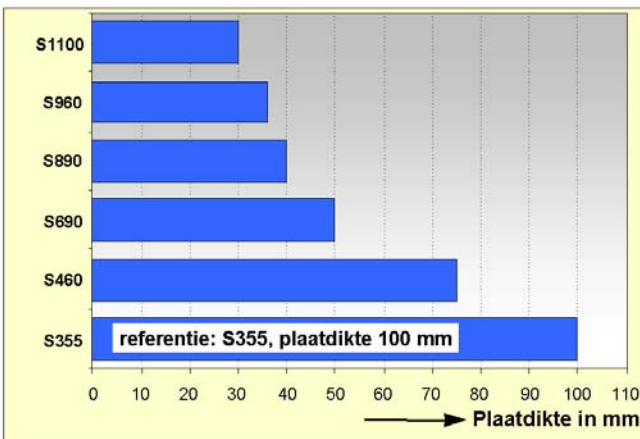


figuur 1.2 Trek-krommen van verschillende staal-soorten

1.3 *Waarom toepassing van staal met hoge sterkte?*

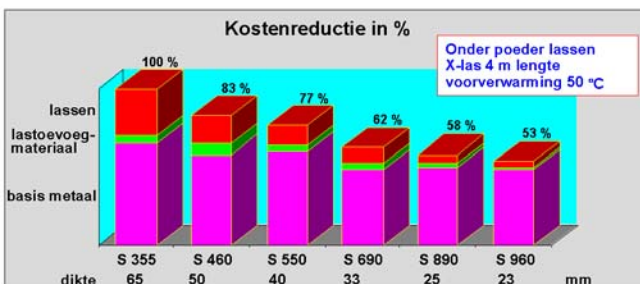
Onlangs het feit dat de staalsoorten met hoge sterkte, wat de kosten voor productie betreft, per kilogram duurder zijn dan het conventionele staal, zoals bijvoorbeeld S355, is het voor bepaalde toepassingen economisch aantrekkelijker een constructie te vervaardigen uit staal met een hoge sterkte, dan uit S355.

Eenzijds wordt dit veroorzaakt doordat bij een volledig op trek belaste constructie vanwege de hogere rekgrens de vereiste materiaald doorsnede kan afnemen. Het resultaat is dat minder materiaal nodig is (zie figuur 1.3). Zeker daar waar constructies moeten bewegen, zoals bijvoorbeeld beweegbare bruggen en autokranen, is minder energie nodig om het geheel in beweging te zetten.



figuur 1.3 Het effect van de hoogte van de rekgrens op de plaatdikte

Anderzijds kan het economisch aantrekkelijk zijn staalsoorten met hoge sterkte te gebruiken, doordat de verwerkingskosten en met name de laskosten, in grote mate worden bepaald door de te verwerken materiaaldikte. Figuur 1.4 geeft schematisch een onderverdeling weer van de opbouw van de kosten bij gebruikmaking van een conventioneel staal type S355 in vergelijking tot staalsoorten met hoge sterkte.



figuur 1.4 Schematische weergaven van de economische voordelen bij gebruik van staalsoorten met hoge sterkte (Bron: Dillingen Hütte)

Uit figuur 1.4 blijkt dat de overweging staal met hoge sterkte te gebruiken, in plaats van S355, veelal op economische gronden is gebaseerd. Bovendien spelen andere factoren een belangrijke rol bij de overweging deze staalsoorten toe te passen, zoals lagere transportkosten, lager gewicht, snellere installatietijden e.d.

De financiële voordelen van het uitvoeren van staalconstructies in staal met hoge sterkte kunnen uitsluitend wor-

den gerealiseerd als de constructie correct is ontworpen (met name wat sterkte, stijfheid en (vermoeiings)levensduur betreft) en het staal op de juiste wijze wordt verwerkt. Wordt niet voldaan aan deze uitgangspunten, dan leidt toepassing van staal met hoge sterkte tot grote technologische problemen met mogelijk grote financiële consequenties (kosten).

1.4 *Toepassingsvoorbeelden van staalsoorten met hoge sterkte*

In constructies uit staalsoorten met hoge sterkte zijn hogere (statische) spanningen toelaatbaar, waardoor dunwandiger kan worden geconstrueerd. Bovendien betekenen lichtere constructies energiebesparing bij bewegen. Voorbeelden zijn onder meer te vinden in mobiele werktuigen, civiele constructies, offshore, enz.

Bovendien kan door gebruikmaking van staalsoorten met hoge sterkte slanker worden geconstrueerd, waardoor aan allerlei esthetische aspecten aandacht kan worden geschonken. De stijfheid van een slanke constructie moet echter wel gewaarborgd blijven.

Hieronder volgen enkele voorbeelden van toepassing van staalsoorten met hoge sterkte in verschillende marktsectoren.

1.4.1 *Mobile werktuigen*

Mobile kraan

Figuur 1.5 geeft een mobiele kraan weer, waarvan de telescopische arm is vervaardigd uit staal met hoge sterkte met een rekgrens van 960 MPa. Opgemerkt moet worden dat vervanging van S355 door staal met een hoge sterkte, zonder aanvullende maatregelen, geen direct positief effect heeft op de vermoeiingssterkte. Dit door de vermoeiingssterkte niet toeneemt met toename van de rekgrens. Door aanvullende maatregelen, zoals lasteenvverbeteringen, kan de vermoeiingssterkte wel worden verbeterd en kan hoge sterkte staal wel voordelen opleveren.



figuur 1.5 Mobile kraanarm vervaardigd uit staal met hoge sterkte

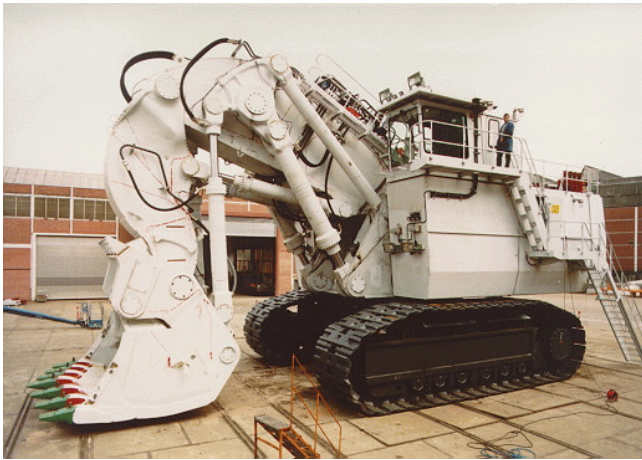
Hydraulische graafmachine

In figuur 1.6 is een extreem grote hydraulische graafmachine afgebeeld, waarvan zowel de beweegbare arm, alsook de graafbak zijn vervaardigd uit staal met hoge sterkte, type S690.

Voertuig voor grondtransport

Figuur 1.7 geeft een voertuig voor grondtransport weer, waarvan het chassis is vervaardigd uit staal met hoge sterkte, type S690. Toepassing van staal met hoge sterkte maakt het mogelijk om bij een maximaal toelaatbare asbelasting, opgelegd door de wettelijke bepalingen per land,

een grotere lading mee te nemen, waardoor efficiënter kan worden gewerkt.



figuur 1.6 Hydraulische graafmachine



figuur 1.7 Voertuig voor grondtransport

1.4.2 *Civiele constructies*

In de civiele constructies worden voor de bouw van bruggen tegenwoordig veel staalsoorten met hoge sterkte toegepast. Enkele voorbeelden zijn de brug bij Millau te Frankrijk, de Erasmusbrug te Rotterdam en de Prins Clausbrug te Utrecht.

Voor de brug bij Millau (figuur 1.8), een kabel hangbrug met een lengte van 2.460 meter, de langste kabel hangbrug ter wereld, zijn in het brugdek en de pylonen totaal ca. 43.000 platen staal gebruikt, waarvan ca. 18.000 uit staal met een rekgrens van 460 MPa, tot een dikte van 120 mm.

In de Erasmusbrug te Rotterdam (figuur 1.9) is voor zowel de pylon als voor het beweegbare gedeelte totaal ca. 4.200 ton staal met een rekgrens van 355 MPa in een dikte van 8 tot 100 mm gebruikt. Daarnaast is ca. 2.000 ton staal met een rekgrens van 460 MPa in de dikte van 12 tot 80 mm en ca. 800 ton staal in de dikte van 80 tot 120 mm verwerkt.

Door toepassing van staal met hoge sterkte is een gewichtsbesparing bereikt van ca. 18% en is een reductie op de bouwkosten gerealiseerd van ca. 10%. Bovendien kon de pylon zeer slank worden gehouden.



figuur 1.8 Brug bij Millau (Frankrijk)



figuur 1.9 Erasmusbrug te Rotterdam

In de Prins Clausbrug te Utrecht (figuur 1.10) is onder meer voor de pylon ca. 1.300 ton staal met een rekgrens van 460 MPa met een dikte tot 90 mm verwerkt.

Als bijzonder voorbeeld van lichter construeren zou de Eiffeltoren te Parijs kunnen dienen: als men deze heden ten dage zou uitvoeren in staal met hoge sterkte, zou men ca. 2.000 ton staal nodig hebben, terwijl bij de bouw in 1889 ca. 6.500 ton smeedstaal is gebruikt.

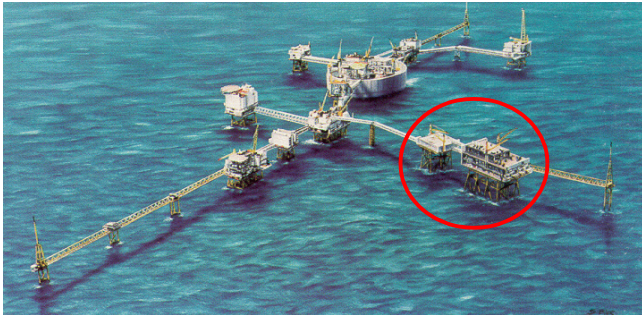


figuur 1.10 Prins Clausbrug te Utrecht

1.4.3 Offshore

Ook in de offshore vindt staal met hoge sterkte meer en meer toepassing.

Zo is in het Ekofisk II-platform ca. 45.000 ton aan staal verwerkt met een rekgrens van 420 MPa (zie figuur 1.11) en in de Mayflower TIV (figuur 1.12), een schip waarmee windmolens op zee worden opgebouwd, ca. 5.300 ton staal met een rekgrens van 460 MPa.



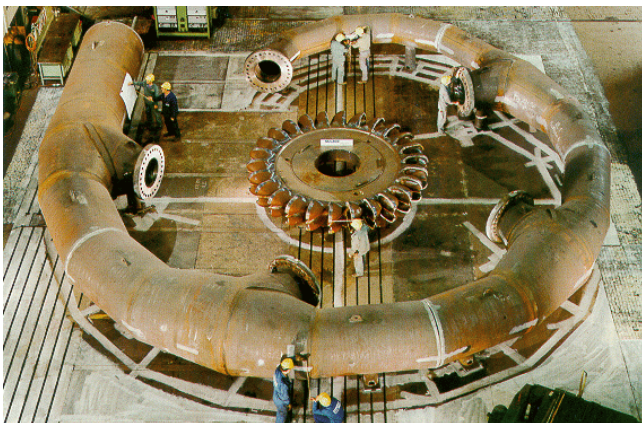
figuur 1.11 Ekofisk II



figuur 1.12 Mayflower

1.4.4 Diversen

Er zijn meer voorbeelden te noemen van toepassing van staal met hoge sterkte. Ook bij de bouw van waterturbines wordt dit type staal toegepast. De ring zoals getoond in figuur 1.13 is opgebouwd uit staal met hoge sterkte met een rekgrens van 690 MPa.



figuur 1.12 Ring van een waterturbine

Moet bijvoorbeeld 30.000 m³ gas onder druk worden opgeslagen in een bolvormig drukvat, dan kan worden gekozen voor een staal met een rekgrens van 275 MPa of een staaltype met een rekgrens van 690 MPa.

Beperken we de wanddikte tot 38 mm teneinde, conform specificaties, het spanningsarmgloeien na het lassen te vermijden, dan leert een berekening van de grootte van het drukvat, dat voor een bol uit staal met een rekgrens van 275 MPa ca. 4.500 ton staal nodig is en bij toepassing van staal met een rekgrens van 690 MPa slechts ca. 1.400 ton staal. Hieruit blijkt dat toepassing van staal met hoge sterkte de mogelijkheid biedt de benodigde opslagcapaciteit te realiseren met "lichtere" bollen. Dit uit zich dan ook weer in de zwaarte van de fundering voor deze opslagbollen.

In gastransportleidingssystemen worden, afhankelijk van de gasdruk in de leiding, staalsoorten met hoge sterkte gebruikt. In tabel 1.1 is een en ander weergegeven.

tabel 1.1 Staalsoorten met hoge sterkte in gastransportleidingssystemen

Gebruiksdruk (bar)	Staalaanduiding volgens	
	API 5L	EN 10208-2
1 - 40	X 52	L360
20 - 80	X60	L 415
60 - 100	X70	L 485
60 - 150	X80	L 550

Hoofdstuk 2

Staal met hoge sterkte

2.1 Algemeen

De meest gangbare definitie van staal met hoge sterkte luidt "Staal met een gespecificeerde minimum rekgrens hoger dan 355 MPa". In de praktijk betekent dit dat staalsoorten met een gespecificeerde minimum rekgrens vanaf 420 MPa als staalsoorten met hoge sterkte worden bestempeld.

De staalsoorten met hoge sterkte kunnen worden onderverdeeld naar de wijze van vervaardigen, alsook naar hun sterkte-eigenschappen.

Binnen de groep van staalsoorten met hoge sterkte varieert de gespecificeerde minimum rekgrens (SMYS) van ca. 420 tot ca. 1.100 MPa (zie figuur 1.1). Naarmate de SMYS toeneemt, daalt in de praktijk de toepassing van het materiaal. Het grootste gedeelte van het op dit moment toegepaste staal met hoge sterkte heeft een SMYS van ca. 460 - 500 MPa.

Voor de staalsoorten die een vloeigedrag vertonen is de SMYS de bovenste rekgrens (R_{eH}). Dit betreft meestal staalsoorten met een SMYS tot en met ca. 500 MPa. Voor de staalsoorten die geen vloeigedrag vertonen is de SMYS gelijk aan $R_{0,2}$.

Er zijn verschillende productieprocessen beschikbaar om hoge sterkte staal te vervaardigen. De belangrijkste vervaardigingsmethoden zijn:

- normaalglueien (aangeduid met N of NL achter het getal dat de rekgrens aangeeft);
- thermomechanisch walsen (aangeduid met M of ML achter het getal dat de rekgrens aangeeft);
- harden en ontlaten (aangeduid met Q of QL achter het getal dat de rekgrens aangeeft).

In de norm NEN-EN 10025 zijn de verschillende staalkwaliteiten met hoge sterkte opgenomen en wel:

NEN-EN 10025-1 (2004)

Warmgewalste producten van constructiestaal.

Algemene technische leveringsvoorwaarden.

NEN-EN 10025-2 (2004)

Technische leveringsvoorwaarden voor ongelegeerd constructiestaal.

NEN-EN 10025-3 (2004)

Technische leveringsvoorwaarden voor normaalgeglueide/normaliserend gewalst lasbaar fijnkorrelig constructiestaal.

NEN-EN 10025-4 (2004)

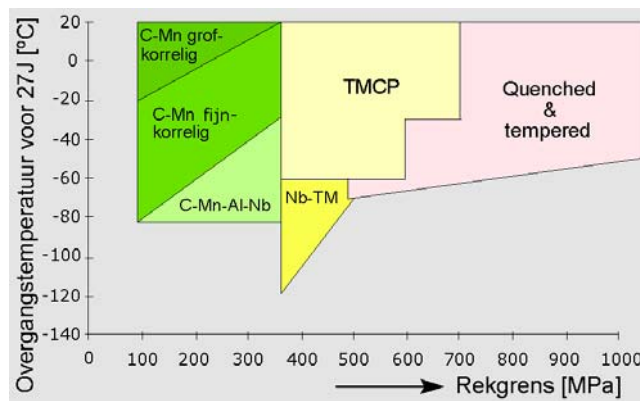
Technische leveringsvoorwaarden voor thermomechanisch gewalst lasbaar fijnkorrelig constructiestaal.

NEN-EN 10025-6 (2004)

Technische leveringsvoorwaarden voor platte producten van constructiestaal met hoge vloeigrens in de veredelde toestand.

Figuur 2.1 geeft een overzicht van de sterkte- en ductiliteitseigenschappen (overgangstemperatuur van de kerftaaiheid van 27 J) die via de verschillende bereidingswijzen van het staal kunnen worden bereikt. Voor de aanduidingen van de productieprocessen en de processen zelf wordt verwezen naar § 2.4.

Opgemerkt moet worden dat de wijze van vervaardigen mede afhankelijk is van de aard en de hoeveelheid legeringselementen die aan het staal zijn toegevoegd.



figuur 2.1 Voornaamste productieprocessen van staalsoorten met hoge sterkte en het effect daarvan op de sterkte (Bron: Dillinger Hütte)

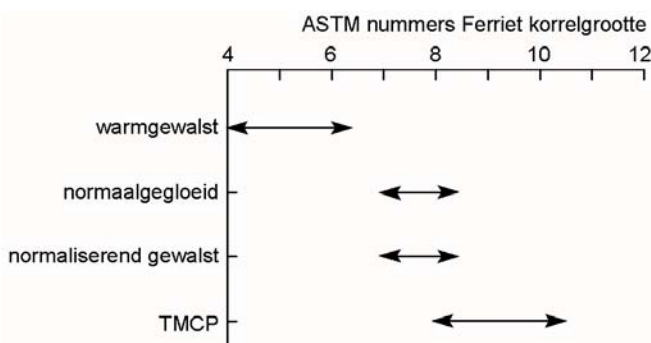
2.2 Effect van de korrelgrootte op de mechanische eigenschappen

Er is een relatie tussen de korrelgrootte van een staal en de sterkte/taaiheid: een fijne korrelstructuur geeft een hoge sterkte en goede taaiheid en een grove korrelstructuur geeft een lage sterkte en slechte taaiheid.

Opgemerkt wordt dat onder invloed van toevoer van warmte (hetgeen bij lassen gebeurt) de korrels in de warmte beïnvloede zone de neiging hebben te groeien.

De korrelgrootte wordt uitgedrukt in een zogenaamd ASTM-nummer (conform ASTM testmethode E112), waarbij het getal bij benadering aangeeft hoeveel korrels (ook wel kristallen genoemd) per gedefinieerd oppervlak aanwezig zijn. Hierbij geldt dat een hoog getal veel korrels per oppervlakte-eenheid aangeeft. Zo is de korreldiameter voor het ASTM-nummer 4 ca. 0,091 mm (ca. 120×10^2 korrels per mm^2) en voor het ASTM-nummer 10 ca. 0,011 mm (ca. 8.200×10^2 korrels per mm^2).

In figuur 2.2 is de korrelgrootte van de ferrietkorrels weergegeven in relatie tot de wijze van vervaardigen van het staal. De geharde en ontlaten staalsoorten zijn in deze figuur niet opgenomen, omdat zij een geheel andere microstructuur bezitten.



figuur 2.2 Ferrietkorrelgrootte in relatie tot de wijze van staalbereiding

2.3 Fabricageaspecten van de verschillende staalsoorten met hoge sterkte

In de verschillende stadia van het gehele productieproces van staal, bij de bereiding van het oxystaal en het elektrostaal, bij het continu gieten en bij de verschillende walsbewerkingen, hebben ontwikkelingen geleid tot een betere en beheersbare kwaliteit van het eindproduct.

De algemene staalbereiding kan kort als volgt worden omschreven: het reduceren van het ijzererts in een hoogoven tot ruwijzer, gevolgd door het raffineren van het ruwijzer in de staalfabriek tot staal.

Bij de primaire ijzer- en staalbereidingsprocessen zijn er al mogelijkheden voor verbetering van de staalkwaliteit. Voor staal zijn met name de volgende aspecten bepalend voor de kwaliteit:

- a. zuiverheid
- b. insluitselbeheersing
- c. homogeniteit
- d. grenzen voor de chemische samenstelling

Ad. a *Zuiverheid*

Deze kan worden verbeterd door bij de bereiding van het staal ontzwaveling (verlaging van het zwavelgehalte) toe te passen. Hierdoor wordt het gehalte aan sulfidische insluitsels beperkt. Bovendien worden de gehalten aan waterstof, zuurstof en stikstof in het staal verlaagd.

Ad. b *Insluitselbeheersing*

Om aan zwaardere mechanische eisen te voldoen, zoals bijvoorbeeld de weerstand tegen scheurvormende defecten ("lamellar tearing"; zie § A.5.2 in bijlage A), moet bij de staalbereiding een zogenaamde "panmetallurgische" behandeling, bijvoorbeeld met calcium, worden toegepast. Een panmetallurgische behandeling is het toevoegen van stoffen aan de pan met vloeibaar staal, vlak voordat het wordt uitgoten in blokken of in een continugietinstallatie. Hiermee wordt bereikt dat de in het staal aanwezige sulfidische insluitsels bolvormig blijven en bij de walsbehandeling niet tot langgerekte uitgewalste sulfiden leiden.

Ad. c *Homogeniteit*

De homogeniteit in chemische samenstelling binnen een totale charge van het staal is sedert de invoering van het continugietproces, in vergelijking met het traditionele blokietproces aanzienlijk verbeterd. Zo wordt ook het gehalte aan slakinlsuitsels door toepassing van het continugietproces aanzienlijk beperkt.

Ad. d *Grenzen voor de chemische samenstelling*

Gebruik van een vacuümpanbehandeling, waarbij de uiteindelijke chemische samenstelling van het staal wordt bepaald voordat dit naar de continugietmachine gaat, maakt het mogelijk de samenstelling van het staal binnen zeer nauwe grenzen te realiseren. Snelle en geavanceerde analysemethoden hebben dit mede mogelijk gemaakt.

De verhoging van de sterkte met behoud van de taaiheid wordt voornamelijk bereikt door een juiste keuze van:

- het productieproces (normaalgløien, thermomechanisch walsen, harden en ontlaten); ieder proces heeft zijn voor- en nadelen;
- de chemische samenstelling van het staal. Een groot aantal elementen die dikwijls slechts in kleine hoeveelheden aanwezig zijn spelen hierbij een cruciale rol.

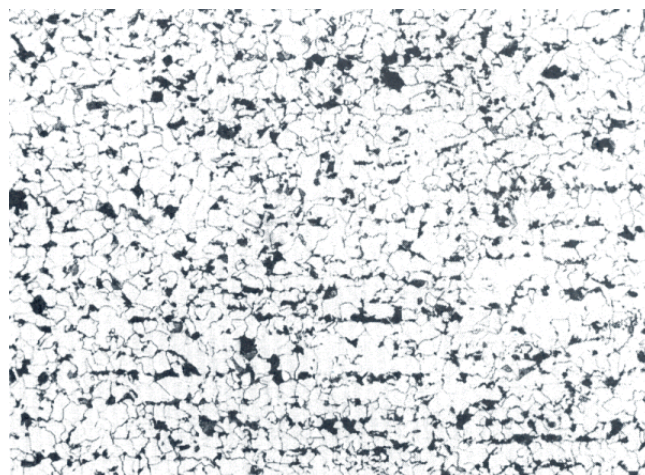
2.4 *Vervaardigingsmethoden van de verschillende staalsoorten met hoge sterkte*

2.4.1 *Normaalgløide staalsoorten met hoge sterkte (N-soorten)*

Het is bekend dat normaalgløien in het algemeen de eigenschappen van constructiestaal verbetert. Zo leidt normaalgløien tot een verhoging van de sterkte (met name de rekgrens) en een verbetering van de kerftaaiheid; dit ten gevolge van de korrelverfijning. Middels normaal-

gløien kan een rekgrens worden gerealiseerd van maximaal 460 MPa.

In figuur 2.3 is de typische microstructuur van een gewalst en genormaliseerd staal type S460N weergegeven. De structuur bestaat uit fijne ferriet met fijne perliet.



figuur 2.3 Microstructuur van normaalgløeid staal type S460

Deze typen zijn leverbaar tot en met een MSYS van 460 MPa. Omdat de sterkte van het materiaal in sterke mate afkomstig is van toegevoegde legeringselementen, is 460 MPa een soort natuurlijke bovengrens van de MSYS. De sterkte van het materiaal zou door verder legeren nog wel verhoogd kunnen worden, maar dit zou ten koste gaan van de kerftaaiheidseigenschappen.

Normaalgløeid staal type S460 is zonder meer leverbaar in wanddikten tot ca. 200 mm (grotere materiaaldikten zijn mogelijk in overleg met de leverancier).

In de norm NEN-EN 10025-3 (2004) wordt normaalgløeid staal gelijkwaardig gesteld aan normaliserend gewalst staal. Bij normaliserend gewalst staal worden de walsdeformaties namelijk in een begrensd temperatuurgebied gegeven. Hierdoor zijn de eigenschappen gelijkwaardig aan die van normaalgløeid staal.

In de norm NEN-EN 10025-3 (2004) zijn de algemene technische leveringsvoorwaarden voor deze staalkwaliteiten opgenomen. In tabel 2.1 is de chemische samenstelling van de productanalyse weergegeven, terwijl tabel 2.2 de maximum koolstofequivalenten (CEV), gebaseerd op de ladinganalyse weergeeft. Het koolstofequivalent wordt bepaald volgens de formule zoals in NEN-EN 1011-2 is weergegeven.

In tabel 2.3 zijn de mechanische eigenschappen bij omgevingstemperatuur opgenomen.

Tabel 2.4 geeft de minimum kerfslagarbeid weer voor kerfslagproeven aan proefstaven met de V-vormige kerf (Charpy-V) in langsrichting.

Tabel 2.5 geeft een vergelijking weer van de genormaliseerde staalkwaliteiten met oude benaming en met aanduidingen elders in Europa.

tabel 2.1 Chemische samenstelling van de productanalyse van genormaliseerde staalsoorten met hoge sterkte; bron: NEN-EN 10025-3 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Chemische samenstelling in %													
	C max	Si max	Mn	P max	S max	Nb max	V max	Al _{tot} min	Ti max	Cr max	Ni max	Mo max	Cu max	N max
S355N	0,22	0,55	0,85-1,75	0,035	0,030	0,06	0,14	0,01 5	0,06	0,35	0,55	0,13	0,60	0,017
S355NL	0,20			0,030	0,025									
S420N	0,22	0,65	0,95-1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,01 5	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S420NL				0,030	0,025									
S460N	0,22	0,65	0,95-1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,01 5	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S460NL				0,030	0,025									

tabel 2.2 Maximum koolstofequivalenten van genormaliseerde staalsoorten met hoge sterkte, gebaseerd op de ladinganalyse; bron: NEN-EN 10025-3 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Maximale CEV in %, voor nominale productdikten in mm		
	≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 250
S355N S355NL	0,43	0,45	0,45
S420N S420NL	0,48	0,50	0,52
S460N S460NL	0,53	0,54	0,55

tabel 2.3 Mechanische eigenschappen van genormaliseerde staalsoorten met hoge sterkte bij omgevingstemperatuur; bron: NEN-EN 10025-3 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Minimum vloeigrens R _{eH} in MPa								Treksterkte R _m in MPa			Minimum breukrek in %					
	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 200	> 200 ≤ 250
S355N S355NL	355	345	335	325	315	295	285	275	470-630	450-600	450-600	22	22	22	21	21	21
S420N S420NL	420	400	390	370	360	340	330	320	520-680	500-650	500-650	19	19	19	18	18	18
S460N S460NL	460	440	430	410	400	380	370	–	540-720	530-710	–	17	17	17	17	17	–

tabel 2.4 Minimum kerfslagarbeid voor kerfslagproeven aan proefstaven met V-vormige kerf (Charpy-V) in langsrichting in genormaliseerde staalsoorten met hoge sterkte; bron: NEN-EN 10025-3 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Minimum waarden van de kerfslagarbeid in J bij een beproevings temperatuur in °C						
	+ 20	0	–10	–20	–30	–40	–50
S355N S420N S460N	55	47	43	40	–	–	–
S355NL S420NL S460NL	63	55	51	47	40	31	27

tabel 2.5 Vergelijking van de genormaliseerde staalsoorten met hoge sterkte met oude benaming en met aanduidingen elders in Europa; bron: NEN-EN 10025-3 (2004)

Aanduiding volgens EN 10025-3	Overeenkomstige vroegere aanduiding in:						
	Europa		Duitsland	Frankrijk	Verenigd Koninkrijk	Italië	Zweden
	volgens EN 10113-2 (1993)	volgens EU 113-72	volgens DIN	volgens NF A 36-201	volgens BS 4360	volgens UNI	volgens SS14
S355N S355NL	S355N S355NL	FeE 355 KG N FeE 355 KT N	StE355 TStE355	E 355 R E 355 FP	– 50EE	FeE 355 KG N FeE 355 KT N	2134-01 2135-01
S420N S240NL	S420N S420NL	FeE420 KG N FeE 420 KT N	StE420 TStE420	E 420 R E 420 FP	– –	– –	– –
S460N S460NL	S460N S460NL	FeE 460 KG N FeE 460 KT N	StE 460 TStE460	E 460 R E 460 FP	– 55EE	FeE 460 KG N FeE 460 KT N	– –

2.4.2 Thermomechanisch gewalst staal met hoge sterkte (TM-soorten)

Een groot gedeelte van de sterkte van de thermisch gewalste staalsoorten komt uit de toegepaste walsbehandeling. Deze behandeling heeft tot doel de structuur van het staal te verfijnen. Deze korrelverfijning wordt bereikt door het staal "laag" af te walsen (gecontroleerd afwalsen) met een aansluitende warmtebehandeling; dit om optimale eigenschappen als sterkte en taaiheid te bereiken.

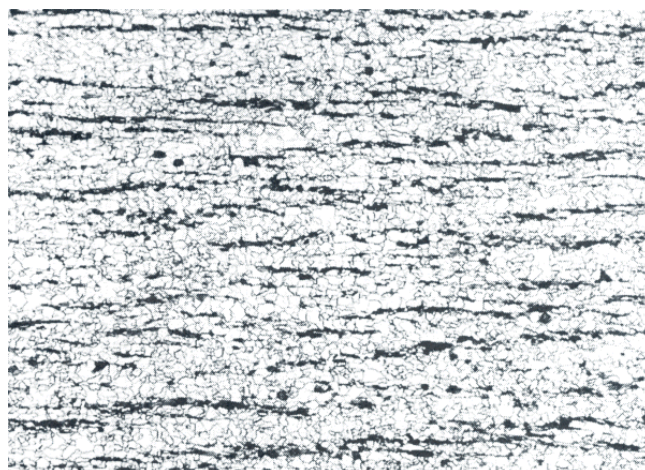
Bij gecontroleerd walsen wordt de laatste walsbehandeling uitgevoerd in het temperatuurgebied van het normaal gloeien (ca. 900 °C). Thermomechanisch "laag" afwalsen wordt bij een lagere temperatuur (tot minimaal 700 °C) uitgevoerd aan staalsoorten die zijn microgelegeerd met Nb, Ti of eventueel V.

Door thermomechanisch walsen wordt een hoge mate van korrelverfijning bereikt. De van 1000 tot ca. 750 °C gedaalde afwalstemperatuur brengt in de austenietstructuur nog nauwelijks enige korrelgroei teweeg. Uitgaande van een kleine langgerekte austenietkorrel ontstaat bij het afkoelen een zeer fijne ferrietkorrel (zie figuur 2.4). De rekgrens wordt hierdoor verhoogd zonder toename van de hoeveelheid legeringselementen.

Thermomechanisch walsen maakte het mogelijk het gehalte aan legeringselementen te verlagen en toch de sterkte te verhogen. TMCP staal is leverbaar met een SMYS tot en met 460 MPa. Ontwikkelingen vinden plaats naar hogere SMYS.

In de norm NEN-EN 10025-4 (2004) zijn de algemene technische leveringsvoorwaarden voor deze staalsoorten opgenomen.

In tabel 2.6 is de chemische samenstelling van de productanalyse weergegeven, terwijl tabel 2.7 de maximum koolstofequivalenten (CEV), gebaseerd op de ladinganalyse weergeeft. Het koolstofequivalent wordt bepaald volgens de formule zoals in NEN-EN 1011-2 is weergegeven.



figuur 2.4 Microstructuur van een thermomechanisch gewalst staal

In tabel 2.8 zijn de mechanische eigenschappen bij omgevingstemperatuur opgenomen en tabel 2.9 geeft de minimum kerfslagarbeid weer voor kerfslagproeven aan proefstaven met V-vormige kerf (Charpy-V) in langsrichting. Tabel 2.10 geeft een vergelijking weer van deze staalsoorten met de oude benaming en met de aanduidingen elders in Europa.

Tegenwoordig zijn door thermomechanisch walsen kwaliteiten met een rekgrens van ca. 600 MPa goed te produceren, terwijl kwaliteiten met een minimum rekgrens van 700 - 750 MPa in principe leverbaar zijn; in ieder geval tot dikten van 30 mm.

De nieuwste ontwikkelingen (rekgrens boven 750 MPa) betreffen stalen met een zeer laag koolstofgehalte. Het omzettingsgedrag wordt zodanig geregeld, dat bij een snelle afkoeling na het walsen een zeer fijne structuur ontstaat.

tabel 2.6 Chemische samenstelling van de productanalyse van thermomechanisch gewalste staalsoorten; bron: NEN-EN 10025-4 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Chemische samenstelling in %													
	C max	Si max	Mn max	P max	S max	Nb max	V max	Al _{tot} min	Ti max	Cr max	Ni max	Mo max	Cu max	N max
S355M	0,16	0,55	1,70	0,035	0,030	0,06	0,12	0,015	0,06	0,35	0,55	0,13	0,60	0,017
S355ML				0,030	0,025									
S420M	0,18	0,65	1,80	0,035	0,030	0,06	0,14	0,015	0,06	0,35	0,85	0,23	0,60	0,027
S420ML				0,030	0,025									
S460M	0,18	0,65	1,80	0,035	0,030	0,06	0,14	0,015	0,06	0,35	0,85	0,23	0,60	0,027
S460ML				0,030	0,025									

tabel 2.7 Maximum koolstofequivalenten van thermomechanisch gewalste staalsoorten met hoge sterkte, gebaseerd op de ladinganalyse; bron: NEN-EN 10025-4 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Maximale CEV in %, voor nominale productdikten in mm				
	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 120	> 100 ≤ 150
S355M S355ML	0,39	0,39	0,40	0,45	0,45
S420M S420ML	0,43	0,45	0,46	0,47	0,47
S460M S460ML	0,45	0,46	0,47	0,48	0,48

tabel 2.8 Mechanische eigenschappen bij omgevingstemperatuur van thermomechanisch gewalste staalsoorten met hoge sterkte; bron: NEN-EN 10025-4 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Minimum vloeigrens R_{eH} in MPa						Treksterkte R_m in MPa					Minimum breukrek in %
	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 120	≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 120	
S355M S355ML	355	345	335	325	325	320	470-630	450-610	440-600	440-600	430-590	22
S420M S420ML	420	400	390	380	370	365	520-680	500-660	480-640	470-630	460-620	19
S460M S460ML	460	440	430	410	400	385	540-720	530-710	510-690	500-680	490-660	17

tabel 2.9 Minimum kerfslagarbeid voor kerfslagproeven aan proefstaven met V-vormige kerf (Charpy-V) in langsrichting van thermomechanisch gewalste staalsoorten met hoge sterkte; bron: NEN-EN 10025-4 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Minimum waarden van de kerfslagarbeid in J bij een beproevingstemperatuur in °C						
	+20	0	-10	-20	-30	-40	-50
S355M S420M S460M	55	47	43	40	–	–	–
S355ML S420ML S460ML	63	55	51	47	40	31	27

tabel 2.10 Vergelijking van de thermomechanisch gewalste staalsoorten met oude benaming en met aanduidingen elders in Europa; bron: NEN-EN 10025-4 (2004)

Aanduiding volgens EN 10025-4	Overeenkomstige vroegere aanduiding in:			
	volgens EN 10113-3 (1993)	volgens EU 113-72	Duitsland volgens DIN	Italië volgens UNI
S355M S355ML	S355M S355ML	FeE 355 KG TM FeE 355 KT TM	StE355 TM TStE355 TM	FeE 355 KG TM FeE 355 KT TM
S420M S420ML	S420N S420NL	FeE420 KG N FeE 420 KT N	StE420 TM TStE420 TM	– –
S460M S460ML	S460M S460NM	FeE 460 KG TM FeE 460 KT TM	StE 460 TM TStE460	FeE 460 KG TM FeE 460 KT TM

Een speciale variant van het TMCP proces wordt gebruikt voor de vervaardiging van warmband staal. Hierbij wordt een relatief dikke plak in een walsstraat (6 - 10 achter elkaar opgestelde walsen) tot de gewenste dikte uitgewalst en vervolgens opgehaspeld. Dit materiaal is tot breedten van ca. 2.000 mm en diktes tot ca. 15 mm leverbaar. Het gehalte aan legeringselementen is zeer laag.

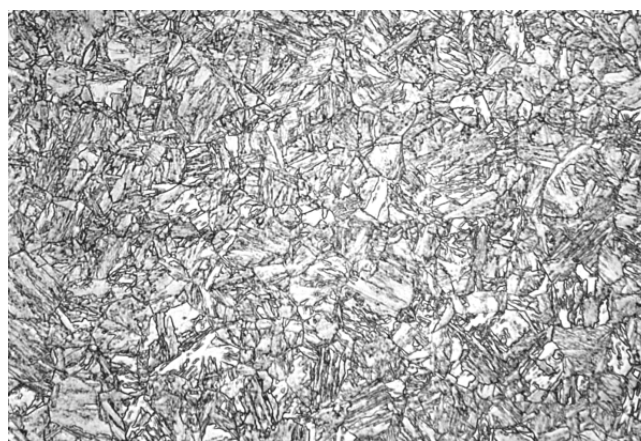
2.4.3 Geharde en ontlaten staalsoorten met hoge sterkte (QT-staalsoorten)

Deze staalsoorten worden ook wel de veredelde staalsoorten met hoge sterkte genoemd. Rekgrensniveau's tot 1.100 MPa zijn te realiseren door het staal na het walsen te harden en te ontlaten. Deze warmtebehandeling heeft een gunstig effect op de mechanische eigenschappen van staal; er zijn goede sterkte- en taaiheidseigenschappen te bereiken.

Deze staalsoorten zijn ook onder de naam QT-staalsoorten bekend (QT = Quenching and Tempering = harden en ontlaten). De structuur van dergelijke staalsoorten bestaat uit bainiet en/of martensiet (zie figuur 2.5).

Deze techniek is met name in Japan voor het walsen van dikke plaat ontwikkeld. Het betreft een op het thermomechanisch walsen volgende snelle afkoeling.

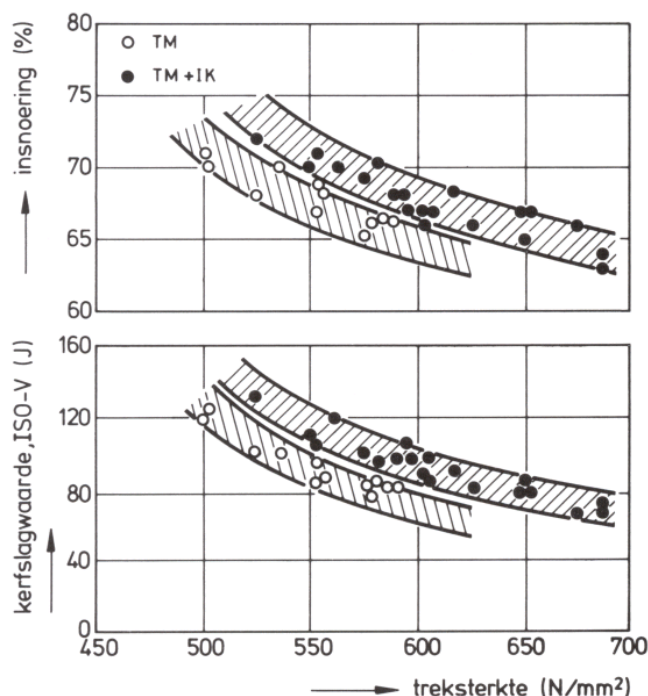
Om de vereiste afkoelsnelheid van de walshitte tot ca. 550 °C van ca. 15 °/sec te bereiken, zijn grote installaties nodig. Koelt men in plaats van met 0,5 °/sec (nor-



figuur 2.5 De microstructuur van QT-staal, type S1100

male luchtcooling) af met 15 °/sec (versnelde koeling, "accelerated cooled" of "intensiv Kühlung", afgekort tot IK), dan nemen fijnkorreligheid, rekgrens, treksterkte en taaiheid nog verder toe. Een staal type S460 TM + IK-staal is veelal (nog) armer aan legeringselementen (koolstof-equivalent bijvoorbeeld 0,38%) dan het gewone TM-staal.

De rekgrens van het op deze manier behandeld staal kan sterk worden verhoogd. De insnoering en kerftaaiheid worden bij vergelijkbare sterkte ook hoger (zie figuur 2.6).



figuur 2.6 De invloed van versneld koelen op de taaiheidseigenschappen

Om voldoende doorharding te krijgen tijdens de afkoeling in water vanuit de austenietfase, moet het staal gelegeerd zijn met elementen als chroom, molybdeen of nikkel. Voor het verkrijgen van hogere reksgrensniveaus (boven 600 - 700 MPa) alsook een betere doorharding worden veelal enkele ppm's borium toegevoegd. Veredelde, lasbare staalsoorten worden geleverd in een reksgrensniveau vanaf 460 MPa tot boven de 1.000 MPa.

Een belangrijke ontwikkeling voor de productie van veredelde (Quenched and tempered, Q + T) staalsoorten was de zogenaamde "roller quench" installatie, waarmee veel hogere afkoelsnelheden kunnen worden bereikt dan met de klassieke zogenaamde "static quench"-installatie. Gebruik van een roller-quench installatie biedt door de hogere afkoelsnelheid een betere doorharding, waardoor dezelfde sterktecijfers gerealiseerd kunnen worden met een lager koolstofequivalent.

Zoals eerder opgemerkt, wordt in de praktijk nog weinig staal gebruikt met een MSYS boven ca. 900 MPa. Naarmate de materiaaldikte en/of de MSYS stijgen, neemt het gehalte aan legeringselementen toe. De laatste jaren is er binnen de Q&T-staalsoorten met hoge sterkte de trend naar lagere gehalten aan legeringselementen. Voor de grotere materiaaldikten heeft dit onder andere geleid tot het microlegeren met borium.

Tabel 2.11 geeft de chemische samenstelling van de productanalyse voor veredelde staalsoorten volgens NEN-EN 10025-6 weer.

Tabel 2.12 geeft voor de verschillende staalsoorten het maximum koolstofequivalent (CEV) volgens NEN-EN 10025-6 weer, gebaseerd op de ladinganalyse.

Tabel 2.13 geeft de mechanische eigenschappen weer bij kamertemperatuur volgens NEN-EN 10025-6 weer.

Tabel 2.14 geeft de minimum kerfslagarbeid weer voor kerfslagproeven aan proefstaven met de V-vormige kerf (Charpy-V) in langsrichting volgens de norm NEN-EN 10025-6 (2004).

Tabel 2.15 geeft een vergelijking van de veredelde staal-soorten met de oude benaming en met de aanduidingen elders in Europa volgens NEN-EN 10025-6 (2004).

tabel 2.12 Maximum koolstofequivalent (CEV) van veredelde staalsoorten, gebaseerd op de ladinganalyse volgens NEN-EN 10025-6

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Maximum koolstofequivalent (CEV)		
	≤ 50	> 50 ≤ 100	> 100 ≤ 150
S460Q S460QL S460QL1	0,47	0,48	0,50
S500Q S500QL S500QL1	0,47	0,70	0,70
S550Q S550QL S550QL1	0,65	0,77	0,83
S620Q S620QL S620QL1	0,65	0,77	0,83
S690Q S690QL S690QL1	0,65	0,77	0,83
S890Q S890QL S890QL1	0,72	0,82	–
S960Q S960QL	0,82	–	–

De geschetste methoden om staalsoorten met hoge sterkte te fabriceren en verder te ontwikkelen beperken zich niet tot fabricage van plaatstaal, maar gelden ook voor balken en profielen. Een Europese ontwikkeling bij het walsen van hoge sterkte staalprofielen is het zogenaamde QST-proces. QST staat voor Quench and Self Tempering (snel afkoelen en zelfontlaten). Het QST houdt in dat de profielen direct na het (al dan niet thermomechanisch) walsen over hun gehele oppervlak worden afgekoeld met water. Dit afkoelen wordt onderbroken voordat de kern van het profiel is afgekoeld. Het oppervlak van het profiel wordt nu "zelf-gegloeid" door de hitte die zich nog in de kern van het profiel bevindt.

tabel 2.11 Chemische samenstelling van de productanalyse voor veredelde staalsoorten volgens NEN-EN 10025-6

Sterkte-klasse	Kwaliteit	Chemische samenstelling in % (maximum waarden)														
		C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
alle sterkte klassen	geen symbool	0,22	0,86	1,80	0,030	0,017	0,016	0,006	1,60	0,55	0,74	0,07	2,1	0,07	0,14	0,17
	L				0,025	0,012										
	L1				0,025	0,012										

tabel 2.13 Mechanische eigenschappen van veredelde staalsoorten bij kamertemperatuur; bron: NEN-EN 10025-6

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Minimum vloeigrens R_{eH} in MPa			Treksterkte R_m in MPa			Minimum rek na breuk in %
	≥ 3 ≤ 50	> 50 ≤ 100	> 100 ≤ 150	≥ 3 ≤ 50	> 50 ≤ 100	> 100 ≤ 150	
S460Q S460QL S460QL1	460	440	400	550 - 720		500 - 670	17
S500Q S500QL S500QL1	500	480	440	590 - 770		540 - 720	17
S550Q S550QL S550QL1	550	530	490	640 - 820		590 - 770	16
S620Q S620QL S620QL1	620	580	560	700 - 890		650 - 830	15
S690Q S690QL S690QL1	690	650	630	770 - 940	760 - 930	710 - 900	14
S890Q S890QL S890QL1	890	830	–	940 - 1100	880 - 1100	–	11
S960Q S960QL	960	–	–	980 - 1150	–	–	10

tabel 2.14 Minimum kerfslagarbeid voor kerfslagproeven aan proefstaven met V-vormige kerf (Charpy-V) in langsrichting voor veredelde staalsoorten; bron: NEN-EN 10026-4 (2004)

Aanduiding vlgs NEN-EN 10027-1	Minimum waarden van de kerfslagarbeid in J bij een beproevings temperatuur in °C			
	0	–20	–40	–60
S460Q S500Q S550Q S620Q S690Q S890Q S960Q	40	30	–	–
S460QL S500QL S550QL S620QL S690QL S890QL S960QL	50	40	30	–
S460QL1 S500QL1 S550QL1 S620QL1 S690QL1 S890QL1	60	50	40	30

tabel 2.15 Vergelijking van de veredelde staalsoorten met oude benaming en met aanduidingen elders in Europa; bron: NEN-EN 10025-6 (2004)

Aanduiding vlgs EN 10025-6	Overeenkomstige vroegere aanduiding				
	volgens EN 10137-2 (1995)	volgens UE 137 1983	Duitsland	Frankrijk	Zweden
S460Q S460QL S460QL1	S460Q S460QL S460QL1	FeE 460 V FeE 460 V KT –	– TStE 460 V –	– E460T –	– – –
S500Q S500QL S500QL1	S500Q S500QL S500QL1	FeE 500 V FeE 500 V KT –	StE 500 V TStE 500 V ESTe 500 V	– E 500 –	2614 2615 –
S550Q S550QL S550QL1	S550Q S550QL S550QL1	FeE 550 V FeE 550 V KT –	StE 550 V TStE 550 V ESTe 550 V	– E 550 T –	– – –
S620Q S620QL S620QL1	S620Q S620QL S620QL1	FeE 620 V FeE 620 V KT –	StE 620 V TStE 620 V ESTe 620 V	– E 620 T –	– – –
S690Q S690QL S690QL1	S690Q S690QL S690QL1	– FeE 690 V KT –	StE 690 V TStE 690 V ESTe 690 V	– E 690 T –	2624 2625 –
S890Q S890QL S890QL1	S890Q S890QL S890QL1	– – –	– TStE 890 V ESTe 890 V	– – –	– – –
S960Q S960QL	S960Q S960QL	– –	– TStE 960 V	– E960 T	– –

Met het QST-proces worden de volgende voordelen behaald:

- ▶ een hoge rekgrens: een toename van 100-150 MPa in vergelijking tot niet behandeld materiaal is mogelijk;
- ▶ een besparing op legeringselementen;
- ▶ een goede taaiheid door een gunstige microstructuur;
- ▶ verbeterde lasbaarheid door een laag koolstofequivalent;
- ▶ de mogelijkheid om verschillende staalkwaliteiten met een zelfde chemische samenstelling te vervaardigen; de eigenschappen van het staal kunnen middels QST-condities worden aangepast;
- ▶ de totale productiekosten zijn lager.

Bij de plaat- en profielfabricage zijn ook kwaliteitsverbeteringen opgetreden wat betreft de oppervlaktegesteldheid. Een betere oppervlaktegesteldheid wordt verkregen door bijvoorbeeld normaalglueien te vervangen door gecontroleerd walsen of door het thermomechanisch walsen. Het resultaat is een goed hechtende en egale oxidehuid. Versneld koelen geeft een nog dunnere oxidehuid op het staal dan bij de andere speciale walsprocessen. De oppervlaktegesteldheid van dit type staal is in het algemeen beter dan van veredeld constructiestaal.

Hoofdstuk 3

Metaalkundige eigenschappen van staal met hoge sterkte

3.1 Algemeen

De eigenschappen van verschillende staalsoorten zijn sterk afhankelijk van het fabricageproces, zoals eerder is aangegeven. In het navolgende wordt nader ingegaan op de sterkte- en ductiliteitseigenschappen van de staalsoorten met hoge sterkte, waarbij de nadruk valt op de ductiliteit en de eigenschappen bij verlaagde temperatuur. De gevolgen van hogere sterkte, hogere rekgrens-treksterkte-verhoudingen en vermoeiingssterkte bij constructie in staalsoorten met hoge sterkte worden nader toegelicht in paragraaf 4.4.

Voordat de eigenschappen worden besproken, wordt terugverwezen naar figuur 1.1 in hoofdstuk 1, zijnde een overzicht van de voornaamste sterkteklassen binnen de hoge sterkte stalen.

3.2 Mechanische eigenschappen

In hoofdstuk 2 zijn bij de drie besproken staalkwaliteiten de belangrijkste mechanische eigenschappen in een aantal tabellen weergegeven. Deze eigenschappen zijn ontleend aan de relevante delen van de norm NEN-EN 10025.

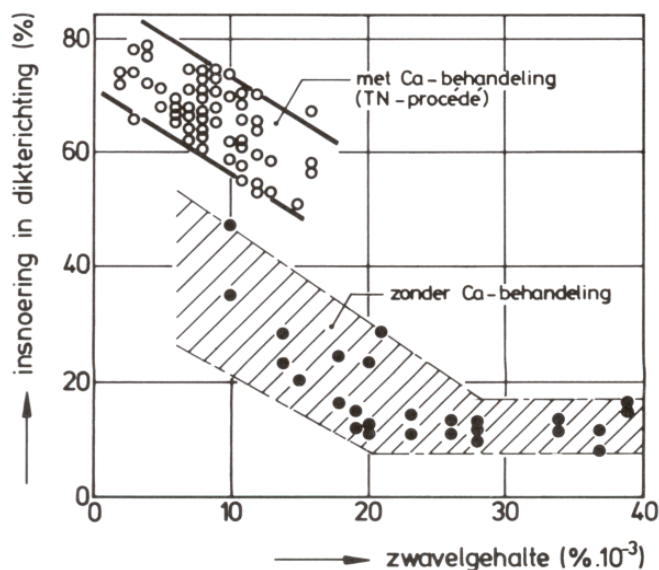
3.3 Vervormingseigenschappen

Behalve de eigenschappen in de walsrichtingen zijn ook de vervormingseigenschappen in de dikterichting van het materiaal van belang. Zeker als er gevaar voor lamellaire scheurvorming (lamellar tearing) bestaat. Lamellaire scheurvorming kan optreden indien het materiaal in dikterichting wordt belast en als de uitgewalste verontreinigingen de daardoor optredende spanningen niet kunnen overdragen. Het gevolg is inwendige scheurvorming waarbij de scheuren evenwijdig aan het plaatoppervlak lopen.

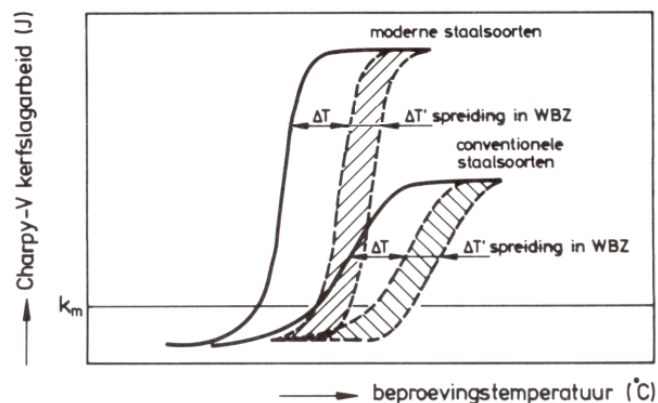
Het probleem van lamellaire scheurvorming heeft, vooral voor dikwandige constructies, zoals toegepast in offshore platforms, de aanzet gegeven tot het op grote schaal ontwikkelen van technologieën om zuiverder staal te produceren. Vooral door verlaging van het zwavelgehalte, zijn de vervormingseigenschappen in dikterichting dermate goed geworden, dat lamellaire scheurvorming nauwelijks nog een probleem oplevert. Zeker als men staal bestelt met een zogenaamde Z-kwaliteit volgens de norm NEN-EN 10164. Staalsoorten met een Z-kwaliteit bezitten, ten gevolge van een laag zwavelgehalte, weinig uitgewalste sulfiden, waardoor dit staal in dikterichting kan worden belast. Momenteel zijn zwavelgehalten lager dan 0,020% heel gewoon; gehalten ver onder 0,010% zijn momenteel bereikbaar.

De gunstige uitwerking hiervan op de mechanische eigenschappen is te zien in de insnoering in dikterichting (zie figuur 3.1).

Bij de moderne staalbereidingstechnieken, met lage gehalten aan verontreinigingen in combinatie met een fijnkorrelige structuur, is de kerftaaiheid van de constructiestalen aanzienlijk toegenomen. Dit heeft vooral geresulteerd in hogere kerftaaiheden en een verschuiving van de overgangstemperatuur van de kerftaaiheden naar lagere temperaturen (zie de schematische weergave in figuur 3.2).



figuur 3.1 Effect van het zwavelgehalte en het fabricage-procédé op de insnoering in dikterichting



figuur 3.2 Charpy-V kerfslagkrommen voor basismateriaal en warmte beïnvloede zone voor conventioneel en modern constructiestaal

Afhankelijk van de toepassing van de staalsoorten met hoge sterkte worden daaraan specifieke eisen gesteld. Vanwege de grote verschillen in kerftaaiheid tussen de verschillende staalsoorten moet men hiermee rekening houden. Een probleem is echter, dat als het basismateriaal voldoet aan de gestelde taaiheidseisen, dit nog niet hoeft te gelden voor de gehele gelaste verbinding. In het bijzonder geldt dit dan voor de door de ingebrachte laswarmte beïnvloede zone (wbz = warmte beïnvloede zone).

Zo heeft men bijvoorbeeld bij de bouw van gastransportleidingen veel problemen ondervonden met de realisatie van de gewenste taaiheid in de warmte beïnvloede zone bij het lassen van genormaliseerde vanadium gelegeerde fittingen aan pijpstukken uit thermomechanisch gewalst staal. Ook ervaringen elders met de toepassing van S460 voor LPG transportvaten hebben geleerd, dat een nauwkeurige specificatie van de taaiheidseisen, afgestemd op de toepassing, noodzakelijk is.

Voor de staalsoorten met hoge sterkte is de conclusie gerechtvaardigd, dat de ductiliteit, in termen van weerstand tegen bros bezwijken, sterk kan variëren. In de praktijk levert dit voor het basismateriaal in het algemeen geen problemen op.

Anders is het met de lasverbinding, waarin zones voor kunnen komen met taaiheden die lager kunnen zijn dan

Staalsoort symbool	Chemische samenstelling van de ladinganalyse in %														
	C max	Si max	Mn	P max	S max	Al _{tot} min	N max	Cr min	Cu max	Mo max	Nb max	Ni max	Ti max	V max	Nb + Ti + V max
P355N	0,18	0,50	1,10 - 1,70	0,025	0,015	0,020	0,012	0,30	0,30	0,08	0,05	0,50	0,30	0,10	0,12
P355NH															
P355NL1															
P355NL2															
P460NH	0,20	0,60	1,10 - 1,70	0,025	0,015	0,020	0,025	0,30	0,70	0,10	0,05	0,80	0,30	0,20	0,22
P460NL1															
P460NL2															

tabel 3.3 Mechanische eigenschappen bij kamertemperatuur van normaalgegloeid lasbaar fijnkorrelig staal voor drukvaten; bron: NEN-EN 10028-3 (2003)

Staalsoort symbool	Gebruikstoestand	Productdikte in mm	Vloeigrens R _{eH} in MPa	Treksterkte in MPa	Rek na breuk in %
P355N P355NH P355NL1 P355NL2	N	≤ 16	355	490 - 630	22
		16 < t ≤ 40	345		
		40 < t ≤ 60	335		
		60 < t ≤ 100	315	470 - 610	21
		100 < t ≤ 150	305	460 - 600	
		150 < t ≤ 250	295	450 - 590	
P460NH P460NL1 P460NL2	N	≤ 16	460	570 - 720	17
		16 < t ≤ 40	445		
		40 < t ≤ 60	430		
		60 < t ≤ 100	400	540 - 710	
		100 < t ≤ 250	Overeen te komen bij bestelling		

tabel 3.4 Minimumwaarden voor de rekgrens bij hogere temperatuur van normaalgegloeid lasbaar fijnkorrelig staal voor drukvaten; bron: NEN-EN 10028-3 (2003)

Staalsoort symbool	Productdikte in mm	Minimumwaarden voor de 0,2 %-rekgrens $R_{0,2}$ in MPa bij temperatuur van [°C]							
		50	100	150	200	250	300	350	400
P355NH	≤ 16	343	323	299	275	252	232	214	202
	$16 < t \leq 40$	334	314	291	267	245	225	208	196
	$40 < t \leq 60$	324	305	282	259	238	219	202	190
	$60 < t \leq 100$	305	287	265	244	224	206	190	179
	$100 < t \leq 150$	295	277	257	236	216	199	184	173
	$150 < t \leq 250$	285	268	249	228	209	192	178	167
P460NH	≤ 16	445	419	388	356	326	300	278	261
	$16 < t \leq 40$	430	405	375	345	316	290	269	253
	$40 < t \leq 60$	416	391	362	333	305	281	260	244
	$60 < t \leq 100$	387	364	337	310	284	261	242	227
	$100 < t \leq 250$	Overeen te komen bij bestelling							

tabel 3.5 Minimumwaarden voor de kerfslagarbeid voor van normaalgegloeid lasbaar fijnkorrelig staal voor drukvaten; bron: NEN-EN 10028-3 (2003)

Staalsoort	Minimumwaarde kerfslagarbeid in J bij beproevingstemperatuur in °C									
	Dwarsrichting					Langsrichting				
	-50	-40	-20	0	+20	-50	-40	-20	0	+20
P ...N P ...NH	-	-	30	40	50	-	-	45	65	75
P ...NL1	-	27	35	50	60	30	40	50	70	80
P ...NL2	27	30	40	60	70	42	45	55	75	85

3.6 Corrosieaspecten van staalsoorten met hoge sterkte

Het corrosiegedrag van staalsoorten met hoge sterkte wijkt in het algemeen niet af van dat van de ongelegeerde staalsoorten. De gehaltes aan legeringselementen in deze staalsoorten zijn, op die bij de weervaste staalsoorten na, namelijk te gering om invloed te hebben op de corrosie-vastheid.

De corrosieprocessen die bij ongelegeerde constructie-staalsoorten optreden en de bestrijdings- en preventie-methoden kunnen dan ook rechtstreeks op de staalsoorten met hoge sterkte betrokken worden.

De belangrijkste corrosievormen die optreden in het toepassingsgebied van zowel de staalsoorten met hoge sterkte als de ongelegeerde stalen zijn atmosferische corrosie en spanningscorrosie. De staalsoorten met hoge sterkte zijn voor deze laatste vorm gevoeliger dan de ongelegeerde stalen bij een gelijk aanbod aan waterstof. Dit onder meer

vanwege de hogere optredende spanningen in combinatie met de geringe taaiheid.

Onder atmosferische corrosie wordt verstaan de aantasting van een oppervlak onder invloed van vocht (regen, condens, enz.) met verontreinigingen uit de atmosfeer. Bij hoge vochtigheden kan zich een continue vochtfilm op het oppervlak vormen, waarin zich bij voldoende geleidbaarheid ervan corrosiereacties kunnen afspelen.

De mate van aantasting wordt bepaald door de agressiviteit van de omgeving en de samenstelling van het staal. Bepaalde legeringselementen, zoals nikkel, chroom en fosfor bij de weervaste staalsoorten, kunnen op het staal een hechte oxidehuid opleveren, waardoor de corrosieaantasting in vergelijking met die van ongelegeerd staal sterk wordt vertraagd. Alhoewel er ook weervaste staalsoorten met hogere sterkte zijn ontwikkeld, vertoont de categorie met N, Nb, Al, V en Ti microgelegeerde staalsoorten deze weervastheid niet.

tabel 3.6 Chemische samenstelling van ladinganalyse van de veredelde staalsoorten voor drukvaten; bron: NEN-EN 10028-6 (2003)

Staalsoort symbool	Maximumgehalten in %														
	C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Mo	Cu	Nb	Ni	Ti	V	Zr
P355Q	0,16	0,40	1,50	0,025	0,015	0,015	0,005	0,30	0,25	0,30	0,05	0,50	0,03	0,06	0,05
P355QH															
P355QL1															
P355QL2															
P460Q	0,18	0,50	1,70	0,025	0,015	0,015	0,005	0,50	0,50	0,30	0,05	1,00	0,03	0,08	0,05
P460QH															
P460QL1															
P460QL2															
P500Q	0,18	0,60	1,70	0,025	0,015	0,015	0,005	1,00	0,70	0,30	0,05	1,50	0,05	0,08	0,15
P500QH															
P500QL1															
P500QL2															
P690Q	0,20	0,80	1,70	0,025	0,015	0,015	0,005	1,50	0,70	0,30	0,06	2,50	0,05	0,12	0,15
P690QH															
P690QL1															
P690QL2															

tabel 3.7 Mechanische eigenschappen bij kamertemperatuur van de veredelde staalsoorten voor drukvaten; bron: NEN-EN 10028-6 (2003)

Staalsoort symbool	Vloeigrens R_{eH} in MPa voor productdikte t in mm			Treksterkte R_m in MPa voor productdikte t in mm		Rek na breuk in %
	$t \leq 50$	$50 < t \leq 100$	$100 < t \leq 150$	$t \leq 100$	$100 < t \leq 150$	
P355Q	355	335	315	490 - 630	450 - 590	22
P355QH						
P355QL1						
P355QL2						
P460Q	460	440	400	550 - 720	500 - 720	19
P460QH						
P460QL1						
P460QL2						
P500Q	500	480	440	590 - 770	540 - 720	17
P500QH						
P500QL1						
P500QL2						
P690Q	690	670	630	770 - 940	720 - 900	14
P690QH						
P690QL1						
P690QL2						

tabel 3.8 Minimumwaarden voor de rekgrens bij hogere temperatuur van de veredelde staalsoorten voor drukvaten; bron: NEN-EN 10028-6 (2003)

Staalsoort symbool	Minimumwaarden voor de 0,2% rekgrens in MPa bij een temperatuur van °C					
	50	100	150	200	250	300
P355QH	227	214	198	182	167	153
P460QH	218	205	190	174	160	147
P500QH	208	196	181	167	153	140
P690QAH	193	182	169	155	142	130

tabel 3.9 Minimumwaarden voor de kerfslagarbeid van de veredelde staalsoorten voor drukvaten; bron: NEN-EN 10028-6 (2003)

Staalsoort symbool	Productdikte in mm	Kerfslagarbeid in J bij een beproevingstemperatuur in °C van:				
		-60	-40	-20	0	+20
P Q	5 tot en met 150	-	-	27	40	60
P QH						
P QL1		-	27	40	60	-
P QL2		27	40	60	80	-

De staalsoorten met hoge sterkte zullen bij gebruik in de atmosfeer moeten worden beschermd door middel van organische of metallische deklagen. Bij toepassing van ongelegeerd constructiestaal alsook staal met hoge sterkte in ongeverfde toestand zal een corrosietoeslag moeten worden gegeven. Corrosiesnelheden bij atmosferische aantasting liggen in de orde van 0,05-0,12 mm/jaar (zie ook de site www.coating-online.nl).

Bij toepassing van staal in offshore constructies, scheepsbouw en waterbouwkundige constructies is direct contact met een zeewaterig milieu aanwezig. In zee atmosfeer, de spat- en de getijzone, hebben de specifieke weervaste staalsoorten met hoge sterkte in onbeschermd toestand in vergelijking met ongelegeerd staal een betere corrosievastheid. In de zone die permanent onder water zit, heeft gebruik van deze staalsoorten, wat de corrosie betreft, geen voordeel. Laaggelegeerde staalsoorten met hoge sterkte zijn in zeewater gevoeliger voor putvormige corrosie dan ongelegeerd staal en vormen diepere putten. Opgemerkt moet worden dat de staalsoorten met hoge sterkte geen weervaste eigenschappen hebben.

Evenals bij atmosferische corrosie kunnen hier organische deklagen bescherming bieden. Daarnaast kan kathodische bescherming worden toegepast, een alom verspreide techniek in de offshore industrie.

Bij gebruik van ongelegeerd constructiestaal en staal met hoge sterkte in één constructie moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid van galvanische corrosie. De corrosiesnelheid van het ongelegeerde staal kan aanmerkelijk worden verhoogd door koppeling aan een staal met hoge sterkte. Toepassing van bijvoorbeeld ongelegeerd stalen bouten in constructies van staal met hoge sterkte die niet kathodisch of anderszins beschermd zijn, kan desastreuze gevolgen hebben. Ook de lassen kunnen onedeler zijn dan het omliggende plaatmateriaal en in een daartoe geschikt milieu versneld corroderen. Bij over-kathodische bescherming kan waterstofverbrossing van de staalsoorten met hoge sterkte optreden.

Staalsoorten met hoge sterkte zijn evenals de ongelegeerde constructiestalen gevoelig voor spanningscorrosie in een aantal milieus. Factoren die de gevoeligheid hiervoor bepalen zijn naast de microstructuur onder meer de concentraties van de oplossing, de temperatuur, de pH-waarde, de corrosiepotentiaal, de sterkte en chemische samenstelling van het metaal en het dynamisch rekgedrag in de praktijk.

In vrijwel alle gevallen van spanningscorrosie is de scheurvorming gerelateerd aan niet-spanningsarmgegloeide lassen. Om de weerstand tegen spanningscorrosie extra te verhogen kan shotpeening dan wel het ultrasonic impact treatment (UIT) worden toegepast, waardoor er drukspanningen in het lasoppervlak ontstaan.

Uiteraard kan een spanningsarm gloeibehandeling ook de spanningsconcentraties verminderen. Wel moet worden nagegaan op welke temperatuur het spanningsarmgloeien mag worden doorgevoerd. Wordt de gloeibehandeling uitgevoerd bij een hogere temperatuur dan die tijdens de productie van het staal, dan worden de sterkte eigenschappen nadelig beïnvloed.

Ook tijdens de tekenkamerfase zal de constructeur eventuele scherpe overgangen, resulterend in spanningsconcentraties moeten voorkomen. De constructeur zal moeten aangeven dat de afwerking van de constructie niet in scherpe kanten mag resulteren.

Er is aangegeven dat de gebruikelijke corrosiewerende maatregelen kunnen worden genomen. Veel staal wordt echter thermisch verzinkt. Het thermisch verzinken van staalsoorten met hoge sterkte kan echter gevolgen hebben

voor de sterkte. De warmte uit het zinkbad kan namelijk de structuur van het staal beïnvloeden, waardoor de sterkte afneemt.

Hoofdstuk 4

Constructieve aspecten

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste aspecten bij het construeren in staalsoorten met hoge sterkte ten opzichte van conventioneel constructiestaal genoemd en kort toegelicht. Naast de gunstige eigenschappen heeft staal met hoge sterkte ook eigenschappen die minder gunstig zijn en speciale aandacht vragen.

4.1 Inleiding

Staalsoorten met hoge sterkte onderscheiden zich behalve qua sterkte ook in een aantal andere opzichten van de conventionele constructiestaalsoorten (met een rekgrens tot ca. 355 MPa). De voor het gedrag van constructies belangrijkste verschillen (en overeenkomsten) zijn:

- ▶ hogere sterkte, die tot uiting komt in een hogere rekgrens R_e (f_y) en treksterkte R_m (f_t);
- ▶ hogere verhouding R_e/R_m (f_y/f_t);
- ▶ dezelfde E-modulus en meestal een lagere versterkingsmodulus E_{st} ;
- ▶ een geringer verschil tussen de sterkte van het lasmetaal en het basismateriaal;
- ▶ een beperkter vermogen om plastische rekken op te nemen, zowel bij het basismateriaal als bij het lasmetaal;
- ▶ dezelfde of een slechts iets betere vermoeiingssterkte (het verband tussen $\Delta\sigma$ en N , het aantal spanningswisselingen tot bezwijken).

Dankzij de hogere sterkte kan lichter en slanker worden geconstrueerd. Dit heeft verschillende voordelen die al eerder zijn toegelicht.

De slankere constructies en de hogere spanningen in staal met hoge sterkte kunnen aanleiding geven tot het optreden van verschijnselen die bij dezelfde constructies in conventioneel staal niet of in mindere mate aan de orde zijn. Omdat de stijfheid van staal met hoge sterkte dezelfde is als van conventioneel staal ($E = 210.000$ MPa), zullen bij gelijke afmetingen de doorbuigingen bij liggers groter zijn (grotere spanningen en dus ook grotere rekken). Doorbuigingseisen zullen dus eerder maatgevend zijn, evenals instabiliteitsverschijnselen zoals plooiën en knikken. Dit zal in het vervolg van dit hoofdstuk nog verder worden toegelicht.

Ook moet eerder aandacht worden besteed aan vermoeiing, omdat bij toepassing van staal met hoge sterkte de optredende spanningsvariaties groter zullen zijn en de vermoeiingssterkte van constructies in staal met hoge sterkte slechts weinig groter is dan die van conventioneel staal. Aan deze bezwaren kan worden tegemoet gekomen door een juiste keuze van de constructievorm en vormgeving van de verbindingen. Het is de taak van de constructeur om door slim te construeren de voordelen van het staal met hoge sterkte uit te buiten. Hierbij moet de constructeur rekening houden met de specifieke materiaaleigenschappen en verwerkingsmogelijkheden van staal met hoge sterkte.

In dit hoofdstuk wordt voornamelijk gerefereerd aan civiele constructies, zoals gebouwen en bruggen, en de voor die constructies van toepassing zijnde normen. Voor andere toepassingen zoals hijskranen, drukvaten en pijpleidingen zullen de uitgangspunten veelal dezelfde zijn, hoewel de ontwerpregels anders kunnen zijn.

In dit hoofdstuk is het niet mogelijk om alle aspecten met betrekking tot het construeren uitputtend te behandelen.

Voor meer informatie wordt verwezen naar de handboeken en andere publicaties (zie de referenties in § 4.6). Geprobeerd is die aspecten te benoemen en toe te lichten die essentieel zijn en ook wetenswaard voor anderen die bij het bouwen in staal met hoge sterkte betrokken zijn.

Onderstaand worden eerst de eisen genoemd waar de constructeur rekening mee moet houden. Daarna worden voor verschillende constructieonderdelen de (constructieve) consequenties van het gebruik van staal met hoge sterkte belicht. Aan het eind van dit hoofdstuk (§ 4.6) wordt een lijst met referenties gegeven.

4.2 Eisen

Bij het ontwerpen van staalconstructies moet rekening worden gehouden met een aantal verschillende factoren zoals:

- ▶ afmetingen (overspanning, hoogte, inhoud);
- ▶ belastingen (statisch, dynamisch, vermoeiing);
- ▶ constructieve eisen;
- ▶ andere eisen.

De belangrijkste constructieve eisen zijn sterkte, stijfheid en vervormingscapaciteit:

- ▶ sterkte:
 - ◆ statische sterkte;
 - ◆ stabiliteit (weerstand tegen plooiën en uitknikken);
 - ◆ vermoeiingssterkte.
- ▶ stijfheid:
 - ◆ onder statische belasting;
 - ◆ onder dynamische belasting (trillen).
- ▶ vervormingscapaciteit, incasseringsvermogen:
 - ◆ de mogelijkheid om door herverdeling van krachten in de constructie de gevolgen van zettingen, aanrijdingen en dergelijke het hoofd te bieden;
 - ◆ weerstand tegen bros breken.

Verder moet worden voldaan aan de volgende eisen, die ook wel niet constructieve eisen worden genoemd:

- ▶ afmetingen en gewicht:
 - ◆ de constructiehoogte van liggers heeft invloed op de verdiepinghoogte van gebouwen;
 - ◆ het gewicht van tankwagens, schepen en kranen heeft invloed op de energiekosten.
- ▶ materiaalkosten en de verkrijgbaarheid van materialen.
- ▶ verwerking:
 - ◆ Het lassen van hoge sterkte staal vergt doorgaans meer aandacht, omdat door de minder grote taaierheid van het lasmetaal en het naastgelegen basismateriaal, en de hogere spanningen, strengere eisen moeten worden gesteld aan de aanvaardbaarheid van lasonvolkomenheden. De defecttolerantie is bij hoge sterkte staal dus kleiner dan bij conventionele staalsoorten.
- ▶ montage en eventuele mogelijkheden tot demontage;
- ▶ inspectie;
- ▶ onderhoud:
 - ◆ corrosiebescherming. Hoge sterkte staal is meestal wat gevoeliger voor corrosie;
 - ◆ reparatie.
- ▶ kwetsbaarheid bij onoordeelkundig gebruik:
 - ◆ bijvoorbeeld onoordeelkundig aanlassen bij gebruik.

Om constructies in hoge sterkte staal te ontwerpen zijn nog twee voorwaarden van belang:

- ▶ beschikbaarheid van rekenmodellen:
 - ◆ er moet voldoende kennis aanwezig zijn over het gedrag van constructies in de betreffende staalsoort. Deze kennis komt voort uit resultaten van internationaal onderzoek en ervaring in de praktijk.
 - ◆ voor de constructeur moet die kennis beschikbaar zijn in de vorm van rekenmodellen, waarmee de mechanische eigenschappen van de constructie en

constructieonderdelen, zoals gelaste en geboute verbindingen, kunnen worden berekend. De constructeur ontleent de benodigde rekenmodellen aan publicaties, normen en ontwerp hulpmiddelen zoals software en tabellenboeken.

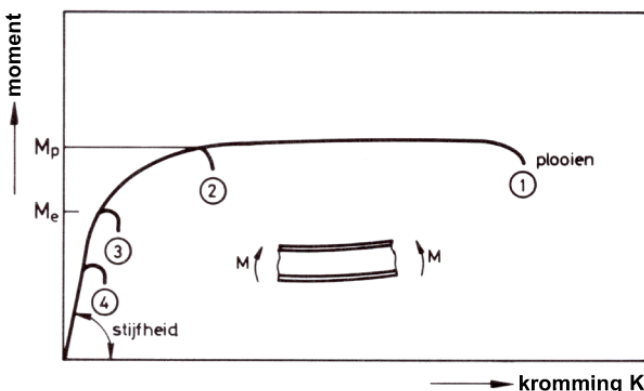
- ♦ voor staal met hoge sterkte zijn deze modellen nog in mindere mate beschikbaar dan voor de conventionele constructiestaalsoorten. Door verschillen in de materiaaleigenschappen mag namelijk niet op voorhand worden aangenomen dat dezelfde rekenmodellen als voor lagere sterkte staal ook voor staal met hogere sterkte mogen worden toegepast. In het vervolg van dit hoofdstuk wordt dit verder toegelicht.
- rekenmodellen moeten algemeen aanvaard zijn.
 - ♦ een tweede voorwaarde is dat de rekenmodellen bij de ontwerpers en de toezichhoudende instanties bekend en aanvaard moeten zijn. De mate waarin dit het geval is voor hoge sterkte staalsoorten is verschillend. Zo wordt voor staalconstructies volgens Eurocode 3 het toepassingsgebied verdeeld in twee sterktegroepen, namelijk voor materialen tot en met S460 [ref. 6, 7, 8] en worden voor staalsoorten tot en met S700 aanvullende regels gegeven in ref.[9]. Soms zijn in bepaalde landen rekenmodellen gepubliceerd die in dat land algemeen aanvaard zijn, maar niet zonder meer worden geaccepteerd in andere landen. In projecten, zoals het ontwikkelen van de Eurocodes, wordt gewerkt aan het harmoniseren van de verschillende rekenmodellen.

4.3 Statische sterkte

In deze paragraaf worden de gevolgen voor het construeren van de specifieke eigenschappen van hoge sterkte staal toegelicht bij overwegend statisch belaste liggers, drukstaven, trekstaven en verbindingen. In § 4.4 wordt aandacht besteed aan op vermoeding belaste constructies en in § 4.5 wordt kort ingegaan op de ontwikkelingen met betrekking tot de voorschriften.

4.3.1 Liggers

De sterkte, stijfheid en de vervormingscapaciteit van liggers kan worden aangegeven in moment-krommingsdiagrammen (figuur 4.1).



figuur 4.1 Moment-krommingsdiagrammen van I-vormige liggers als plooiën de bezwijkvorm is

Hierin is M_e het buigend moment waarbij in de uiterste vezels juist vloeien ontstaat en M_p het buigend moment waarbij de gehele doorsnede is gevloeid. De grootte van M_e en M_p is afhankelijk van de afmetingen van de ligger en van de grootte van de rekgrens:

$$M_e = \frac{I}{h/2} \cdot f_y = W_e \cdot f_y$$

$$M_p = W_p \cdot f_y$$

Hierin is W_e het elastisch weerstandsmoment, W_p het plastische weerstandsmoment en h de hoogte van de ligger. De grootte f_y is de gespecificeerde minimum waarde voor de vloeigrens of rekgrens.

Voor de kromming K geldt: $K = \frac{1}{R}$

Hierin is R de kromtestraal. Voor het elastisch gebied met spanningen lager dan de rekgrens geldt:

$$K = \frac{M}{EI}$$

Hierin is E de elasticiteitsmodulus ($2,1 \cdot 10^5$ MPa), I het traagheidsmoment.

Om de sterkte van de ligger te vergroten bij gelijkblijvend materiaalgebruik, kan men een grotere hoogte van de ligger kiezen. Dat betekent dat het lijf en de flenzen relatief dunner (slanker) zullen worden. Een nadeel is dat slankere doorsneden gevoeliger zijn voor het optreden van plooiën.

Bij kromme 4 (doorsnedenklasse 4) in figuur 4.1 is de slankheid zodanig, dat plooiën al optreedt bij momenten lager dan M_e .

Bij kromme 1 (doorsnedenklasse 1) is sprake van een gedrongen profiel met relatief dikwandige lijven en flenzen, waarbij plooiën pas zal optreden na grote plastische vervormingen. Dergelijke profielen hebben een grote vervormingscapaciteit.

Vervormingscapaciteit is belangrijk bij constructies waar bijvoorbeeld door zettingsverschillen van de steunpunten, de constructie wordt gedwongen om grote vervormingen te ondergaan en bij toepassing van de plasticiteitsleer.

Toepassing van de plasticiteitsleer geeft een groter draagvermogen dan toepassing van de elasticiteitsleer. Dit voordeel van de plasticiteitsleer betekent wel dat rekening moet worden gehouden met plastische vervormingen (vloeiën), bijvoorbeeld in zogenoemde plastische scharnieren. Plastische scharnieren zijn alleen mogelijk in doorsnedenklasse 1 profielen. Bij doorsnedenklasse 2, 3, en 4 profielen is het alleen toegestaan de krachtverdeling in de constructie te bepalen met de elasticiteitsleer. De vervormingscapaciteit is daarmee ook van groot belang bij de keuze van de berekeningsmethode voor de sterkte.

Naast het kiezen van slankere of minder slanke doorsneden kan de constructeur de sterkte uiteraard ook beïnvloeden door de keuze van de staalsoort. De grootheden M_e en M_p zijn lineair afhankelijk van de rekgrens.

Bij staal met hoge sterkte is de gevoeligheid voor plooiën groter dan bij lagere sterkte staal. In de TGB - Staalconstructies [3] en in Eurocode 3 [6] is deze gevoeligheid in rekening gebracht met de factor ε :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Dat wil zeggen dat men om dezelfde weerstand tegen plooiën te verkrijgen als bij toepassing van S235, de maximale breedte-dikteverhouding bij een hoge sterkte staalsoort moet reduceren met de factor ε . Dus bij toepassen van S460 en S690 met respectievelijk:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{460}} = 0,71 \quad \text{en} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{690}} = 0,58$$

Een andere factor die van belang is, is de buigstijfheid EI . Omdat E onafhankelijk is van de staalsoort, is de buigstijfheid eveneens onafhankelijk van de staalsoort. Dat betekent dat bij toepassen van hoge sterkte staal de doorbuigingen relatief groter zullen zijn. Bij een ligger op twee

steunpunten met doorsnedenklasse 3 of 4 geldt bijvoorbeeld:

$$M = \frac{1}{8} q l^2 \leq M_p = W_p \cdot f_y$$

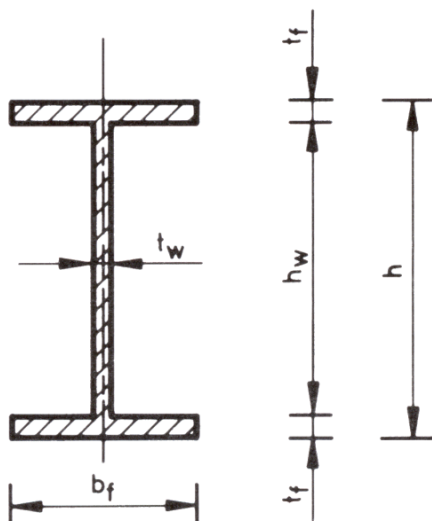
$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q l^4}{EI}$$

Het kiezen van een sterkere staalsoort geeft bij gelijke profielafmetingen een grotere waarde voor de gelijkmatig verdeelde belasting q , maar tevens een grotere doorbuiging.

Dat betekent dat bij toepassen van staal met hoge sterkte de doorbuiging eerder maatgevend zal zijn voor het ontwerp dan bij lagere sterkte staal. Daaraan kan tegemoet worden gekomen door een andere constructieve vormgeving, bijvoorbeeld door in plaats van een I-profiel een vakwerkconstructie te kiezen (zie § 4.3.4).

Het is de uitdaging en de taak van de constructeur zodanig te ontwerpen, dat door een juiste vormgeving en materiaalkeuze aan de gestelde constructieve eisen van sterkte, stijfheid en vervormingscapaciteit, enz. wordt voldaan en daarnaast ook zo optimaal mogelijk wordt voldaan aan de "niet constructieve eisen".

Een van de in de praktijk toegepaste mogelijkheden tot optimaliseren is het kiezen van staal met hoge sterkte voor de flenzen en (goedkoper) lagere sterkte staal voor het lijf (zie figuur 4.2). Daardoor zal het lijf dikwandiger worden en daarmee minder gevoelig voor plooiën. In de praktijk blijkt dat toepassen van staal met hoge sterkte vooral voordelen oplevert, als er sprake is van relatief zwaar belaste constructies. Dat zijn constructies die zwaar worden belast (grote waarde van de belastingen ten opzichte van de overspanning l). Om het buigend moment op te nemen zijn dan liggers nodig die ten opzichte van de overspanning l relatief hoog zijn. Omdat het traagheidsmoment I meer dan kwadratisch afhankelijk is van de hoogte, heeft dat een gunstige invloed op de doorbuiging. De sterkte kan dan goed worden uitgebuit.



figuur 4.2 Doorsnede I-profiel

Voor gebouwen betekent dit grote en hoge gebouwen met zware vloerbelastingen. Bij bruggen is staal met hoge sterkte vooral zinvol bij grotere overspanningen. Naarmate de overspanning groter is, zal het aandeel eigen gewicht ten opzichte van de belasting door voertuigen groter zijn. Besparing op eigen gewicht door het toepassen van staal met hoge sterkte heeft daarmee een dubbel effect.

4.3.2 Kolommen en drukstaven

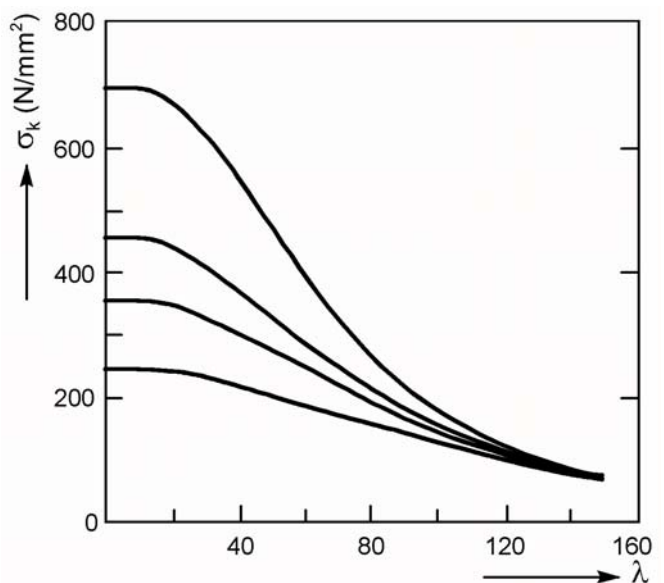
De belangrijkste factoren die bij op druk belaste staven het gedrag bepalen zijn:

- de slankheid λ ;
- de rekgrens;
- de geometrische afwijkingen zoals initiële kromming en maatafwijkingen van de doorsnede;
- de aanwezigheid van restspanningen;
- de mate waarin sprake is van een proportionaliteitsgrens;
- de mate waarin plooiën van flenzen en dergelijke optreedt, alvorens de staaf uitknikt.

In figuur 4.3 is de knikspanning gegeven volgens kromme b van Eurocode 3 als functie van de slankheid λ voor staalsoorten met $f_y = 235, 355, 460$ en 690 N/mm^2 . Voor λ geldt:

$$\lambda = \frac{l_k}{i} \quad \text{en} \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Hierin is i de traagheidsstraal, I het traagheidsmoment, A de doorsnede van de kolom en l_k de kniklengte. Bij een kolom met scharnierende einden is l_k de lengte van de kolom. Uit figuur 4.3 blijkt dat toepassen van hoge sterkte staalsoorten in drukstaven alleen zinvol is bij relatief kleine λ , dus bij gedrongen kolommen. Voor gebouwen waarbij de kolommen 2,5 ~ 3,5 meter lang zijn, betekent dit dat toepassing alleen zinvol is bij zware kolommen (grote waarde van I en i). Dergelijke kolommen impliceren grote drukkrachten. Bij gebouwen komen die bijvoorbeeld voor in hoogbouw.



figuur 4.3 Knikkrommen voor staalsoorten met verschillende rekgrens (illustratie). Voor de werkelijke waarden wordt verwezen naar de voorschriften, zoals Eurocode 3 [6, 9]

In dergelijke situaties kunnen de kolommen in de bovenste verdiepingen worden uitgevoerd in conventioneel constructiestaal, terwijl voor de kolommen in de onderste verdiepingen staal met hoge sterkte kan worden toegepast. Hierdoor kan het ontwerp zo worden gemaakt, dat de doorsnede van alle kolommen dezelfde is. Dit heeft voordelen voor de afbouwconstructies.

4.3.3 Trekstaven

De rekensterkte bij trekstaven is volgens Eurocode 3 gelijk aan het product van de doorsnede en de rekgrens gedeeld door de partiële veiligheidsfactor $\gamma_{M0}^{1)}$.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

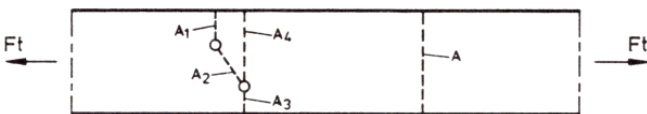
Voor γ_{M0} is in Eurocode 3 de waarde 1,0 gekozen.

Een verhoging van de rekgrens met een factor x levert bij gelijke belasting een vermindering van de doorsnede op met eveneens een factor x .

Bij de aanwezigheid van gaten (boutverbinding) dient ook de sterkte over de netto doorsnede te worden gecontroleerd. Volgens Eurocode 3 geldt:

$$N_{u,Rd} = 0,9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

Hierin is A_{net} de netto doorsnede zoals aangegeven in figuur 4.4. in de Eurocode 3 wordt voor de treksterkte het symbool f_u gebruikt. Voor de partiële veiligheidsfactor γ_{M2} is in Eurocode 3 de waarde 1,25 gegeven. De reden voor de waarde 1,25 is dat in de sterktefunctie de treksterkte is vermeld. Dit impliceert breuk als bezwijkvorm. In situaties waar breuk de bezwijkvorm is, is bewust voor een grotere veiligheid tegen bezwijken gekozen, dan waar vloeien de bezwijkvorm is (vanwege het verschil in gevolgen). Bij de beoordeling van de bruto doorsnede is vloeien de bezwijkvorm ($N_{pl,Rd}$). In dat geval is $\gamma_{M0} = 1,0$ voldoende.



figuur 4.4 Bepaling van de netto doorsnede A_{net} . A_{net} is de kleinste van $A_1 + A_2 + A_3$ en $A_3 + A_4$

In statisch onbepaalde constructies kan, door invloeden die niet expliciet in rekening zijn gebracht, de verdeling van de krachten geheel anders zijn dan berekend. Denk bijvoorbeeld aan temperatuurspanningen en ongelijkmatige zettingen van steunpunten, waardoor de constructie soms aanzienlijke plastische vervormingen moet ondergaan. Er is dan vervormingscapaciteit nodig. Deze wordt bij trekstaven bereikt als de breuksterkte over de netto doorsnede groter is dan de vloeisterkte over de bruto doorsnede. Uit de voorgaande formules volgt:

$$0,9 \cdot \frac{A_{net}}{A} \geq \frac{f_y}{f_u} \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}}$$

Doordat bij staal met hoge sterkte de verhouding f_y/f_t groter is, zal de invloed van de gatverzwakking ook groter zijn. Bij staal met hoge sterkte kan de verhouding f_y/f_t erg groot zijn en wordt het moeilijk om aan deze voorwaarde te voldoen. Omdat het in deze voorwaarde om hetzelfde materiaal gaat, waarbij verschillen in materiaaleigenschappen, zoals bij onderdelen van verbindingen die van verschillende herkomst kunnen zijn, niet optreden, is er reden om deze voorwaarde te verlichten. Volgens de TGB - Staalconstructies en Eurocode 3 geldt:

$$0,9 \cdot \frac{A_{net}}{A} \geq \frac{f_y}{f_t}$$

Bij bijvoorbeeld S355 met $f_y/f_t = 355/510 = 0,70$ volgt:

$$\frac{A_{net}}{A} \geq 0,77$$

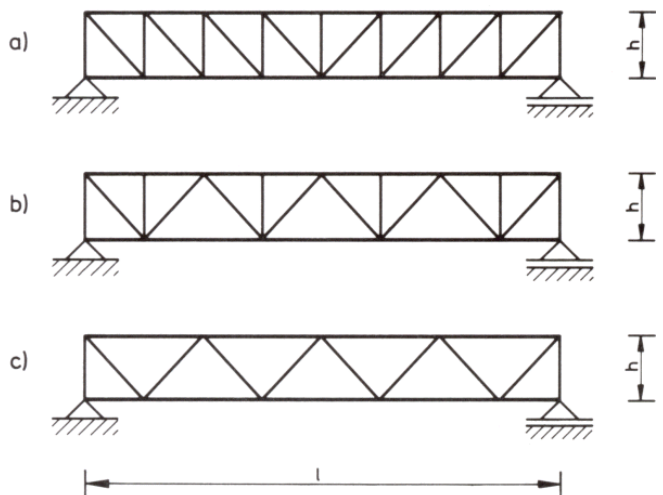
Bij staal met hoge sterkte kan de verhouding f_y/f_t oplopen tot 0,9. In dat geval mogen er volgens de genoemde voorschriften dus geen gaten aanwezig zijn om op vloeien in de bruto doorsnede te mogen rekenen. Dat betekent dat de rekenmethode moet worden aangepast (alleen elasticiteitsleer), of indien toch vervormingscapaciteit in de aangesloten staaf nodig is, een gelaste verbinding moet worden gekozen, of de doorsnede met de gaten moet worden versterkt.

Het voorgaande is één van de belangrijkste redenen waarom constructeurs aandringen op een zo laag mogelijke rekgrens- treksterkte verhouding f_y/f_t .

Een andere reden is dat de verhouding f_y/f_t één van de factoren is die de gevoeligheid voor kerfwerking bepalen (naast de taaheid van het materiaal). Dit betekent dat bij staal met hoge sterkte in het algemeen meer aandacht moet worden besteed aan de breuktaaiheid en de invloed van lasdiscontinuïteiten.

4.3.4 Vakwerkliggers

In figuur 4.5 zijn enige mogelijke schema's van vakwerkliggers gegeven.



figuur 4.5 Voorbeelden van vakwerkliggers

In § 4.3.1 is aan de orde geweest dat in liggers van staal met hoge sterkte de doorbuiging eerder maatgevend zal zijn. Een mogelijkheid om daaraan tegemoet te komen is de hoogte te vergroten, bijvoorbeeld door over te gaan op een vakwerkligger. Vakwerkliggers worden uiteraard ook bij lagere sterkte staal toegepast, maar bij hoge sterkte staal zal in verband met de doorbuigingseis eerder voor een dergelijke liggervorm worden gekozen (al bij kleinere overspanningen).

In § 4.3.2 is opgemerkt dat bij drukstaven knik eerder maatgevend zal zijn. Ook hier kan door aanpassen van de constructievorm het probleem worden verkleind. Bij de vakwerkliggers in figuur 4.5 is dat toegelicht.

De oplossing in figuur 4.5a heeft de kortste drukstaven, dit zijn de verticale staven en de staven in de bovenrand, en is daarmee het gunstigst voor wat betreft knik van de vakwerkstaven.

1) Partiële veiligheidsfactoren γ_M dienen om de juiste veiligheidsniveau's voor de sterktefunctie te bereiken. De grootte van de benodigde γ_M is afhankelijk van de grootte van de mogelijk aanwezige ongunstige afwijkingen in de factoren die de sterkte bepalen.

De oplossingen in figuur 4.5b en 4.5c hebben langere drukstaven en zijn daarmee minder gunstig voor de knikstabiliteit.

Er wordt op gewezen dat bij de keuze van de constructievorm ook andere aspecten een rol spelen, zoals aansluitingen met de gordingen (de liggers die de dakhuid dragen en die dwars op de vakwerkliggers worden gemonteerd; meestal worden de gordingen op de knooppunten van de bovenrand gemonteerd om buiging in de velden te voorkomen) en de wens om de constructiehoogte, alsmede het aantal staven en knooppunten te beperken. Zo zal de oplossing in figuur 4.5a duidelijk meer laswerk geven dan de andere oplossingen. Behalve variaties in de schemavorm, zijn er variaties mogelijk in onder meer de lengte/hoogte verhouding en het aantal velden.

Zoals eerder al is aangeduid, is construeren het maken van weloverwogen keuzes, waarbij zo goed mogelijk aan de ontwerpeisen wordt voldaan tegen zo laag mogelijke kosten.

4.3.5 Geboute verbindingen

De sterkte van geboute verbindingen wordt bepaald door de sterkte van de bouten en de sterkte van het basismateriaal. Zo zijn bij overlapte verbindingen, waarbij de krachtoverdracht door stuik en afschuiving plaatsvindt, bij staal met hoge sterkte de toelaatbare stuikspanningen groter.

Voor wat betreft de bouten zullen door de grotere krachten sterkere bouten of meer bouten nodig zijn. Sterkere bouten kunnen worden bereikt door te kiezen voor bijvoorbeeld 10.9 in plaats van 8.8 bouten, en/of te kiezen voor bouten met grotere diameter. Toepassen van ook verkrijgbare 12.9 bouten wordt in het algemeen ontraden, in het bijzonder waar naast axiale trek er ook buiging in de bouten kan optreden, zoals bij kopplaat verbindingen. Gebleken is namelijk dat 12.9 bouten weinig buigtaaiheid hebben, vooral in het draadgedeelte. In kopplaat verbindingen worden door de buiging van de kopplaten en kolomflenzen ook de bouten op buiging belast (zie figuur 4.6).

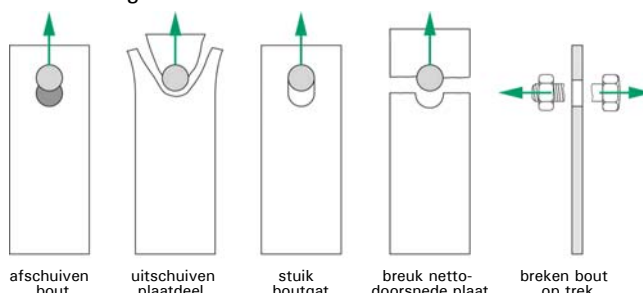


figuur 4.6 Geboute balk-kolom verbinding waarbij door buiging van de kopplaat, de bouten zowel op trek als op buiging worden belast (foto Stevin Laboratorium TU-Delft - onderzoek hoge sterkte staal)

Grotere diameter bouten geven meer gatverzwakking, dus een kleinere netto doorsnede. In dit verband wordt herinnerd aan wat in § 4.3.3 is vermeld over de netto doorsnede en de rekgrans-treksterkte verhouding.

In figuur 4.7 zijn de mogelijke bezwijkvormen in een plaat in een overlapte verbinding getoond. In de sterktefuncties

voor deze bezwijkvormen is steeds de treksterkte van het basismateriaal respectievelijk de bout de in rekening te brengen materiaaleigenschap. Dit illustreert nogmaals het belang van een zo groot mogelijke treksterkte ten opzichte van de rekgrans.



figuur 4.7 Mogelijke bezwijkvormen in een plaat in een overlapte verbinding (beeldbank: www.bouwenmetstaal.nl)

4.3.6 Gelaste verbindingen

Omdat bij staal met hoge sterkte slanker wordt geconstrueerd (dunnere platen), zal de hoeveelheid neer te smelten lasmetaal kleiner zijn. Tegenover dit voordeel staat dat de lasbaarheid van staal met hoge sterkte meestal niet zo goed is als van lagere sterkte staal. Dit betekent dat de lasuitvoering meestal meer voorzorgsmaatregelen vergt en het lastoevoegmateriaal duurder is, waardoor een deel van het voordeel teniet wordt gedaan.

De sterkte van het neergesmolten lasmetaal wordt, onder meer, bepaald door de sterkte van het toevoegmateriaal en het basismateriaal en uiteraard het toegepaste lasproces en de daarbij gebruikte lasparameters.

De sterkte van het neergesmolten lasmetaal is bij lagere sterkte staal meestal aanzienlijk hoger dan de sterkte van het basismateriaal. Bij staal met hoge sterkte is dit verschil in sterkte kleiner.

Voor de afmetingen van stompe lassen speelt het verschil in sterkte bij lasmetaal en basismateriaal geen rol. Immers, zolang de sterkte van het neergesmolten lasmetaal hoger is dan de sterkte van het basismateriaal, is de sterkte van het basismateriaal maatgevend en is er voldoende vervormingscapaciteit. Indien de sterkte van het lasmetaal lager is dan de sterkte van het basismateriaal, dient te worden nagegaan of de vervormingscapaciteit voldoende is. Indien dat niet het geval is, dan zal of voor overmatched lasmetaal moeten worden gekozen, of zal door het aanpassen van de vormgeving van de verbinding er voor moeten worden gezorgd dat aan de eis van vervormingscapaciteit wordt voldaan.

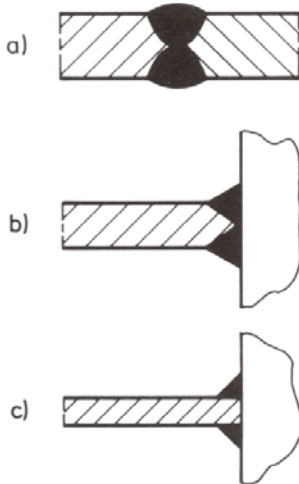
Voor hoeklassen speelt dit verschil wel een rol. In lagere sterkte staal mogen aanzienlijk dunnere hoeklassen worden toegepast dan in staal met hoge sterkte. Zie bijvoorbeeld de TGB - Staalconstructies [5] Eurocode 3 [7], Overspannend staal - Construeren A [14] en verder [10] en [17].

Bij toenemende sterkte van het staal wordt het moeilijker om aan de eis dat de sterkte van het neergesmolten lasmetaal groter moet zijn dan van het basismateriaal te voldoen en tevens een voldoende taaheid van het lasmetaal te garanderen.

Met het oog op dit laatste verdient het in bepaalde gevallen aanbeveling een toevoegmateriaal met een wat lagere sterkte te kiezen. Behalve een betere taaheid kan het niet behoeven voorverwarmen en de prijs van het toevoegmateriaal zelf een voordeel zijn. De lagere sterkte van het lasmetaal kan dan veelal worden gecompenseerd door een aangepaste vormgeving van het lasdetail c.q. grotere lasdikte.

Als wordt geëist dat de breuksterkte van de las ten minste gelijk moet zijn aan de breuksterkte van het basismateriaal, zal bij stompe lassen volgens figuur 4.8a het toepassen van een toevoegmateriaal met een lagere sterkte niet mogelijk zijn.

Bij K-lassen en hoeklassen, zoals in figuur 4.8b en c, kan door het toepassen van een grotere lasdikte worden bereikt, dat ook bij undermatched lastoevoegmateriaal de breuksterkte van de las groter is dan van de aangesloten plaat.



figuur 4.8 Stompe lassen en hoeklassen

Overmatched - Undermatched lasmetaal

In de regels voor gelaste verbindingen in staal tot en met S460 wordt in de Eurocode 3 en de TGB - Staalconstructies (en in de IIW aanbevelingen en NEN 2062) overmatched lasmetaal vereist.

In EN 1993-1-12 Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700 [9], wordt voor staalsoorten met sterkte tussen S460 en S700 onder bepaalde voorwaarden undermatched lasmetaal toegestaan. De ontwikkeling naar het openen van de mogelijkheid om undermatched lasmetaal toe te passen sluit aan bij de Amerikaanse voorschriften AWS [17] en AISC [18], waarin is aangegeven onder welke omstandigheden undermatched lasmetaal is toegestaan. Een ander voorbeeld is Zweden, waar in de nationale voorschriften al langer onder bepaalde omstandigheden undermatched lasmetaal is toegestaan.

In IIW-XV-A wordt gewerkt aan een herziening van de IIW aanbevelingen, waarbij het toepassen van undermatched lasmetaal zal worden opgenomen. Een ander onderwerp zal zijn het directer tot uiting laten komen van de sterkte van het toevoegmateriaal in de sterktefuncties, zoals in de Amerikaanse en Zweedse voorschriften.

4.3.7 Buisconstructies

Voor buisprofielen, toegepast als liggers, drukstaven, trekstaven en in vakwerkliggers, gelden bij de toepassing van staal met hoge sterkte soortgelijke overwegingen als in de voorgaande paragrafen. Voor meer informatie over buisconstructies wordt verwezen naar het boek van Wardenier [16].

4.3.8 Hijskranen

Voor hijskranen zijn verschillende normen beschikbaar (zie bijvoorbeeld www.nen.nl). In deel 3-1 van NEN-EN 13001 zijn regels gegeven voor staalconstructies in hijskranen uitgevoerd in staalsoorten tot S960 [10].

4.3.9 Transportleidingen, tanks

Het is duidelijk dat uit constructief oogpunt gezien, de toepassing van staal met hoge sterkte in tanks en transportleidingen belangrijke besparingen in het staalverbruik en dus het eigen gewicht kan opleveren. Immers, juist waar trekspanningen overheersend zijn is de besparing groot. Er is dan ook een voortgaande trend naar de toepassing van steeds hogere sterkte staalsoorten.

Waar toch drukspanningen zich voordoen, zoals bij buiging, zal door de relatief kleinere plaatdikten plooien eerder maatgevend kunnen zijn. Overigens speelt daarbij ook een rol de tendens dat de ontwerpdrukken ook hoger worden en bij offshore leidingen de waterdiepte toeneemt. Deze ontwikkelingen vergen grotere wanddiktes, waardoor het gevaar van plooien relatief kleiner wordt.

Overheersend in de ontwikkeling naar staal met hoge sterkte bij transportleidingen is de lasbaarheid. In de afgelopen decennia is daar grote vooruitgang geboekt.

4.3.10 Slotopmerkingen statische sterkte

In het voorgaande is aandacht besteed aan het constructieve gedrag van constructie(onderdelen) in staal met hoge sterkte. Daarbij is in hoofdzaak gedacht aan toepassing in staalconstructies die behoren tot het toepassingsgebied van de Eurocode 3.

Er zijn echter ook andere toepassingen, zoals de kraanbouw, waarbij staalsoorten met veel hogere sterkte worden toegepast, bijvoorbeeld S960. Ook in die toepassingen is de afgelopen jaren veel onderzoek uitgevoerd en zijn de mogelijkheden voor het (economisch) gebruik van zeer hoge sterkte staalsoorten belangrijk vergroot. Een voorbeeld daarvan is het onderzoek dat bij TNO en de TU-Delft is uitgevoerd aan hoge sterkte staal S690 en S1100 bij toepassing in de offshore industrie [25, 26, 27].

Het is in deze voorlichtingspublicatie niet mogelijk om een compleet beeld te geven van alle aspecten die bij het construeren in staal met hoge sterkte een rol spelen. Er is bewust voor gekozen om alleen de belangrijkste onderwerpen te noemen en van een toelichting te voorzien. Voor construeren is meer kennis en ervaring nodig. Voor materiaaldeskundigen en lasdeskundigen zal de inhoud een beeld geven van de consequenties die de materiaaleigenschappen van staal met hoge sterkte hebben voor het construeren in staal met hoge sterkte en waar de "behoeften" c.q. "knelpunten" liggen bij het construeren in staal met hoge sterkte.

Tenslotte wordt opgemerkt dat construeren in staal met hoge sterkte op zich niet tot bijzondere problemen aanleiding hoeft te geven. Wel is een voortdurende bezinning nodig op de vraag of de keuze van de constructievorm wel de juiste is. Bijvoorbeeld de besproken afweging volle wand ligger - vakwerkligger. Andere alternatieven zijn hybride liggers (verschillende staalsoorten in een ligger) en staal - betonliggers.

De grootste voordelen van staal met hoge sterkte kunnen worden bereikt in "zware" staalconstructies. In lichte constructies zoals eenvoudige opslagloodsen of winkelpanden voor supermarkten zijn de voordelen afwezig of gering en is de toepassing van lagere sterkte staal meer op zijn plaats. Eerder in deze voorlichtingspublicatie zijn andere criteria genoemd die de toepassing van staal met hoge sterkte aantrekkelijk kunnen maken, bijvoorbeeld gewichtsbeparing bij mobiele kranen en voertuigen.

De wel gehoorde opmerking dat staal met hoge sterkte niet interessant is, omdat de voordelen door problemen met plooien, knikken en doorbuigen niet kunnen worden

uitgebuit, zijn niet terecht. In veel situaties spelen deze bezwaren geen rol, of kan door slim construeren samen met andere betrokkenen, zoals lasdeskundigen daaraan tegemoet worden gekomen.

4.4 Vermoeiingssterkte

De vermoeiingssterkte van staal met hoge sterkte in constructies is niet of slechts weinig beter dan van constructies in conventionele staalsoorten.

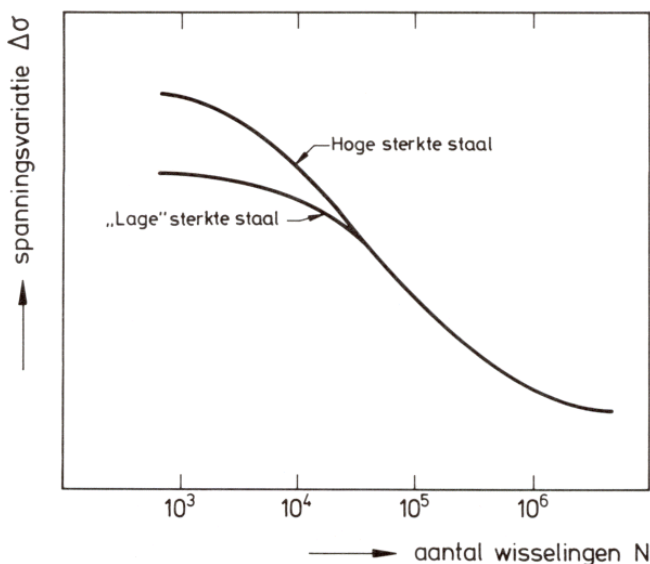
Bij gelijke belastingvarianties zullen bij constructies in staal met hoge sterkte door de geringere doorsnede de spanningsvarianties $\Delta\sigma$ uiteraard groter zijn dan bij constructies met lagere sterkte staal. Dit brengt met zich mee dat bij toepassing van staal met hoge sterkte vermoeiing eerder maatgevend zal zijn.

Onderstaand volgt eerst een korte toelichting over het gedrag bij vermoeiing. Daarna wordt kort ingegaan op maatregelen om door constructieve aanpassingen en eventuele verbeteringsmethoden de voordelen van staal met hoge sterkte ook in op vermoeiing belaste constructies optimaal te benutten.

4.4.1 Vermoeiingssterkte in het high cycle en low cycle gebied

Bij "gladde" proefstaven neemt de vermoeiingssterkte toe met de treksterkte. Bij (gelaste) constructies zullen bij geometrieovergangen spanningsconcentraties optreden - "kerfwerking". Bij "gekerfde" proefstaven neemt de vermoeiingssterkte alleen in het "low cycle fatigue" (LCF) gebied toe met de treksterkte. Dit is als het aantal wisselingen N tot bezwijken lager is dan 10^4 à 10^5 .

In het gebied met N groter dan 10^4 à 10^5 , het "high cycle fatigue" (HCF) gebied, is er voor gekerfde proefstaven nauwelijks verschil tussen lage sterkte en hoge sterkte staal (zie figuur 4.9). Praktische constructies vallen onder de categorie "gekerfde proefstaven".

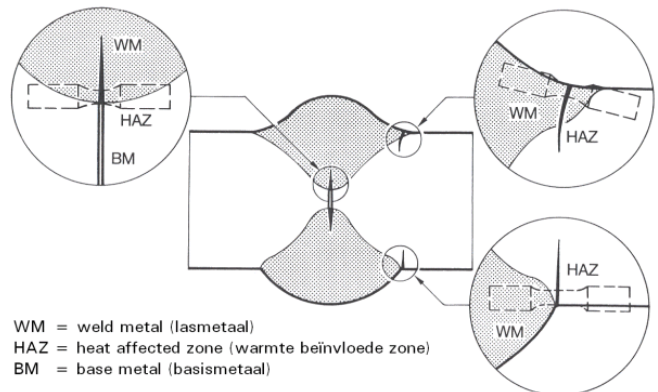


figuur 4.9 Kwalitatief beeld van de invloed van de staalsoort op het vermoeiingsgedrag bij gekerfde proefstukken

Door de grotere spanningsvarianties in vergelijkbare constructies in staal met hoge sterkte zal bij dergelijke constructies vermoeiing dus eerder maatgevend zijn.

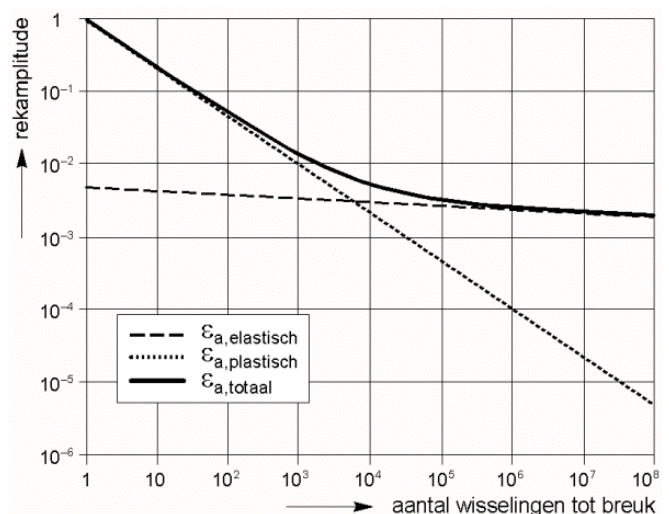
Voor high cycle fatigue leidt de toepassing van de bestaande voorschriften zoals NEN 2063 [2] en Eurocode 3 part 1-9 [8] tot een redelijke, mogelijk enigszins conservatieve afchatting van de levensduur. Er wordt opgemerkt dat er een aantal verschillen is tussen NEN 2063 en de Eurocode 3. Dit heeft te maken met de ontwikkelingen die na de introductie van NEN 2063 hebben plaatsgevonden.

Voor low cycle fatigue (LCF), is NEN 2063 niet van toepassing. Voor deze situaties wordt veelal gebruik gemaakt van de z.g. "notch strain approach". Deze methode is uitvoerig beschreven door Lawrence en anderen [28] en komt er op neer dat de levensduur van een verbinding afhankelijk wordt gesteld van de locale rekamplitude in een kerf (bijvoorbeeld een lasteen, figuur 4.10). De keuze voor rek als maatgevende parameter is gebaseerd op de plastische rekken die in kerven ontstaan door de hogere belastingen bij LCF. Dit heeft tot gevolg dat de spanningen afvlakken (vloeien) en daarmee een minder goede parameter zijn voor de beoordeling. Het hanteren van rek is dan wel eenduidig.



figuur 4.10 Low cycle benadering van Lawrence e.a. [28]

De relatie tussen de rekamplitude (ϵ_a) en de levensduur (dus de sterktekant) wordt experimenteel vastgesteld met behulp van kleine proefstukjes, die aan een rekgestuurde vermoeiingsproef worden onderworpen. Het resultaat is een rekamplitude-aantal wisselingen kromme (figuur 4.11).



figuur 4.11 Relatie rekamplitude-aantal wisselingen tot breuk

De maatgevende rekamplitude in de verbinding (dus de belastingkant) wordt bepaald door eerst een elastische spanningsanalyse uit te voeren. Met het resultaat van

deze analyse wordt met de cyclische trek-rek kromme en de toepassing van de regel van Neuber de rekamplitude bepaald. Met deze berekende rekamplitude wordt met behulp van figuur 4.11 de levensduur bepaald. Boller en Seeger [29] hebben van veel materialen LCF data verzameld.

Deze methode is ook toegepast bij recent in Nederland uitgevoerd onderzoek op hoge sterkte staal [30].

4.4.2 Construeren op vermoeiing

Bij vermoeiing is de grootte van de spanningsvariatie op de plaats waar de vermoeiingsscheur eventueel zal ontstaan maatgevend. Bij gelaste constructies zullen vermoeiingsscheuren meestal ontstaan op de overgang van het plaatmateriaal naar het lasmetaal (de lasteen), omdat daar de grootste spanningsconcentraties aanwezig zijn.

De vermoeiingslevensduur is daarom afhankelijk van de grootte van de spanningsconcentratie en daarmee van de vormgeving van het lasdetail en uiteraard de uitvoering (bijvoorbeeld al dan niet aanwezig zijn van randinkartelingen). Voor meer informatie over de invloed van de verschillende factoren die de vermoeiingslevensduur beïnvloeden en de wijze waarop de vermoeiingslevensduur kan worden verbeterd, wordt verwezen naar Overspannend staal - Construeren B [15], de verschillende voorschriften [2, 8] en naar de IIV richtlijnen [19].

Keuze beter lasdetail

Door bij maatgevende details te kiezen voor een vermoeiingstechnisch beter ontwerp, bijvoorbeeld een stompe las in plaats van een hoeklas, of door de vormgeving van de verbinding als geheel te wijzigen, kan de vermoeiingslevensduur worden verbeterd. Met het begrip beter ontwerp of beter lasdetail wordt bedoeld een vormgeving met een lagere spanningsconcentratiefactor, waardoor de lokale spanningsvariëaties worden verkleind.

Keuze beter lasdetail en toepassen lasteenverbetering

Verbetering van de vermoeiingslevensduur is ook mogelijk door het verminderen van de spanningsconcentratie door verbeteren van de lasteen, bijvoorbeeld door slijpen. Ook andere technieken als "TIG-dressing" kunnen worden toegepast.

Verlagen van de restspanningen

Bij gelaste constructies zullen door verhinderde laskrimp bij afkoelen van het smeltbad rest-trekspanningen aan het oppervlak aanwezig zijn. Meestal moet er van uit worden gegaan, dat aan de lasteen de rest-trekspanningen gelijk zijn aan de rekgrens.

Door deze rest-trekspanningen te verlagen of eventueel om te zetten naar rest-drukspanningen, kan de vermoeiingslevensduur worden verbeterd. De mate waarin dit

mogelijk is, hangt af van de R-waarde, dat wil zeggen de verhouding tussen de laagste spanning en de hoogste spanning in de spanningsvariatie.

Bepalend is namelijk wat het materiaal op de plaats waar de scheur eventueel zal ontstaan "voelt". Het gedeelte van de spanningsvariatie dat zich in het drukgebied bevindt, is namelijk vrijwel niet beschadigend.

Bijvoorbeeld, als de spanning varieert tussen -120 en $+200$ MPa, is de $\Delta\sigma = 320$ MPa. In de "as welded" toestand bij bijvoorbeeld S460 moet er van worden uitgegaan dat het materiaal een spanningsvariatie voelt tussen 140 en 460 MPa (restspanning gelijk aan 460 MPa en $\Delta\sigma = 320$ MPa). Indien de restspanningen afwezig zijn, is alleen het gedeelte van de spanning tussen 0 en 200 MPa beschadigend en is de "effectieve" $\Delta\sigma$ gelijk aan 200 MPa.

Bij het inbrengen van rest-drukspanning tot bijvoorbeeld -300 MPa zal de "effectieve" $\Delta\sigma$ slechts 20 MPa zijn (de spanningen variëren tussen -300 en $+20$ MPa).

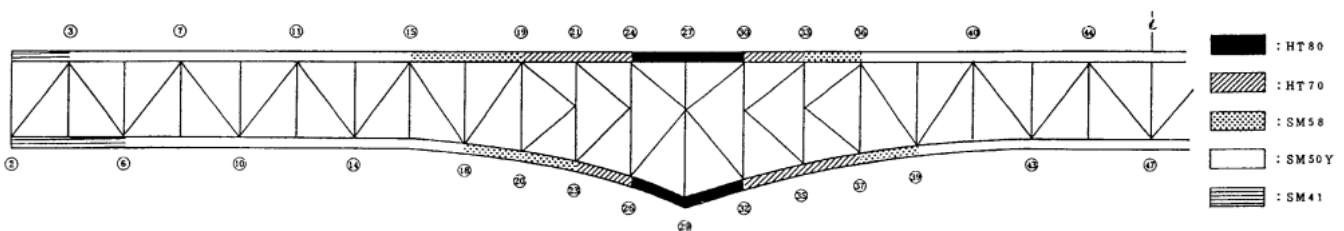
Verlagen van de restspanningen met bijvoorbeeld Ultrasonic Impact Treatment (UIT) geeft het meeste effect bij relatief lage $\Delta\sigma$, dus in het gebied met de grote aantallen wisselingen [21]. Er zijn proefresultaten bekend, waarbij de scheur niet bij de las, maar ergens in de plaat op een duidelijke afstand van de las optrad. Voor meer informatie wordt verwezen naar [ref. 21], de voorschriften [8], de IIV richtlijnen [19, 20] en www.appliedultrasonics.com.

Er wordt op gewezen dat bij een statisch onbepaalde constructie de werkelijke spanning aanzienlijk kan afwijken van de spanning die volgt uit een spanningsanalyse. Deze afwijkingen kunnen ontstaan door o.a. fabricagetoleranties of zettingen tijdens de levensduur. In de NEN 2063 wordt daarom geen reductie van de nominale spanningswisseling toegestaan.

Toepassen van hoge sterkte staal bij een grote statische component in de spanningen

In op vermoeiing belaste constructies zijn vaak grote delen onderworpen aan een relatief grote statische belasting. Voorbeelden zijn bruggen met grote overspanningen, waar in de constructiedelen dicht bij de opleggingen de spanningen overwegend statisch zijn. In dergelijke gevallen kan het aantrekkelijk zijn voor die delen, staal met hoge sterkte toe te passen en voor de delen dicht bij de rijvloer, die relatief zwaar op vermoeiing worden belast, een lagere sterkte staalsoort.

Bij de brug in figuur 4.11 zijn al naar gelang de aard van de belastingen (de verhouding tussen de rustende belasting en de veranderlijke belasting) staalsoorten met verschillende sterkte toegepast. De japanse staalsoorten HT80, HT70, SM58, SM50Y, SM41 hebben een SMTS van ongeveer 800, 700, 580, 500, en 410 MPa.



SM 41 SM50Y SM58 HT70 HT80 HT70 SM58 SM50Y

figuur 4.11 Yojima Bashi Bridge in Japan, waar voor verschillende onderdelen al naar gelang de verhouding tussen de statische belasting en de vermoeiingsbelasting staalsoorten van verschillende sterkte zijn toegepast

4.5 *Ontwikkelingen met betrekking tot Eurocode 3*

Vanaf het begin van de jaren tachtig is in Europees verband gewerkt aan de harmonisering van de voorschriften voor bouwconstructies. De voorschriften voor het berekenen van staalconstructies zijn weergegeven in Eurocode 3. In het begin van de jaren 1990 is Eurocode 3 gepubliceerd als Europese Voornorm (ENV) met het doel er ervaring mee op te doen.

In Nederland heeft de herziening van de TGB - Staalconstructies parallel gelopen aan de ontwikkeling van de ENV versie van de Eurocode 3. Hierdoor sluiten de Nederlandse staalvoorschriften (NEN 6770 serie) goed aan bij die van de Eurocode 3. Dit betekent dat bij de verplichte invoering van de Eurocodes over enkele jaren en de daarbij behorende intrekking van de nationale voorschriften mag worden verwacht dat dit in Nederland relatief weinig problemen zal geven.

Eind jaren 1990 is begonnen met het omzetten van de ENV's naar Europese normen (EN). In 2006 zijn de eerste delen van de nieuwe Eurocode 3 gepubliceerd. Ten opzichte van de ENV versie is de structuur aangepast.

In EN 1993-1-1 t/m EN 1993-1-12 zijn zogenoemde generieke regels gegeven en in EN 1993-2 t/m EN 1993-6 regels die meer toepassingsgericht zijn. De meeste van deze delen bevatten afzonderlijke subdelen. Zo bevat EN 1993-4 de delen EN 1993-4-1, EN 1993-4-2 en EN 1993-4-3 voor respectievelijk silo's, tanks en pijpleidingen.

Dank zij het uitgevoerde onderzoek naar constructies in hoge sterkte staal, is besloten om het toepassingsgebied van de regels in de "standaard" delen 1993-1-1 en volgende uit te breiden van S355 naar S460.

Voor staalsoorten met hoge sterkte zijn in EN 1993-1-12, Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700, regels gegeven voor staalsoorten tot een gespecificeerde minimum rekgrens van 700 MPa [9]. Het belangrijkste verschil met de regels voor staalsoorten tot en met S460 is, dat bij de berekening alleen gebruik mag worden gemaakt van de elasticiteitsleer. Dat wil zeggen dat er nog onvoldoende kennis aanwezig is om de voor het toepassen van de plasticiteitsleer noodzakelijke voorwaarden voor de vervormingscapaciteit (rotatiecapaciteit) te kunnen formuleren.

Op veel plaatsen wordt onderzoek uitgevoerd om de ontbrekende kennis te verkrijgen en die t.z.t. in een herziening van EN 1993-1-12 beschikbaar te kunnen stellen. Voor meer informatie over de nieuwe Eurocodes wordt verwezen naar [17] en de website van NEN (www.nen.nl).

4.6 *Referenties*

- [1] NEN 2062 (1977). Booglassen. Het berekenen van gelaste verbindingen in ongelegeerd en zwakgelegeerd staal tot en met Fe 510 (Fe 52) die overwegend statisch worden belast.
- [2] NEN 2063 (1988). Booglassen. Op vermoeiing belaste constructies. Het berekenen van gelaste verbindingen in ongelegeerd staal en zwakgelegeerd staal tot en met Fe 510 (Fe 52).
- [3] NEN 6770. Technische grondslagen voor bouwconstructies TGB 1990 - Staalconstructies - Basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies.
- [4] NEN 6771. Technische grondslagen voor bouwconstructies TGB 1990 - Staalconstructies - Stabiliteit.
- [5] NEN 6772. Technische grondslagen voor bouwconstructies TGB 1990 - Staalconstructies - Verbindingen.
- [6] EN 1993-1-1: 2005, Eurocode 3, Design of Steel Structures: General rules and rules for buildings.
- [7] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3, Design of Steel Structures - Design of joints.
- [8] EN 1993-1-9: 2005, Eurocode 3, Design of Steel Structures - Fatigue.
- [9] EN 1993-1-12: 2007, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700.
- [10] EN 1993-6: 2007, Eurocode 3, Design of Steel Structures - Crane supporting structures.
- [11] NEN-EN 13001, Crane Safety General design, January 2005. Deze norm bevat verschillende delen, waaronder NPR-CEN/TS 13001-3-1: Cranes General design - Part 3-1: Limit states and proof of competence of steel structures, 2005.
- [12] NEN 3650. Eisen voor buisleidingsystemen. Nederlands Normalisatie-instituut, 2003.
- [13] Overspannend Staal - Basisboek. 2004, ISBN 90-72830-45-8. Bouwen Met Staal, Zoetermeer.
- [14] Overspannend Staal - Construeren A. 2001, ISBN 90-72830-36-9. Bouwen Met Staal, Zoetermeer.
- [15] Overspannend Staal - Construeren B. 1996, ISBN 90-72830-12-1. Bouwen Met Staal, Zoetermeer.
- [16] Wardenier J., Hollow sections in Structural Applications, 2002, ISBN 978-90-72830-39-5, Bouwen Met Staal, www.bouwenmetstaal.nl, Zoetermeer.
- [17] American Welding Society, Structural Welding Code - Steel, AWS D1.1, Miami, USA.
- [18] Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, ANSI/AISC 360-05, March 9, 2005. Deze "specification" en andere AISC "specifications" en publicaties kunnen worden gedownload van <http://www.aisc.org/>.
- [19] IIW - Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document XIII-2151-07 / XV-1254-07, IIW Commissions XIII and XV, A. Hobbacher, chairman. May 2007.
- [20] IIW - Recommendation on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures, P.J. Haagenzen and S.J. Maddox, IIW Doc. XIII-1815-00, revised August 2006.
- [21] Kuhlmann, U.; Dürr, A.; Günther, H.-P.: Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit höherfester Baustähle durch Anwendung der UIT-Nachbehandlung. Stahlbau 75 (2006) Nr. 11, S. 930-939.
- [22] Gresnigt, A.M. Ontwerp en berekening van gelaste verbindingen met de nieuwe Eurocode 3, te publiceren in Lastechniek, voorjaar 2009.
- [23] Gresnigt A.M. Update on design rules for fillet welds. 3rd European Conference on Steel Structures, September 19-20, 2002, Coimbra, Portugal.
- [24] Gresnigt, A.M., Calculation of fillet welds in Eurocode No. 3. Rivista Italiana della Saldatura, 1990, no 6, pp. 591-598.
- [25] Dijkstra, O.D., Wortel, J. van, Kolstein, M.H.: Integrity High Strength Steel Structures - Summary report, TNO report, 2005-BCS-R0470.
- [26] Dijkstra, O.D., Kolstein, M.H.: Numerical modelling of under matched welded high strength steel connections. Proceedings of the international conference in metal structures, Poiana Brasov, Romania, September 20-22, 2006.
- [27] Kolstein, M.H., Bijlaard, F.S.K., Dijkstra, O.D.: Integrity of welded joints made of steel grades S690 and S1100. Proceedings of the international conference in metal structures, Poiana Brasov, Romania, September 20-22, 2006.
- [28] Mattos, R.J. and Lawrence, F.V. "Estimation of the Fatigue Crack Initiation Life in Welds Using Low Cycle Fatigue concepts", SAE SP-424, Warrendale Pa, Sae, 1977.
- [29] Boller, Chr. and Seeger, T. "Materials data for cyclic loading" Elsevier, 1987.
- [30] Kolstein, H.M and Dijkstra, O.D., "Integrity of High Strength Steel Structures - Analysis of the experiments", Stevin report 6-05-07, March 2006.

Hoofdstuk 5

Fabricage aspecten

Om een constructie te kunnen maken, moeten platen dikwijls worden gebogen of vervormd. Hiertoe heeft men 2 mogelijkheden nl. warm- en koudvervormen. Warmvervormen vindt plaats bij temperaturen boven de rekristallisatietemperatuur (ca. 700 °C) en koudvervormen bij kamertemperatuur of iets verhoogde temperatuur. Op de mogelijkheden en beperkingen van warm- en koudvervormen van de staalsoorten met hoge sterkte wordt ingegaan.

Ook worden de diverse onderdelen van een constructie door middel van lassen met elkaar verbonden. Daar lassen in feite het geven van een warmtebehandeling is aan het staal, waardoor de eigenschappen kunnen worden beïnvloed, is aan het lassen van staalkwaliteiten met hoge sterkte een apart hoofdstuk gewijd.

5.1 Warmvervormen

Platen met een grote wanddikte worden bij voorkeur warm gebogen, omdat bij een toenemende temperatuur de vervormingsweerstand afneemt. Warmvervormen biedt de mogelijkheid een grote hoeveelheid plastische deformatie aan te brengen, zonder dat uitermate hoge krachten zijn vereist. De mate waarin warmvervormen mogelijk is voor de verschillende staalkwaliteiten met hoge sterkte, is totaal verschillend.

Normaalgegleide kwaliteiten zijn in principe geschikt voor warmvervorming. De eindtemperatuur van de vervorming ligt, naar gelang het type, tussen 780 en 980 °C. Bij lagere temperaturen moet het materiaal opnieuw worden normaalgegleid.

Het aansluitend aan het warmvervormen opnieuw normaal gloeien brengt extra kosten met zich mee. Vandaar dat de warmvervorming zodanig moet worden uitgevoerd, dat men tijdens de warmvervorming niet onder de grens van 780 °C komt.

Een andere parameter die van belang is voor de korrelgroeï is de opwarm- en afkoelsnelheid bij het warmvervormen. Onderzoeken hebben aangetoond dat een afkoelsnelheid van 120 °C/uur tot een beter behoud van sterkte en taaieigenschappen leidt dan een langzamere afkoelsnelheid van 60 °C/uur. De mate van achteruitgang van sterkte en taaieigenschappen is tevens afhankelijk van de leveringstoestand en de chemische samenstelling van het uitgangsmateriaal.

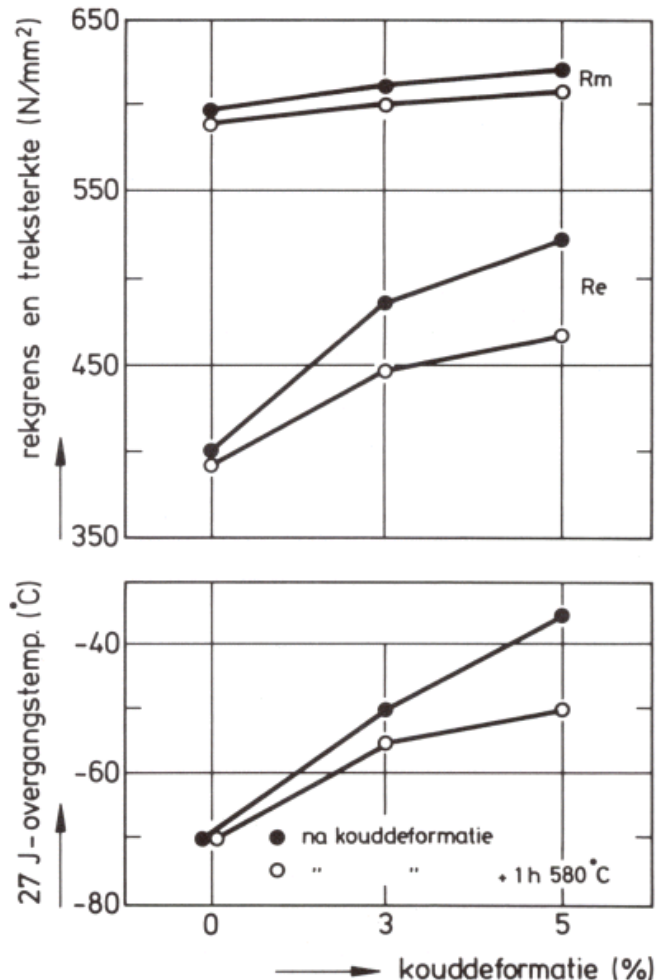
Warmvervormen is niet mogelijk voor thermo-mechanisch behandelde en versneld gekoelde staalkwaliteiten zonder een ernstige verslechtering van de overgangstemperatuur, de kerftaaieigenschappen, de rekgrens en de treksterkte. Moet toch worden warmvervormd, dan is de maximaal toelaatbare temperatuur 550 °C.

Veredelde staalkwaliteiten gaan na warmvervormen in sterkte en taaieigenschappen sterk achteruit. De mechanische eigenschappen kunnen weer worden verbeterd door het staal opnieuw te veredelen, wat in de praktijk echter meestal niet mogelijk is.

Warmvervormen is dus alleen mogelijk bij normaalgegleid staal. Verschillende charges normaalgegleid staal, geleverd volgens dezelfde norm en met overeenkomstige chemische samenstelling, kunnen echter sterk verschillen in mechanisch gedrag na warmvervormen, hetgeen mede afhankelijk is van de piektemperatuur en de opwarm- en afkoelsnelheid bij de warmvervorming.

5.2 Koudvervormen

Vormgeving bij temperaturen onder de rekristallisatietemperatuur wordt koudvervorming genoemd. In de praktijk zal koudvervormen altijd plaatsvinden bij temperaturen beneden de spanningsarmgloeitemperatuur, omdat anders een ontoelaatbare achteruitgang in eigenschappen ontstaat. Bij koudvervormen kunnen twee aspecten een rol spelen, namelijk de achteruitgang in taaieigenschappen en de verkleining van het verschil tussen rekgrens en treksterkte (zie figuur 5.1).



figuur 5.1 De invloed van koudvervorming en spanningsarmgloeien bij staal S355

De achteruitgang in kerftaaieigenschappen wordt geweten aan rekveroudering, veroorzaakt door aanwezige vrije stikstof in combinatie met trekspanningen. Echter, de moderne staalsoorten, bereid volgens het oxytaalproces, bevatten veel minder stikstof dan de staalsoorten vervaardigd volgens oude procédés.

Bovendien worden, zeker voor de staalsoorten met hoge sterkte, stikstofbindende elementen als aluminium, titaan of niobium toegevoegd. Vandaar dat de hedendaagse micro- en laaggelegeerde fijnkorrelstaalsoorten minder gevoelig zijn voor achteruitgang in kerftaaieigenschappen na koudvervorming dan vroeger het geval was.

In de praktijk wordt veelal geëist aan te tonen dat koude deformatie geen problemen geeft. Sommige specificaties schrijven daarom zelfs een verouderingsproef voor: doorvoeren van een koude deformatie van 5%, gevolgd door gloeien gedurende 2 uur op 250 °C, gevolgd door een kerftaaieigenschappenonderzoek.

Koudvervormen leidt tot een sterkere stijging van de rekgrens dan van de treksterkte. Hierdoor neemt de verhouding rekgrens/treksterkte toe.

In de leveringstoestand hebben de staalsoorten met hoge sterkte al een rekgrens/treksterkte verhouding die hoger is dan de conventioneel constructiestaalsoorten. Na enige koude deformatie wordt deze verhouding nog hoger. Dit heeft tot gevolg dat de staalkwaliteiten S690, S890, S960 en S1100 al na 2 tot 5% koude deformatie een rekgrens/treksterkte verhouding hebben die 1 benadert. De kerftaaiheid wordt echter niet nadelig beïnvloed.

Normaalgeglode staalsoorten met een gegarandeerde rekgrens van 355 MPa overschrijden de rekgrens/treksterkte verhouding van 0,9 pas boven 7% deformatie. Spanningsarmgloeien na koude deformatie brengt deze verhouding veelal weer terug tot beneden 0,85. Overigens kan na zeer kleine deformatiegraden (kleiner dan ca. 1%) achteruitgang van sterkte (R_e en R_m) worden geconstateerd, indien het materiaal wordt gerekt in de richting tegenovergesteld aan de oorspronkelijke deformatierichting. Dit is ten gevolge van het zogenaamde Bauschinger effect.

Uit onderzoek is gebleken dat de achteruitgang van de rekgrens na 1% koude deformatie bij S460, normaalgeglod of veredeld, ca. 20 - 30 N/mm² bedraagt, bij S355 is de achteruitgang ca. 15 - 20 N/mm² en bij S275 blijft de vermindering van de rekgrens beperkt tot beneden 8 N/mm².

Bij koudvervormen van moderne constructiestaalsoorten zijn weinig problemen ten aanzien van de afname van de ductiliteit te verwachten. Het is echter nog niet duidelijk wat het gevolg is van deze afname na slechts enkele procenten deformatie van staalsoorten waarvan de rekgrens/treksterkte verhouding de 1 benadert; zeker wanneer hieraan nog gelast moet worden.

Bij het lassen van koudvervormd materiaal bestaat het risico op zachte zones naast de las, zodat dit probleem zeker aandacht verdient. In de veredelde staalsoorten is na lassen altijd lokaal een zachte zone naast de las aanwezig. Deze dip in hardheid wordt met toenemende rekgrens groter. Spanningsarmgloeien na koudvervorming werkt verbeterend. Er is echter nog weinig bekend over het gedrag van gedeformeerd materiaal. In elk geval voldoet koudgebogen staal met hoge sterkte zonder een spanningsarmgloeibehandeling al snel niet meer aan Eurocode 3, waarin wordt uitgegaan van een maximale rekgrens/treksterkte verhouding van 0,83%.

5.3 *Snijden*

Bij zorgvuldige uitvoering is thermisch snijden, zoals het autogeen snijden, het plamasnijden en het lasersnijden van de meeste staalkwaliteiten met hoge sterkte goed mogelijk. Wel wordt aanbevolen bij buitentemperaturen onder +5 °C het materiaal bij het snijden voor te warmen. Voor het voorwarmen van platen, teneinde koudscheuren te vermijden, gelden in het algemeen dezelfde richtlijnen als bij het lassen. Hierop wordt in hoofdstuk 6 dieper ingegaan. De snijkanten moeten vrij zijn van scheuren en van snijresten, roest en dergelijke, voordat gelast kan worden. Het verdient aanbeveling de snijkanten na te slijpen.

Als onder water plasmagesneden wordt, moeten de snijkanten altijd worden nageslepen. Ten gevolge van dit thermische snijproces zal zeker waterstof worden opgenomen in de snijzone, dat dan later tot koudscheuren kan leiden.

Bij het waterstraalsnijden is voorwarmen niet nodig, omdat dit geen thermisch snijproces is.

Hoofdstuk 6

Het lassen van staalsoorten met hoge sterkte

6.1 Inleiding

De moderne constructiestalen met hoge sterkte kunnen met alle gebruikelijke lasprocessen worden gelast. In de praktijk worden meestal het handlassen met beklede elektroden, het MAG-lassen met zowel massieve, als ook gevulde draad en het onder poeder lassen toegepast. Minder gebruikelijk is het TIG-lassen, hoewel dit voor het lassen van grondnaden in pijpen gebruikt kan worden.

Voor grote materiaaldikten zou ook het elektroslak-, als ook het elektrogaslassen in aanmerking kunnen komen. Door de grote hoeveelheid ingebrachte laswarmte leidt dit echter tot een onacceptabele achteruitgang van de mechanische eigenschappen in de door de laswarmte beïnvloede zone.

Veelal wordt geëist dat de lasverbinding sterkte en taaiheidseigenschappen bezit die overeenkomen met het basismateriaal. Daardoor moet voor het lassen van de staalsoorten met hoge sterkte bijna altijd een speciaal voor dit doel ontwikkeld toevoegmateriaal worden gebruikt. Voor de verschillende lasprocessen en staalsoorten staat een ruime keuze ter beschikking.

6.2 Lastoevoegmaterialen

6.2.1 Beklede elektroden

Voor het lassen van staalsoorten met hoge sterkte worden in de praktijk alleen basische elektroden gebruikt. Bij de aanleg van bijvoorbeeld gastransportleidingen worden ook cellulose-elektroden gebruikt voor het lassen van de rondnaden in pijpleidingen. Deze blijven hier echter buiten beschouwing.

Basische elektroden bezitten een bekleding, waarmee een lasmetaal met een laag zuurstof- en waterstofgehalte wordt verkregen. Hierdoor bezit het lasmetaal goede taaiheidseigenschappen en is het, bij een goede lasuitvoering, vrij van poreusheid of andere defecten.

Basische elektroden voor het lassen van de staalsoorten met hoge sterkte zijn verkrijgbaar in een groot aantal varianten, zowel voor wat betreft de laseigenschappen, als ook de mechanische eigenschappen van het lasmetaal. De voor de praktijk belangrijkste eigenschappen zijn vastgelegd in verschillende normen, zoals de Europese normen EN 499 en EN 755, als ook de Amerikaanse norm ASME SFA 5.5.

Basische elektroden voor het lassen van de conventionele constructiestalen bevatten alleen mangaan en silicium als legeringselementen. Deze worden ook wel "onlegeerde elektroden" genoemd. Zij leveren een lasmetaal met een zodanig hoge rekgrens, ca. 420 MPa, dat de toepassing niet beperkt hoeft te blijven tot het lassen van ongelegeerd constructiestaal alleen.

Moderne ongelegeerde basische elektroden leveren een lasmetaal op met kerftaaiheden tot $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Het mangaangehalte (1,5 - 2%) en het koolstofgehalte leveren een hoog gehalte aan het zogenaamde aciculaire ferriet in het lasmetaal op. Dit als zowel met dunne snoeren, als ook zwaaiend wordt gelast. Aciculaire ferriet is een zeer fijnkorrelige ferritische fase, die bij de afkoeling uit de oorspronkelijke austeniet kan ontstaan.

De eisen die de offshore-industrie stelt aan de ductiliteit van het lasmetaal, CTOD waarden bij $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en kerfslagwaarden bij $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, zijn voor de elektroden op alleen koolstof-mangaan basis te hoog. Nikkel verhoogt de ductiliteit van de ferritische fase bij lagere temperatuur, zonder al te veel invloed op de sterkte van het lasmetaal. Echter, nikkelpercentages boven 3% maken het lasmetaal warm-scheurgevoelig. Bovendien moet een eventueel spanningsarmgloeien bij een lagere temperatuur worden uitgevoerd om verbrossing te voorkomen. Tevens maakt nikkel het lasmetaal gevoelig voor bepaalde vormen van corrosieve aantasting, bijvoorbeeld in H_2S milieu.

Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van elektroden met maximaal 1% nikkel en een aangepast mangaangehalte. De rekgrens en treksterkte van dit type lasmetaal liggen wat hoger dan die van de ongelegeerde elektroden (ongeveer 20 MPa), de kerfslagwaarden zijn nog zeer goed tot $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Daar de rekgrens en de treksterkte van dit type lasmetaal slechts weinig hoger zijn dan van de ongelegeerde typen, wordt dit soort elektroden ingezet voor staalsoorten met een rekgrens tot 420 MPa. Het nikkelgehalte is nog zo laag, dat het lasmetaal niet zeer gevoelig is voor H_2S -corrosie. Ook een spanningsarmgloeibehandeling heeft nog geen sterke nadelige invloed.

Naast nikkel kunnen voor een hogere sterkte en/of hogere taaiheid nog andere legeringselementen, zoals chroom en molybdeen worden toegevoegd. Ook microlegeringselementen zoals titaan en borium vinden toepassing. Het gehalte aan schadelijke verontreinigingen, vooral zwavel en fosfor, dient altijd te worden beperkt. Indien dit niet het geval is, kan het lasmetaal gevoelig worden voor warm-scheurvorming, een te lage ductiliteit bezitten of eventueel verbrossen bij een gloeibehandeling.

Voor de staalsoorten met hoge sterkte met een rekgrens boven 460 MPa worden elektroden gebruikt met een hoger nikkelgehalte of een combinatie van legeringselementen zoals nikkel, chroom en molybdeen.

Elektroden met een hoger nikkelgehalte (2,5 tot maximaal 3,5% in verband met de toenemende warm-scheurgevoeligheid van het lasmetaal) kunnen worden gebruikt voor staalsoorten met een rekgrens tot 460 MPa. In de praktijk worden zij echter alleen gebruikt voor staalsoorten waarvan hoge kerftaaiheidseisen worden gesteld, zoals bijvoorbeeld bij -80 respectievelijk $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Voor het lassen van staalsoorten met een rekgrens van 460 MPa kunnen beter elektroden worden gebruikt die naast een 0,5 tot 1% nikkel, nog 0,3 tot 0,6% molybdeen bevatten. Hierdoor is het lasmetaal beduidend minder gevoelig voor warm-scheuren en voor verbrossing na spanningsarmgloeien.

In Japan wordt het gebruik van titaan- en boriumhoudende microlegeerde elektroden gepropageerd. Deze elementen bevorderen de vorming van het aciculaire ferriet in het lasmetaal, met een verhoging van de ductiliteit als gevolg. Het stikstofgehalte moet echter beperkt blijven, zodat moet worden gelast met een zeer korte booglengthe. Dit lasmetaal bezit, zelfs na spanningsarmgloeien, een relatief hoge rekgrens en treksterkte, die bij normaliserend gloeien verloren gaan.

Moet na het lassen een normaal gloeibehandeling worden toegepast, dan moet een aangepast toevoegmateriaal worden ingezet.

Er is kans op een aanzienlijk verschil in kerftaaiheid tussen de grondlaag (root-area) en het oppervlak van een in meergelagen gelegde las in een dikke plaat. De kerftaaiheid kan in de grondlaag namelijk aanzienlijk lager zijn dan in de sluitlaag van de las. Dit als gevolg van de gecombineerde inwerking van de laswarmte van de op de grondnaad vol-

gende laslagen en de vervorming ervan door de optreden- de krimp (rekveroudering).

Om deze veroudering in de praktijk op te vangen kan, nadat een aanzienlijk deel van de verbindingen is afgelast, de grondnaad worden uitgegutst en tegengelast. Ook kan een ander type elektrode voor de grondnaad worden ge- bruikt dan voor het afvullen van de lasnaad.

Bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte is het waterstofgehalte van het lasmetaal zeer belangrijk. Water- stof kan namelijk aanleiding zijn tot het ontstaan van koud- scheuren. Hierop wordt in bijlage A dieper ingegaan.

Momenteel worden hoofdzakelijk vacuümverpakte basische elektroden gebruikt. Deze elektroden hebben een gegaran- deerd gehalte aan diffundeerbare waterstof dat minder dan 3 ml per 100 gram lasmetaal bedraagt. Dit is mogelijk ge- worden door een uitgekiende en speciale productiemethode van de elektroden, alsook een vochtdichte vacuüm- verpakking. Bovendien neemt de bekleding van deze elek- troden veel minder snel vocht uit de atmosfeer op, zeker als de elektroden pas vlak voor het verlassen uit de ver- pakking worden gehaald. Toepassing van dit type geeft een extra zekerheid in de praktijk.

6.2.2 *MAG-lassen*

Voor het MAG-lassen van staalsoorten met hoge sterkte kunnen zowel massieve als gevulde draden worden gebruikt. De standaard ongelegeerde massieve draden, zoals toege- past voor de ongelegeerde staalsoorten, leveren een las- metaal op met een zodanige sterkte, dat zij ook voor de staalsoorten met een rekgrens tot en met 420 MPa kun- nen worden gebruikt. Er moet een argonrijk beschermgas worden toegepast, omdat daarmee de hoogste taatheid van het lasmetaal wordt verkregen. Dit doordat de afbrand aan legeringselementen bij gebruik van menggasen op ba- sis van argon geringer is dan bij een puur CO₂-beschermgas. Er bestaan ook massieve draden met nikkel en molybdeen ter verkrijging van een hogere sterkte van het lasmetaal.

Het toepassen van gevulde draden bij het MAG-lassen van staalsoorten met hoge sterkte groeit. Voordelen zijn onder andere een gemakkelijke lasbaarheid, ook bij lassen in positie, en zeer goede mechanische eigenschappen van het lasmetaal. Als bijkomend voordeel kan nog de hogere neersmeltsnelheid worden genoemd. Bovendien zijn de gevulde draden ook met een laag waterstofgehalte (min- der dan 5 ml waterstof per 100 gram neergesmolten las- metaal) verkrijgbaar.

Twee typen gevulde draden komen in aanmerking, name- lijk met een basische- en een rutielvlak.

Met de basische draden kan, evenals bij basisch beklede elektroden, een lasmetaal met hoge zuiverheid en grote ductiliteit worden verkregen. Door de grove druppelvorming zijn de laseigenschappen van dit type draden in po- sitie niet ideaal, hoewel met draden met een diameter van 1,2 mm toch wel redelijk kan worden gelast. Voor lassen onder de hand wordt hoofdzakelijk de diameter 1,6 mm gebruikt.

Draden met een rutielvlak bezitten uitstekende laseigen- schappen, zowel de dikkere draden voor het lassen onder de hand, alsook de dunnere types (0,9 - 1,2 mm) voor het lassen in positie. De taatheid van het lasmetaal bij lage temperaturen is sterk verbeterd, zeker door de fabricage van rutiel draden van de "tweede generatie" (microgele- geerde draden). Toepassing van microlegeringselementen in de vulling heeft de sterkte en de taatheid van het las- metaal doen toenemen, bij behoud van de goede laseigen- schappen. Door de zeer fijnkorrelige structuur van het las- metaal worden de kerfslagwaarden bij lage temperatuur sterk verhoogd. Ook het diffundeerbare waterstofgehalte

van een dergelijk lasmetaal kan onder de juiste condities zeer laag zijn (minder dan 3 ml/100 gram lasmetaal).

Als gevolg van de zeer fijnkorrelige structuur van het las- metaal afkomstig van met Ti-B microgelegeerde rutiel dra- den, wordt ook de rekgrens van het lasmetaal sterk ver- hoogd. Als gevolg daarvan wordt het lasmetaal afkom- stig van dit soort draden gekenmerkt door een hoge rekgrens/treksterkte verhouding.

Door toepassing van een spanningsarmgloeibehandeling kunnen echter de sterkte-eigenschappen van de microge- legeerde gevulde draden desastreus worden verlaagd. Inwinnen van informatie van de leverancier voorafgaande aan een dergelijke gloeibehandeling is noodzakelijk.

Evenals bij de beklede elektrode kan de sterkte van las- metaal van gevulde draden, zowel van het basische als van het rutiel microgelegeerde type, door toepassing van verschillende legeringssystemen worden verhoogd. Meestal worden chroom en molybdeen als sterkteverho- gende legeringselementen toegepast; de ductiliteit van het lasmetaal kan worden verhoogd door legeren met nikkel.

6.2.3 *Onder poeder lassen*

Het lassen onder poeder van staalsoorten met hoge sterkte kan op twee verschillende manieren toegepast worden, namelijk:

1. lassen in veel lagen;
2. lassen in enkele zware lagen.

Het lassen in vele lagen vertoont veel analogie met het lassen met beklede elektroden. Ter verkrijging van een lasmetaal met hoge zuiverheid en een laag zuurstofge- halte worden basische geagglomereerde laspoeders toe- gepast. De legeringselementen, noodzakelijk voor het verkrijgen van de gewenste sterkte en taatheid, worden via de massieve of de gevulde draad toegevoegd, waarbij de toegepaste legeringssystemen niet wezenlijk anders zijn dan bij beklede elektroden.

Ook bij het onder poeder lassen wordt met succes gebruik gemaakt van titaan en borium als micro-legeringselemen- ten. De warmte-inbreng wordt meestal gelimiteerd om een optimale ductiliteit van het lasmetaal te garanderen. Aangezien geagglomereerde laspoeders vrijwel altijd een zekere hygroscopiciteit vertonen, moeten voorzorgsmaat- regelen worden genomen wat opslagcondities betreft; dit om een lasmetaal met voldoende laag waterstofgehalte te kunnen garanderen. In geval van twijfel moet het poeder worden gedroogd (zie ook § 7.4.1).

Het lassen in enkele zware lagen wordt veelal toegepast bij de fabricage van transportpijpen. Om economische redenen wordt dan gelast met een aantal draden tegelijk, waardoor in feite een aantal lasbogen op hetzelfde smelt- bad brandt. Het resultaat is een zeer hoge neersmeltsnel- heid bij een diepe inbranding. Om hierbij bevredigende taatheidseigenschappen te kunnen garanderen, is een aantal maatregelen noodzakelijk.

De samenstelling van het lasmetaal wordt hierbij voor het grootste gedeelte bepaald door de samenstelling van het omge- smolten basismateriaal en in veel mindere mate door het toe- voegmateriaal. Daarom zijn speciale toevoegdraden noodza- kelijk om een bepaalde lassamenstelling te kunnen garanderen.

Door de sterke opmenging met het basismateriaal komen ook minder gewenste legeringselementen in de las terecht. Zo kan het desoxidatie-element aluminium een dermate laag zuurstofgehalte van het lasmetaal geven, dat daar- door de gewenste fijnkorrelige aciculaire structuur niet kan ontstaan. Dit maakt de toepassing van minder basische poeders noodzakelijk, die wel een zekere hoeveelheid zuurstof in het lasmetaal kunnen introduceren.

6.2.4 *Aandachtspunten bij het lassen*

Het maken van lasverbindingen in staalsoorten met hoge sterkte wordt uitgevoerd met lasmaterialen die minimaal een gelijke sterkte als het basismateriaal hebben. Een veel gebruikte term hiervoor is “matching” (gelijke sterkte). Zeker bij wat betreft het leggen van zogenaamde grondlagen in deze staalkwaliteiten kan het toepassen van “undermatching” toevoegmaterialen voordelen bieden. Dit omdat de vereiste rek dan gemakkelijker uit het toevoegmateriaal kan komen dan uit het basismateriaal dat een geringere rek heeft. Met “undermatching” wordt bedoeld het verschil in de treksterkte tussen het lastoevoegmateriaal en het basismateriaal en niet het verschil in rekgrens van beide materialen.

Het lasmetaal in de staalsoorten type S1100 is altijd undermatched, omdat het momenteel nog onmogelijk is lastoevoegmaterialen te maken die aan deze waarden voor de rekgrens kunnen voldoen. Met dit verschil in sterkte moet terdege rekening worden gehouden.

Daarnaast moet de hardheid in de door de laswarmte beïnvloede zone binnen bepaalde grenzen liggen om goede sterkte-eigenschappen, vooral kerftaaiheidseigenschappen, te verkrijgen. Zo gelden voor:

- S690, S890 en S960 een hardheid liggende tussen 350 en 450 Hv10;
- S1100 een hardheid liggende tussen 350 en 475 Hv10.

Dit houdt in dat moet worden gelast met een betrekkelijk lage warmte-inbreng. Hierover meer in bijlage A1 “Lasbaarheid van staal met hoge sterkte”.

Hoofdstuk 7

Samenvatting verwerking van staal-soorten met hoge sterkte: "do's en don'ts"

Bij de verwerking van de staalsoorten met hoge sterkte gelden in principe vergelijkbare randvoorwaarden als bij de verwerking van het ongelegeerd constructiestaal type S355. Echter, door de hogere SMYS van deze staalsoorten zijn de randvoorwaarden wat stringenter. Ook zijn er specifiek voor staalsoorten met hoge sterkte randvoorwaarden die voor ongelegeerd constructiestaal niet of nauwelijks gelden.

7.1 Eisen te stellen aan het basismateriaal

7.1.1 Begrenzing rekgrens

Het is niet gebruikelijk de maximale rekgrens van het basismateriaal te begrenzen. Echter, uit oogpunt van de selectie van het lastoevoegmateriaal, zou dit eigenlijk wel overwogen moeten worden. Gezien de onvermijdelijke spreiding zou een begrenzing van de hoogst toelaatbare rekgrens ca. 100 - 125 MPa boven de SMYS moeten zijn.

7.1.2 R_e/R_m verhouding

De verhouding tussen de actuele rekgrens en de actuele treksterkte van een materiaal geeft informatie over de mate waarin het materiaal in staat is een opgelegde vervorming op te nemen. Tevens geeft de R_e/R_m verhouding aan in welke mate discontinuïteiten in het materiaal toelaatbaar zijn (bijvoorbeeld gaten voor boutverbindingen).

Voor S355 geven de Technische Grondslagen voor Bouwconstructies aan dat basismateriaal, in de conditie zoals het wordt toegepast, geen hoger R_e/R_m verhouding mag hebben dan 0,90. Hierbij moet rekening worden gehouden dat door koudvervorming (bijvoorbeeld door koudwalsen van een buis met grote diameter/wanddikte verhouding) de R_e/R_m verhouding met ca. 0,05 punten kan stijgen. Het is daarom veilig de maximum R_e/R_m waarde voor S355 basismateriaal (zoals het door de staalfabriek wordt geleverd) op 0,85 te stellen.

Voor dunwandig thermomechanisch gewalst S355 is deze waarde van 0,85 problematisch. Voor staalkwaliteiten met hoge sterkte is de situatie nog ernstiger: de waarde van 0,85 is meestal niet haalbaar. Voor normaalgegloeid S460N wordt een dergelijke waarde nog wel gehaald, maar voor thermomechanisch gewalst S460M (met name voor dikten boven 16 mm) komt de R_e/R_m waarde al snel in de buurt van 0,90.

Voor QT-staalsoorten van het type S690 en hoger is een R_e/R_m verhouding van 0,91 - 0,93 gebruikelijk. Dergelijke R_e/R_m verhoudingen vereisen specifieke aandacht van de constructeur!

Met nadruk wordt erop gewezen, dat de eis aan de R_e/R_m verhouding uitsluitend geldt voor het basismateriaal en, mits het lasmetaal een hogere R_e heeft dan het basismateriaal, niet voor het lasmetaal. Indien het lasmetaal overmatching is, vindt de vervorming namelijk plaats buiten het lasmetaal. Daardoor kan de eis aan de R_e/R_m verhouding voor het lasmetaal vervallen.

7.1.3 Kerftaaiheidseigenschappen

Voor platen met een dikte vanaf 25 mm dienen de rele-

vante Charpy-V kerftaaiheidseigenschappen ook op de halve plaatdikte te worden beproefd. Indien in een later stadium Charpy-V kerftaaiheidseigenschappen worden geëist in de warmte beïnvloede zone van een lasverbinding, dient het basismateriaal in de relevante beproevingsrichting en op het te beproeven niveau in de plaat tenminste dezelfde kerftaaiheidseigenschappen te hebben.

7.1.4 Inwendige defecten

Inwendige defecten mogen niet aanwezig zijn. Dit geldt zowel voor S355, alsook voor de staalkwaliteiten met hoge sterkte. Omdat dit niet haalbaar is, moet de maximale defectgrootte vooraf worden overeengekomen. Dit houdt in dat het materiaal moet worden onderzocht, zoals is aangegeven in de norm NEN-EN 10021 (2007).

7.1.5 Oppervlakte-defecten

Ook voor oppervlakte-defecten worden aan staal met hoge sterkte in principe geen andere eisen gesteld dan gelden voor S355. Dit houdt in dat het materiaal moet worden onderzocht zoals aangegeven in norm NEN-EN 10021 (2007).

7.1.6 Gevoeligheid voor lamellar tearing

De gevoeligheid voor lamellaire scheurvorming (lamellar tearing) verdient bij staal met hoge sterkte, evenals bij het ongelegeerde staal type S355, de nodige aandacht (zie ook bijlage A.5.2).

Afhankelijk van de hoogte van de loodrecht op het oppervlak werkende spanning en het constructiedetail, moet het materiaal een bepaalde mate van weerstand tegen lamellaire scheurvorming bezitten. De gevoeligheid tegen deze scheurvorming wordt gemeten met een trekproef loodrecht op het oppervlak. Het percentage insnoering van de proefstaaf geeft de mate van gevoeligheid aan. Bepaling van deze gevoeligheid moet plaatsvinden volgens NEN-EN 10164. De mate van ongevoeligheid voor lamellaire scheurvorming, die op een bepaalde plaats in een constructie noodzakelijk is, kan worden vastgesteld met Eurocode 3, annex D.

7.1.7 Samenstelling

De chemische samenstelling van het basismateriaal bepaalt in hoge mate de voorzorgsmaatregelen die bij het lassen moeten worden genomen. Door bij de bestelling van het materiaal de chemische samenstelling te begrenzen, kunnen in een later stadium problemen met (hoog) voorwarmen worden voorkomen.

Kengetallen die veelal voor de karakterisering van de chemische samenstelling van een staal worden gebruikt zijn het koolstofequivalent en de zogenaamde PCM-factor (zie ook bijlage A.5.1).

7.2 Keuze lasproces en lastoevoegmateriaal

7.2.1 Lasproces

In bijlage A wordt hier uitvoerig op ingegaan. Vandaar de beperking tot de opmerking dat lasprocessen met een hoge warmte-inbreng in het algemeen niet kunnen worden toegepast. De standaard toe te passen lasprocessen voor het lassen van de staalkwaliteiten met hoge sterkte zijn:

- lassen met beklede elektroden;
- MAG-lassen met zowel massieve alsook gevulde draad;
- onder poeder lassen.

De aan de warmtehuishouding te stellen eisen worden stringenter, naarmate de rekgrens van het basismateriaal stijgt.

7.2.2 Waterstofgehalte

Dit onderwerp wordt besproken in bijlage A.5.4.2. Bij voorkeur moeten combinaties van lasprocessen en lastoevoegmaterialen die minder dan 5 ml diffundeerbare waterstof per 100 gram neergesmolten lasmetaal opleveren worden toegepast. Het is beter waterstofgehalten na te streven met minder dan 3 ml per 100 gram lasmetaal; dit is echter in de praktijk niet altijd realiseerbaar voor alle lasprocessen en lastoevoegmaterialen.

7.2.3 Type lastoevoegmaterialen

In bijlage A wordt dit onderwerp ook besproken. Resume- rend kan worden gesteld dat de volgende toevoegmaterialen toe te passen zijn:

- lassen met beklede elektroden:
 - ◆ uitsluitend basische elektroden;
- MAG-lassen:
 - ◆ voor massieve lasdraden zijn er geen beperkingen;
 - ◆ voor basische gevulde draden gelden eveneens geen beperkingen;
 - ◆ voor rutiel gevulde draden geldt de beperking: MSYS basismateriaal maximaal 460 MPa;
- OP lassen:
 - ◆ voor massieve alsook gevulde draden zijn er geen beperkingen;
 - ◆ gedroogde basische laspoeders gebruiken.

7.2.4 Sterkte van de las

Als een gelaste verbinding in staal met hoge sterkte op trek wordt belast, dient de lasverbinding ten minste dezelfde rekgrens en treksterkte te bezitten als het basismateriaal (met uitzondering van sterktes boven 960 MPa).

Voor op druk belaste verbindingen of verbindingen die uitsluitend zijn bedoeld als afdichting, geldt deze eis niet. Daar de geleverde basismaterialen altijd een (vrij behoorlijke) spreiding op de rekgrens en in mindere mate op de treksterkte hebben, dient men hiermee bij de specificatie van het lastoevoegmateriaal rekening te houden. Voor S355 is dit niet noodzakelijk, omdat vrijwel alle lastoevoegmaterialen (waaraan niet bewust sterkteverhogende legeringselementen zijn toegevoegd) een lasmetaal geven met een rekgrens vanaf ca. 400 MPa (gemiddeld vanaf 440 MPa).

Vanaf S460 is de MSYS al hoger dan de genoemde 440 MPa van het toevoegmateriaal. Gevoegd bij het feit dat de gemiddelde rekgrens van materiaal met een MSYS van 460 MPa ca. 500 MPa bedraagt, zou toepassing van elektroden met een rekgrens van 440 MPa in S460 leiden tot een situatie waarin het lasmetaal minder sterk is dan het basismateriaal. Indien in dat geval een vervorming wordt opgedrongen, kan het lasmetaal bezwijken, voordat de constructie als geheel plastische vervorming vertoont. Dit is uit veiligheidsoverwegingen niet toelaatbaar.

Voor staalsoorten met hoge sterkte kunnen derhalve de volgende richtlijnen worden gehanteerd:

- SMYS basismateriaal ≤ 600 MPa:
 - ◆ SMYS lasmetaal $\geq$ SMYS basismateriaal + 75 MPa;
 - ◆ Dwarstrekproef: breuk in basismateriaal.
- SMYS basismateriaal > 600 MPa:
 - ◆ SMYS lasmetaal $\geq$ SMYS basismateriaal;
 - ◆ SMTS lasmetaal $\geq$ SMYS basismateriaal + 150 MPa, dit is echter voor typen S960 en hoger niet mogelijk; het lasmetaal is dan altijd undermatched.

Zoals reeds gesteld, zijn de regels voor rekgrenzen ≤ 600 MPa gebaseerd op de gedachte dat, indien er een plastische vervorming opgedrongen wordt, het basismateriaal eerder vervormt dan het lasmetaal. Hierdoor worden eventueel in de lasverbinding aanwezige defecten als het ware be-

schermde: de in de omgeving van deze defecten optredende rek blijft gering, hetgeen (in zekere mate) voorkomt, dat vanuit deze defecten brosse breuk ontstaat. Berekeningen over het al dan niet toelaatbaar zijn van defecten, afhankelijk van spanningstoestand en weerstand tegen brosse breuk, kunnen worden uitgevoerd, waarbij de CTOD-waarde als de kenmerkende grootte voor de weerstand tegen brosse breuk wordt gebruikt.

Voor rekgrenzen hoger dan 600 MPa leidt dit tot een, uit het oogpunt van kerftaaiheidseigenschappen en koudscheur gevoeligheid, ongewenst hoog gehalte aan legeringselementen van het lasmetaal. Om deze problemen te onder- vangen, wordt voor dergelijke staalsoorten gesteld dat het basismateriaal moet vervormen voordat het lasmetaal bezwijkt. De uiteindelijke breuk mag derhalve in het lasmetaal plaatsvinden.

Het is op dit moment niet gebruikelijk de maximaal toelaatbare rekgrens van het basismateriaal te begrenzen. Echter, uit oogpunt van de selectie van het lastoevoegmateriaal valt er veel voor te zeggen dit te overwegen. Gezien de onvermijdelijke spreiding zou een begrenzing van de hoogst toelaatbare rekgrens niet stringenter moeten zijn dan ca. 100 - 125 MPa boven de MSYS.

7.3 Lasnaadvoorbewerking

Lasnaadvoorbewerkingen in staalsoorten met hoge sterkte kunnen worden uitgevoerd door middel van thermisch snijden, alsook machinaal bewerken. Door de aanwezigheid van bepaalde legeringselementen (met name chroom) kan het onder een hoek autogeen snijden problemen opleveren. Aanbevolen wordt bij een chroomgehalte groter dan ca. 0,5% de snijhoek niet groter te kiezen dan 30°.

De bij het snijden toe te passen voorwarmtemperaturen zijn gerelateerd aan de voorwarmtemperatuur bij het lassen, maar duidelijk lager. Dit wordt veroorzaakt doordat de optredende harding in de warmte beïnvloede zone van een thermische snede vrijwel altijd lager is dan in die van een lasverbinding. Bovendien komt er in principe bij het snijproces geen waterstof vrij, hetgeen de kans op koudscheuren sterk reduceert.

In de praktijk is gebleken dat slechts voor grote materiaal- dikten en voor staalsoorten met een zeer hoge rekgrens moet worden voorgewarmd. De toe te passen voorwarm- temperaturen bij het autogeen snijden bedragen in dergelijke gevallen ca. 50 - 100 °C voor materiaaldikten groter dan 75 mm en/of voor materialen met een MSYS hoger dan 690 N/mm². De breedte waarvoor deze voorwarm- temperatuur geldt dient minimaal 5 × de plaatdikte te zijn, met een minimum van 100 mm. In geval de gesneden plaatkanten later koud moeten worden gebogen, dient in alle gevallen te worden voorgewarmd; dit ter voorkoming van scheurvorming tijdens het buigen.

De gesneden vlakken moeten via slijpen worden ontdaan van de tijdens het snijden gevormde oxidehuid. De gesne- den vlakken dienen te worden onderzocht op de aanwezig- heid van defecten. In het algemeen kunnen kleine (ondie- pe) imperfecties in de lasnaadkanten geen kwaad; tijdens het lassen worden deze imperfecties weer omgesmolten.

7.4 Lasprocedure

In principe dient aan het lassen van staalsoorten met hoge sterkte dezelfde of zelfs meer aandacht te worden be- steed als aan het lassen van S355. Naarmate de SMYS en/of de materiaaldikte stijgen, of de mate van vervor- mingsverhindering (restraint) toeneemt, dient de aan de laswerkzaamheden te besteden zorg toe te nemen.

7.4.1 Opslag lastoevoegmateriaal

Zoals eerder opgemerkt dient de uiterste zorg te worden besteed aan het verkrijgen van een zo laag mogelijk waterstofgehalte in het lasmetaal. Hiertoe dienen de basische elektroden te worden opgeslagen volgens de voorschriften van de fabrikant of moeten in vacuümverpakking worden aangekocht. Wordt getwijfeld aan het waterstofgehalte van het toevoegmateriaal dat wordt geleverd, dan moeten de elektroden volgens de voorschriften van de fabrikant worden herdroogd. Meestal is dit voor basische elektroden ca. 350 °C gedurende 2 uur.

Het aantal malen dat herdroogd mag worden is beperkt, veelal max. 3 keer. Dit in verband met het afbranden van legeringselementen die aan de bekleding toegevoegd kunnen zijn.

Massieve en gevulde MAG-draden dienen in de originele verpakking te worden opgeslagen in een speciaal daartoe ingerichte ruimte, bij voorkeur met een klimaatregeling (10-30 °C, ≤ 50% relatieve vochtigheid). Aangebroken rollen, waarmee gedurende een periode van 24 uur niet wordt gelast, moeten in plastic worden verpakt en worden opgeslagen in de genoemde speciaal ingerichte ruimte.

Laspoeders voor het onder poeder moeten worden opgeslagen in de oorspronkelijke verpakking, onder dezelfde omstandigheden als de beklede elektroden.

Aangezien het laspoeder veelal wordt gerecirculeerd en daarbij vocht uit de atmosfeer kan opnemen, wordt een maximum gesteld aan het aantal keren dat het laspoeder mag worden gebruikt, voordat het opnieuw moet worden gedroogd (meestal 3 maal). Een tweede oorzaak van het beperken van deze gebruikstijd is, dat laspoeder tijdens het recirculeren in kleinere fracties uiteen kan vallen, hetgeen de kwaliteit en de eigenschappen van het laspoeder niet ten goede komt.

Indien een poeder vocht heeft opgenomen, kan het worden gedroogd. Evenals beklede elektroden mag een laspoeder slechts een beperkt aantal maal worden gedroogd. Het is niet toegestaan laspoeder in een bak in een oven te drogen; de effectiviteit van zo'n behandeling is beperkt. Er zijn speciale droogovens voor laspoeders verkrijgbaar, waarbij het poeder via een aantal schijven naar beneden trilt, en wordt gedroogd.

7.4.2 Aanbouwen

Gezien de hoge rek grenzen van zowel basismateriaal als lasmetaal dient er meer aandacht te worden besteed aan de maatvoering bij het aanbouwen. Als er afwijkingen van de voorgeschreven vooropeningen met meer dan 2 mm voorkomen, moet in overleg met een deskundige worden vastgesteld op welke wijze toch de vereiste kwaliteit kan worden geleverd.

Ook de invloed van hi-lo op het gedrag van de verbindingen is bij staalsoorten met hoge sterkte groter dan bij S355. Derhalve dienen er voor de staalsoorten met hoge sterkte strengere eisen te worden gesteld aan de toelaatbare hi-lo.

Gezien de gevoeligheid van de staalsoorten met hoge sterkte voor koudscheuren, dient de lasnaad vrij te zijn van roest op het moment van lassen. Dit houdt in dat bij het aanbouwen de naad (en het oppervlak van het materiaal over een strook van minimaal 5 mm naast de naad) moet worden geslepen tot alle roest verwijderd is. Aangezien een dergelijk staaloppervlak slechts gedurende korte tijd vrij van roest blijft, moet met het lassen worden aangevangen vóórdat weer roestvorming optreedt. Dit geldt met name voor I-naden, die met het onder poeder lasproces in twee lagen worden gelast, ofschoon de

warmte-inbreng met dit proces meestal zo groot is, dat er nauwelijks kans op koudscheuren bestaat.

Nogmaals wordt opgemerkt dat bij het onder poeder lassen van I-naden in staalsoorten met hoge sterkte nauwelijks kan worden voldaan aan de te realiseren sterkte-eigenschappen. Dit vanwege de grote opmenging van het lasmetaal met het basismetaal.

7.4.3 Hechten

Bij de staalsoorten met hoge sterkte geldt in nog sterkere mate wat ook al voor S355 geldt: een hecht moet met nog meer zorg worden uitgevoerd dan de echte lasverbinding. De omstandigheden zijn namelijk zeer ongunstig: een hecht wordt over een spleet gelast en er komen (zowel tijdens als na het lassen) grote krachten op de hecht. Het is derhalve verboden om hechtlassen te laten leggen door niet-gekwalificeerde lassers (zie ook de norm NEN-EN 1011). De voorwarmtemperatuur tijdens het hechten moet ten minste zo hoog zijn, als de voor de resterende lasverbinding voorgeschreven waarde. Het voorwarmen voor het aanbrengen van de hechten mag lokaal gebeuren met gasbranders.

Indien een hechtlas deel zal uitmaken van de gehele doorlassing (met andere woorden: hij wordt niet weggeslepen), dan dient de hecht als doorlassing te worden uitgevoerd.

7.4.4 Doorlassen

In het algemeen is de doorlassing gevoeliger voor het optreden van koudscheuren dan de daarop volgende vullagen. Dit betekent dat de voorwarmtemperatuur wordt bepaald door de eisen die de doorlassing hieraan stelt.

De vereiste voorwarmtemperatuur kan enigszins worden gereduceerd door de doorlassing te lassen met een lastoevoegmateriaal dat één sterkteklasse lager is dan hetgeen voor het basismateriaal eigenlijk noodzakelijk is, zogenaamde low-yield elektroden.

Doordat met name in de doorlassing een grote opmenging plaatsvindt met het basismateriaal, leidt het toepassen van zo'n lagere sterkte lastoevoegmateriaal niet tot een te lage sterkte van de doorlassing. Toepassing van dit type toevoegmateriaal moet dan wel beperkt worden tot maximaal twee laslagen.

7.4.5 Vullen

Bij het vullen van de naad dient er op te worden gelet dat bij het opbouwen van de naad (rupsen in lengterichting) de opvolgende laslagen in tegengestelde richting worden opgebouwd: "van de linker naadflank naar de rechter naadflank" moet worden opgevolgd door "van rechts naar links". Dit is met name van belang bij procedure kwalificaties; het voorkomt met name dat Charpy-V kerfslagstaven zodanig worden uitgenomen, dat zij voor het grootste deel bestaan uit niet-getransformeerd lasmetaal. De te realiseren Charpy-V kerftaaiheidseigenschappen nemen door deze lasvolgorde toe.

7.4.6 Warmte-inbreng

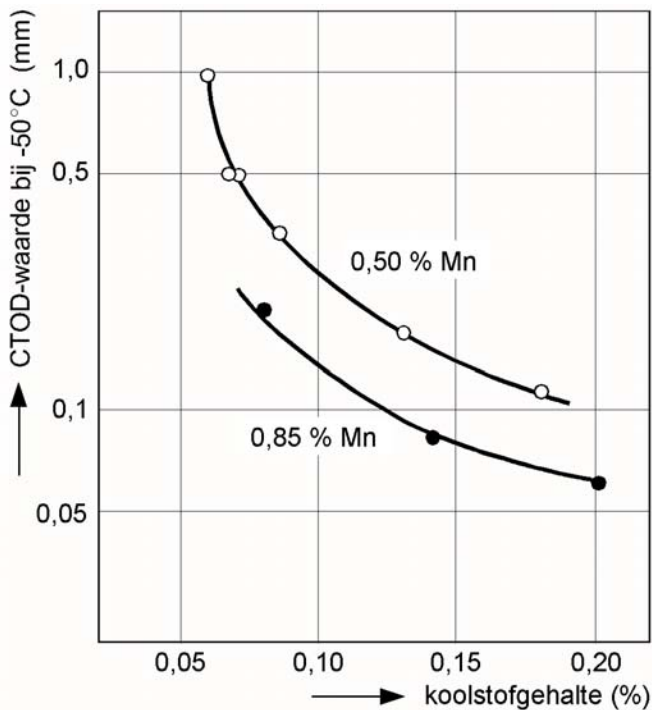
De mechanische eigenschappen van het lasmetaal en de warmte beïnvloede zone worden in hoge mate beïnvloed door de afkoeling van 800 naar 500 °C na het lassen. Maatgevend is de afkoeltijd $\Delta t_{8/5}$. Deze $\Delta t_{8/5}$ wordt bepaald door de hoogte van de toegepaste warmte-inbreng, de materiaaldikte, de voorwarmtemperatuur en het warmtegeleidsvermogen van het staal. Zij bepalen gezamenlijk namelijk de snelheid van warmteafgifte.

Deze grootheden dienen op elkaar te worden afgestemd, zodanig dat de afkoeltijd $\Delta t_{8/5}$ voor S460 ca. 6-20 sec. bedraagt. Naarmate de SMYS van het basismateriaal stijgt,

wordt de toepasbare range van afkoeltijden kleiner: voor S690 wordt een $\Delta t_{8/5}$ aanbevolen tussen 6 en 12 seconden. Als richtlijn voor de toe te passen warmte-inbreng kan in eerste instantie een range van ca. 1-2 kJ/mm worden aangehouden, echter gezien de verscheidenheid aan materiaaldikten is dit gebied niet meer dan een richtlijn. Via de $\Delta t_{8/5}$ kan een nauwkeuriger begrenzing van de warmte-inbreng worden aangegeven.

Om de juiste warmte-inbreng voor het te lassen staal te bepalen is het raadzaam een lasprocedure te maken; beproeven van de gelegde las geeft dan juiste informatie over de gerealiseerde mechanische eigenschappen.

Indien hoge afkoeltijden worden toegepast, dient er bij de bestelling van het staal rekening mee te worden gehouden. Voor S460 leiden stringente eisen aan de weerstand tegen brose breuk en/of een hoge afkoeltijd $\Delta t_{8/5}$ tot een voorkeur van TMCP of QT staal. De achtergrond is dat een laag koolstofgehalte leidt tot een betere weerstand tegen brose breuk in de wbz (zie figuur 7.1). In deze figuur is de weerstand tegen brose breuk, bepaald via de CTOD-beproeving, uitgezet tegen het koolstofgehalte.



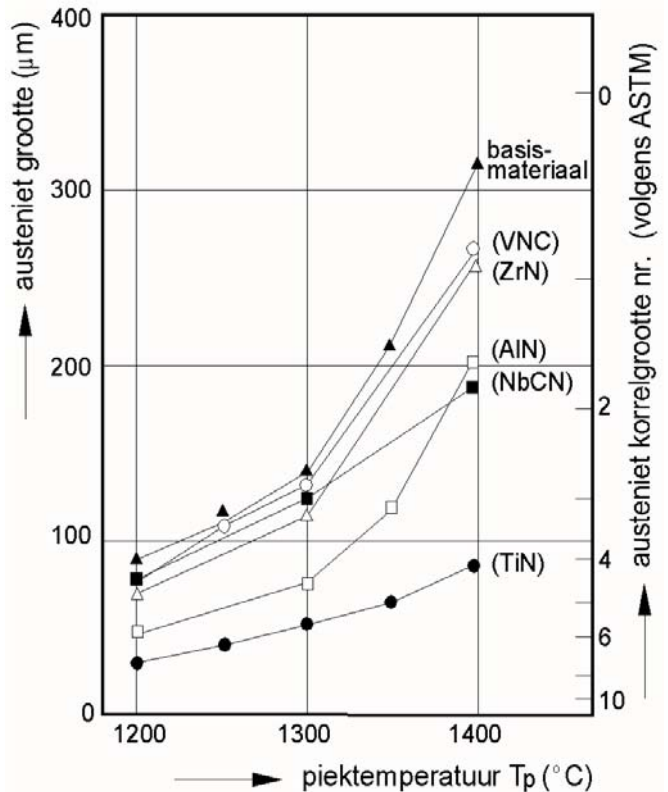
figuur 7.1 Invloed van het koolstofgehalte op de CTOD eigenschappen in de grofkorrelige wbz van een lasverbinding

Als er met een zeer hoge warmte-inbreng wordt gelast, kan Ti-microgelegeerd staal worden toegepast. Door het staal te microlegeren met Ti, kan de breedte waarin sterke korrelgroei optreedt worden beperkt tot een zeer smalle zone naast de smeltlijn (zie figuur 7.2). Hierdoor is de weerstand tegen brose breuk in de warmte beïnvloede zone gunstiger.

7.4.7 Voorwarmen

Ondanks het gebruik van lastoevoegmaterialen met een gegarandeerd laag waterstofgehalte van minder dan 5 ml per 100 gram lasmetaal is het risico voor koudscheuren in lasverbindingen van staalsoorten met hoge sterkte in het algemeen aanzienlijk. Het gehalte aan legeringselementen is veelal zo hoog, dat scheurgevoelige microstructuren (met een hoge hardheid) ontstaan in de grofkorrelige

warmte beïnvloede zone. Deze kans op het optreden van koudscheuren kan worden beperkt door voor te verwarmen.



figuur 7.2 Schematische weergave van het effect van Ti op de korrelvergroving in de warmte beïnvloede zone van een lasverbinding

Voor staalsoorten met een MSYS tot en met ca. 500 MPa kan de voorwarmtemperatuur worden gerelateerd aan de chemische samenstelling van het basismateriaal. Met namen voor TMCP kwaliteiten is het mogelijk met een lage voorwarmtemperatuur te lassen of zelfs geheel zonder voorwarmen, mits de vervormingsverhinderend c.q. materiaaldikte niet al te groot is.

Voor dit sterkteniveau is de gevoeligheid voor koudscheuren van het lasmetaal lager dan van de grofkorrelige wbz.

Indien de SMYS van het basismateriaal boven 500 MPa ligt, moet er onafhankelijk van de chemische samenstelling van het basismateriaal, worden voorgewarmd. De toe te passen voorwarmtemperatuur neemt toe met de materiaaldikte en MSYS van het basismateriaal.

Naarmate de SMYS van het basismateriaal stijgt, neemt het legeringsgehalte van het lasmetaal sterk toe. Vanaf een SMYS van ca. 600 MPa ligt hierdoor de koudscheur-gevoeligheid van het lasmetaal op hetzelfde niveau als van het basismateriaal, terwijl vanaf een SMYS van ca. 700 MPa de koudscheur-gevoeligheid van het lasmetaal de noodzakelijke voorwarmtemperatuur bepaalt. Met name voor deze staalsoorten is het van belang erop te letten dat de rekgrens van het lasmetaal slechts in beperkte mate hoger is dan de SMYS van het basismateriaal. Het toe-passen van een lastoevoegmateriaal met een te hoge rekgrens leidt in dergelijke staalsoorten tot een verhoogde kans op dwarsscheuren (krimpscheurtjes) in het lasmetaal.

De toe te passen voorwarmtemperaturen kunnen worden bepaald aan de hand van een aantal grafieken die in de norm NEN-EN 1011 zijn opgenomen.

In deze grafieken is de voorwarmtemperatuur afhankelijk gesteld van de gecombineerde te lassen plaatdikte, het

koolstofequivalent van het te lassen staal en het waterstofgehalte van het te gebruiken lastoevoegmateriaal.

7.4.8 Arc strikes en temperbead (ontlaatsnoeren)

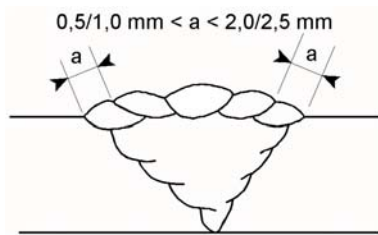
Bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte geldt in nog sterkere mate dan voor S355 dat het ontsteken van de boog buiten de lasnaad (= arc strikes) absoluut verboden is.

De tijdens een arc strike optredende afkoelsnelheid van het basismateriaal is zo groot, dat er harde en scheur gevoelige microstructuren ontstaan.

Indien arc-strikes aanwezig zijn dienen zij te worden weggeslepen en vervolgens moet het plaatoppervlak magnetisch worden onderzocht op de aanwezigheid van scheuren. Ook bij het niet correct uitvoeren van het magnetisch onderzoek zelf kunnen arc strikes ontstaan, die op identieke wijze dienen te worden behandeld.

Het toepassen van de zogenaamde "temperbeadmethode" (zie figuur 7.3) is bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte niet overal zinvol.

De temperbeadmethode wil zeggen dat een dun snoer extra wordt gelast op het laatst gelegde lassnoer dat grenst aan het basismateriaal. Er ontbreekt namelijk een aan het laatst gelegde lassnoer aansluitend snoer dat de warmte beïnvloede zone kan uitgloeien. Dit extra gelegde snoer gloeit wel de warmte beïnvloede zone uit. Wel moet de afstand tussen de smeltlijn van het laatst gelegde snoer en het extra lassnoer ca. 0,5-2,5 mm zijn, wil dit snoer effect hebben op de warmte beïnvloede zone.



figuur 7.3 Temperbeadmethode

De staalsoorten met een rekgrens vanaf ca. 500/600 MPa hebben, afhankelijk van de wijze van vervaardigen, een dermate hoog gehalte aan legeringselementen, dat ook na een piektemperatuur van ca. 1000 °C de optredende hardheid zeer hoog is.

Aangezien de temperbead echter ook bij dergelijke staalsoorten een positief effect op de hardheid in de wvz heeft, wordt het toepassen van de temperbead, mits toepasbaar, wel aanbevolen. In de naad dient, als de lasafmetingen dat tenminste toelaten, altijd van het basismateriaal af naar het midden te worden gelast.

Voor S420 en S460 is het legeringsgehalte lager. Hierdoor valt bij deze staalsoorten wel een groot effect op de hardheid in de wvz te bewerkstelligen. Voorwaarde is wel, dat de temperbead correct wordt uitgevoerd: de afstand tussen temperbead en het basismateriaal dient overal ca. 0,5-2,5 mm te bedragen.

7.4.9 Tijdelijke lassen

Tijdelijke lassen, bijvoorbeeld ten behoeve van installatie en samenbouw, dienen met dezelfde zorg te worden uitgevoerd als permanente lassen. Nadat de tijdelijke lassen niet meer nodig zijn, moeten zij worden verwijderd door middel van snijden en slijpen, gevolgd door magnetisch onderzoek. Het met geweld verwijderen van de tijdelijke

bevestigingsmiddelen, bijvoorbeeld door ze met een hamer eraf te slaan, kan leiden tot scheurvorming.

7.4.10 Reparatielassen

Bij het reparatielassen van staalsoorten met hoge sterkte moet rekening worden gehouden met hoge vervormingsverhinderende. Vanwege de hoge sterkte en de daaraan gekoppelde geringe rek van het basismateriaal zullen vanwege optredende krimpverhinderende hoge spanningen ontstaan. De kans op het ontstaan van scheuren is dan niet ondenkbeeldig. Extra maatregelen moeten worden genomen om deze scheuren te voorkomen, zoals:

- ▶ goed voorwarmen; ca. 50 ° hoger dan bij normale constructielassen;
- ▶ droge elektroden gebruiken om waterstofopname van het lasmetaal te voorkomen (diffundeerbare waterstof van het lasmetaal $H_{Dm} < 3$ ml per 100 gram lasmetaal);
- ▶ na het lassen waterstofarmgloeien (ca. 2 uur gloeien op 200 °C);
- ▶ langzaam laten afkoelen;
- ▶ doorlassing maken met een lastoevoegmateriaal met een lage rekgrens.

7.5 Gloeibehandelingen

7.5.1 Normaalgloeien

Normaalgloeien is slechts toegestaan voor de normaalgegloeide staalsoorten S420N en S460N. Voor alle andere staalsoorten geldt, dat een dergelijke warmtebehandeling de microstructuur en de mechanische eigenschappen van het staal sterk nadelig beïnvloedt.

Normaalgloeien van een gelaste verbinding leidt altijd tot verlies van de sterkte van het lasmetaal en is derhalve niet toegestaan, mits er een lastoevoegmateriaal is gebruikt, dat ontwikkeld is om een normaalgloeibehandeling te ondergaan.

7.5.2 Spanningsarm gloeien

Een aantal constructiecodes of -voorschriften stelt, dat vanaf een bepaalde dikte, lasverbindingen spanningsarm moeten worden gegloeid. Dit hangt samen met het verlagen van het niveau van de inwendige restspanningen, hetgeen gunstig is voor het voorkomen van brosse breuk. Voor staalsoorten met een lagere sterkte wordt als argument voor spanningsarm gloeien ook wel genoemd de verbetering van de Charpy-V kerfslagwaarden.

Voor staalsoorten met hoge sterkte geldt dit in het algemeen niet: de Charpy-V kerftaaiheidseigenschappen en de CTOD eigenschappen nemen in een aantal gevallen in beperkte mate af na spanningsarm gloeien. Doordat de inwendige spanningen afnemen, kan echter de gevoeligheid voor brosse breuk van de constructie toch lager worden.

Voor alle materialen geldt dat de spanningsarmgloeitemperatuur in de range moet liggen van 530 - 580 °C. Met name de normaalgegloeide S460N staalsoorten kunnen bij temperaturen hoger dan ca 560 °C een sterke achteruitgang in de kerftaaiheidseigenschappen vertonen.

7.6 Vervormen

Hoewel in hoofdstuk 6 deze bewerking al is besproken, wordt hier nog even een samenvatting gegeven.

7.6.1 Warmvervormen

Voor warmvervormen (waarbij het materiaal tot in het austenietgebied wordt verwarmd) gelden dezelfde opmerkingen als bij normaalgloeien.

Slechts voor S420N en S460N is dit toegestaan. Onderzoek heeft aangetoond dat de maximum metaaltemperatuur tijdens dit vervormingsproces beperkt dient te blijven tot ca 960 °C, indien mogelijk zelfs 920 °C. De opwarm- c.q. afkoelsnelheid dient zo hoog mogelijk te worden gekozen: ca 200 - 300 °C/uur. Zowel een hoge maximale temperatuur als een lage opwarm- en/of afkoelsnelheid leiden tot korrelvergroving van het materiaal. Dit leidt tot een daling van de sterkte en een afname van de taaheid.

Indien de toe te passen vervormingen (walskrachten) het noodzakelijk maken dat de vervorming bij verhoogde temperatuur plaatsvindt, kan dit zonder problemen, mits de temperatuur in de range van spanningsarmgloeitemperaturen ligt (530 - 580 °C).

7.6.2 *Koudvervormen*

Staalsoorten met hoge sterkte kunnen koud worden vervormd; de minimale buigstraal neemt toe met de SMYS en bedraagt ca 2 - 5 maal de plaatdikte. Indien kleinere buigstralen noodzakelijk zijn, dient materiaal te worden gebruikt volgens NEN-EN 10149: "Warmgewalste platte producten gemaakt van staalsoorten met een hoge rekgrens voor koudvervorming". Bij materiaal volgens deze norm kan in een aantal gevallen zelfs "scherp" worden gezet.

Met moet er rekening mee houden dat ten gevolge van het koudvervormen de kerftaaheidseigenschappen dalen en de rekgrens, alsook de treksterkte stijgen. De R_e/R_m verhouding stijgt ook en kan, afhankelijk van de R_e/R_m waarde van het basismateriaal en de toegepaste buigstraal gemakkelijk uitkomen op een niveau van 0,9 - 0,95.

Een tweede punt van aandacht is dat, in de zone die gebogen is over een doorn van 3 maal de plaatdikte of kleiner, het materiaal vrijwel geen plastische rek meer kan opnemen. Experimenten hebben aangetoond dat dergelijk vervormd materiaal nog slechts een gelijkmatige rek kan opnemen van ca. 0,5 - 1 %.

Koudvervormd staal met hoge sterkte mag spanningsarm worden gegloeid in het temperatuurgebied van 530 - 580 °C.

Hoofdstuk 8

Normen met betrekking tot de fijnkorrelige staalsoorten met hoge sterkte

- NEN-EN 10020: 1989
Definitie en indeling van staalsoorten
- NEN-EN 10021: 1994
Algemene technische leveringsvoorwaarden voor staal en staalproducten
- NEN-EN 10025-1 (2004)
Warmgewalste producten van constructiestaal.
Algemene technische leveringsvoorwaarden.
- NEN-EN 10025-2 (2004)
Technische leveringsvoorwaarden voor ongelegeerd constructiestaal.
- NEN-EN 10025-3 (2004)
Technische leveringsvoorwaarden voor normaalgeglode/normaliserend gewalst lasbaar fijnkorrelig constructiestaal.
- NEN-EN 10025-4 (2004)
Technische leveringsvoorwaarden voor thermomechanisch gewalst lasbaar fijnkorrelig constructiestaal.
- NEN-EN 10025-6 (2004)
Technische leveringsvoorwaarden voor platte producten van constructiestaal met hoge vloeigrens in de veredelde toestand.
- NEN-EN 10027-1 (2005)
Systemen voor het aanduiden van staalsoorten
Deel 1: Aanduiding met symbolen
- NEN-EN 10027-2 (1993)
Systemen voor het aanduiden van staalsoorten
Deel 2: Numeriek systeem
- NPR-ECISS/IC 10
Systemen voor het aanduiden van staalsoorten
Aanvullende symbolen voor de aanduiding met symbolen van staalsoorten.
- NEN-EN 10028-1: 1993
Platte producten van staal voor drukvaten
Deel 1: Algemene eisen
- NEN-EN 10028-2: 1993
Platte producten van staal voor drukvaten
Deel 2: Ongelegeerde en gelegeerde staalsoorten met gespecificeerde eigenschappen bij hoge temperatuur
- NEN-EN 10028-3 (2003)
Platte producten gemaakt van staal voor drukvaten
Deel 3: lasbaar, fijnkorrelig staal, normaal gegloeid
- NEN-EN 10028-5: 1997
Platte producten van staal voor drukvaten
Deel 5: Lasbare fijnkorrelige thermomechanisch gewalste staalsoorten.
- NEN-EN 10028-6: 1997
Platte producten van staal voor drukvaten
Deel 6: Lasbare fijnkorrelige veredelde staalsoorten
- NEN-EN 10113-1: 1993
Warmgewalste producten van lasbaar fijnkorrelig constructiestaal
Deel 1: Algemene leveringsvoorwaarden
- NEN-EN 10113-2: 1993
Warmgewalste producten van lasbaar fijnkorrelig constructiestaal
Deel 2: Leveringsvoorwaarden voor normaalgeglode/normaliserend gewalste staalsoorten
- NEN-EN 10113-3: 1993
Warmgewalste producten van lasbaar fijnkorrelig constructiestaal
Deel 3: Leveringsvoorwaarden voor thermomechanisch gewalste staalsoorten
- NEN-EN 10137-1: 1996
Platen en universeelstaal van constructiestaal met hoge vloeigrens in de veredelde of precipitatiegeharde toestand
Deel 1: Algemene leveringsvoorwaarden.
- NEN-EN 10137-2: 1995
Platen en universeelstaal van constructiestaal met hoge vloeigrens in de veredelde of precipitatiegeharde toestand
Deel 2: Leveringsvoorwaarden voor veredelde staalsoorten
- NEN-EN 10127-3: 1995
Platen en universeelstaal van constructiestaal met hoge vloeigrens in de veredelde of precipitatiegeharde toestand
Deel 3: Leveringsvoorwaarden voor precipitatiegeharde staalsoorten
- NEN-EN 10210-1: 1994
Warmvervaardigde buisprofielen voor constructiedoeleinden van ongelegeerd en fijnkorrelig constructiestaal
Deel 1: Technische leveringsvoorwaarden

Bijlage A

Lasbaarheid van staal met hoge sterkte

A.1 Algemeen

Volgens het International Institute of Welding, IIW, is de definitie van het begrip "lasbaarheid van een metaal" als volgt:

"Een metaal is bij een gegeven wijze van lassen en een gegeven toepassing in een gestelde mate lasbaar, wanneer met dit metaal, nadat de voorzorgen bepalend voor die gestelde mate zijn getroffen, een lasconstructie kan worden verkregen met *continu metalliek gelijkwaardige verbindingen* die, zowel door hun *eigenschappen*, alsook door hun *ligging in de constructie*, voldoen aan de *eisen* die als *basis voor de beoordeling* zijn overeengekomen".

Alle cursief gedrukte termen in de gecompliceerde definitie hebben hun invloed op de lasbaarheid.

In het kort kan de lasbaarheid van staal als volgt worden omschreven: "het vermogen om tijdens het lassen meer of minder snel hard te worden". Factoren die het optreden van harde zones beïnvloeden zijn onder meer:

- de chemische samenstelling;
- de afkoelsnelheid;
- de warmte-inbreng.

A.2 Chemische samenstelling

De hardbaarheid van een staal wordt bepaald door zijn samenstelling. Het koolstofgehalte speelt hierbij een doorslaggevende rol, maar andere elementen oefenen ook hun invloed uit. Een en ander kan worden gekwantificeerd in een zgn. koolstofequivalent. Dit is een getal dat een maat is voor de hardbaarheid van een staal.

Door het International Institute of Welding is de volgende formule geaccepteerd:

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mn + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Deze formule is ontwikkeld in de tijd dat de staalsoorten met hoge sterkte nog een betrekkelijk hoog koolstofgehalte bezaten. Voor de moderne staalsoorten met een laag koolstofgehalte (ongeveer 0,1%) is deze formule echter minder geschikt. Er wordt vooral vanuit Japan een andere formule aanbevolen (zgn. Ito Bessyo formule):

$$PCM = C + (Mn + Cr + Cu)/20 + Si/30 + V/10 + Mo/15 + Ni/60 + 5.B$$

Naarmate het koolstofequivalent van een staalsoort lager is, zal het minder neiging tot vorming van harde koudscheurgevoelige structuren in de warmte beïnvloede zone vertonen.

A.3 Afkoelsnelheid

Naarmate een lasverbinding langzamer afkoelt na het lassen, zal de neiging tot vorming van harde structuren in de warmte beïnvloede zone en eventueel in de las zelf geringer zijn. Belangrijk hiervoor is de snelheid waarmee het traject tussen 800 en 500 °C tijdens de afkoeling wordt doorlopen. Dit is namelijk het gebied waar betrekkelijk zachte ferritische structuren kunnen ontstaan, indien daar tenminste voldoende tijd voor is.

De afkoelsnelheid van 800 tot 500 °C ($\Delta_{t_{800-500}}$) wordt bepaald door de hoeveelheid warmte die bij het lassen wordt ingebracht, de dikte van het te lassen basismateriaal en de toegepaste voorwarmtemperatuur.

Onder de warmte-inbreng E, ook wel heat input genoemd, verstaat men de tijdens het lassen in de plaat gebrachte

hoeveelheid energie uitgedrukt in kJ per mm laslengte en kan berekend worden met de formule uit NEN EN 1011:

$$E = k \frac{U \times I}{v} \text{ kJ}$$

waarin: U = de boogspanning (V)

I = de lasstroom (A)

v = het voortlooptempo in mm/seconde

k = het thermisch rendement van het proces

In tabel A.1 wordt de k-factor gegeven van de verschillende lasprocessen.

tabel A.1 k-factor voor de verschillende lasprocessen (bron: NEN EN 1011)

proces-nummer	proces	factor k
121	onder poeder lassen met draadelektrode	1,0
111	booglassen met beklede elektroden	0,8
131	MIG-lassen	0,8
135	MAG-lassen	0,8
114	booglassen met gevulde draad	0,8
136	gasbooglassen met een gevulde draadelektrode onder bescherming van een actief gas	0,8
137	gasbooglassen met een gevulde draadelektrode onder bescherming van een inert gas	0,8
141	TIG-lassen	0,6

De warmte-inbreng is laag bij het MAG-kortsluitbooglassen (ongeveer 1 kJ/mm). Bij het lassen met beklede elektroden kan ze ook laag zijn, mits met dunne elektroden wordt gelast.

Bij het MAG-lassen met gevulde draad en zeker bij het onder poeder lassen kan de warmte-inbreng, afhankelijk van de toegepaste lasparameters, hoge waarden bereiken (tot 4 kJ/mm). Bij elektroslak- en elektrogaslassen is de warmte-inbreng altijd zeer hoog.

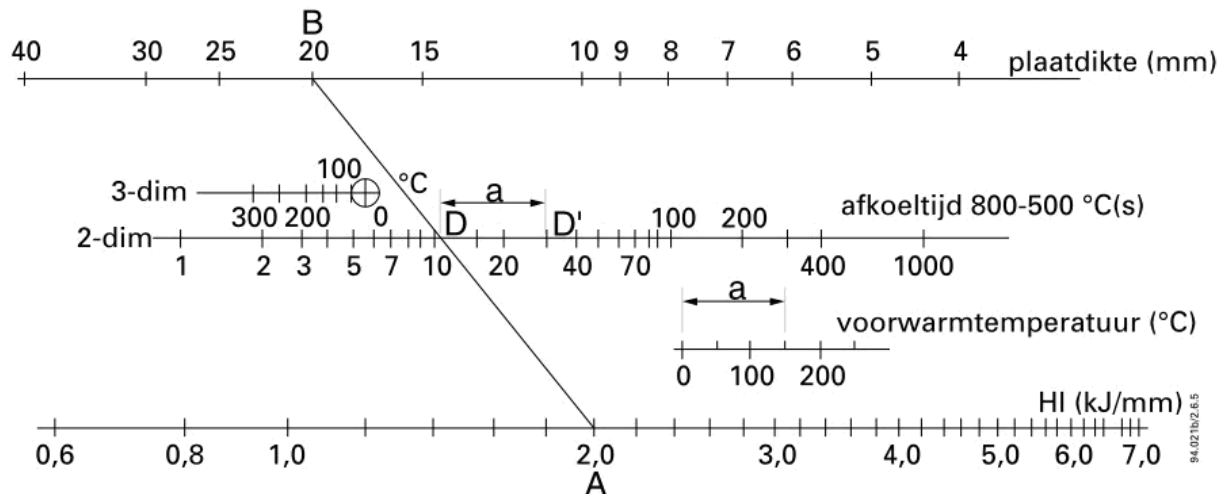
Naarmate de plaat, waarop met een zekere warmte-inbreng wordt gelast, dikker is, zal de afkoeling van de las sneller verlopen. Boven een bepaalde plaatdikte kan de warmte in drie dimensies wegvloeien, zonder dat de onderkant van de plaat nog een extra belemmering vormt. Men spreekt dan van drie dimensionale afkoeling, waarbij de snelheid van warmteafvoer het grootst is.

Aan de hand van formules van Rykalin en Uwer - Degenkolbe kan voor on- en laaggelegeerd staal de afkoeltijd tussen 800 en 500 °C, $t_{8/5}$, worden berekend. Factoren in de formules zijn onder meer: de warmte-inbreng, de gecombineerde plaatdikte, de voorwarmtemperatuur en een naadfactor.

Gezien de complexiteit van de formules is een nomogram ontwikkeld, waarmee de afkoeltijd $t_{8/5}$ langs grafische weg kan worden bepaald. In figuur A.1 is dit nomogram weergegeven.

De waarde van de berekende warmte-inbreng wordt op de onderste lijn uitgezet en verbonden met het punt van de te lassen plaatdikte op de bovenste lijn. Het snijpunt van de verbindingslijn met de middelste lijn geeft de afkoeltijd tussen 800 en 500 °C in seconden weer.

De afkoelsnelheid kan door het kiezen van de lasparameters voor een gegeven lasproces binnen zekere grenzen worden gevarieerd. Door het kiezen van een zo hoog mogelijke warmte-inbreng kan de kans op het ontstaan van harde zones worden verkleind. De meest praktische methode is echter veelal het toepassen van voorverwarming.



figuur A.1 Nomogram ter bepaling van de afkoeltijd $t_{8/5}$

A.4 Structuur van de warmte beïnvloede zone

De moderne staalsoorten met hoge sterkte ontleen hun gunstige eigenschappen aan een fijnkorrelige structuur, die tot stand komt door een zorgvuldige dosering van legeringselementen en door een goede beheersing van het productieproces. In hoofdstuk 2 zijn de verschillende productiemethoden alsook een aantal foto's van de microstructuur van verschillende staalsoorten met hoge sterkte weergegeven.

Wanneer er echter aan deze staalsoorten wordt gelast, zal de structuur plaatselijk onder invloed van de laswarmte ingrijpend kunnen veranderen. Vooral de ductiliteit gemeten met kerfslagproeven of CTOD proeven, kan afhankelijk van de staalsoort en de laswijze een sterke achteruitgang vertonen.

De harde martensitische of bainitische structuren die bij snelle afkoeling kunnen ontstaan, kunnen aanleiding zijn tot het ontstaan van door waterstof geïnduceerde koudscheurvorming. Hierop wordt in § A.5 dieper ingegaan. De ductiliteit van dergelijke structuren blijkt bij een dynamische belasting, zoals bij een kerfslagproef, bij de lage koolstofgehalten van de heden ten dage gangbare staalsoorten met hoge sterkte weliswaar minder te zijn dan van het onbeïnvloede plaatmateriaal, maar toch vaak nog redelijk goed.

Verder kan worden geconstateerd dat in de moderne staalsoorten met hoge sterkte met hun lage koolstofequivalenten, harde structuren alleen bij snelle afkoeling ontstaan, d.w.z. wanneer met lage heat input een betrekkelijk dikke plaat wordt gelast. Onder dergelijke omstandigheden zal de harde zone ook zeer smal zijn, hetgeen tot gevolg heeft dat men bij kerfslagbeproeving van deze zone doorgaans nauwelijks enige achteruitgang kan constateren.

Bij een langzame afkoeling echter ontstaan uit de austeniet in de warmte beïnvloede zone zachte grofkorrelige ferritische structuren, die weliswaar niet gevoelig zijn voor de waterstof geïnduceerde koudscheurvorming, maar wel een ten opzichte van het onbeïnvloede basismateriaal sterk verlaagde ductiliteit bezitten. Vooral bij toepassing van lasprocessen waarbij een zeer grote hoeveelheid warmte in een keer wordt ingebracht, bijvoorbeeld bij onder poeder lassen in zware lagen of vooral bij het elektroslag- of elektrogaslassen treedt dit op. In die gevallen kan de breedte van de warmte beïnvloede zone aanzienlijk worden, zodat dan door middel van kerfslagproeven en/of CTOD proeven de sterke mate van achteruitgang van de ductiliteit gemakkelijk kan worden vastgesteld.

Als regel kan worden gesteld dat de eigenschappen van een dergelijk gebied niet door de gangbare gloeibehandelingen (spanningsarmgloeien) kan worden verbeterd. De enige methode om de schade weer te herstellen is een gloeibehandeling bij hoge temperatuur (boven 1000 °C) een zgn. normaliserende gloeiing, waarbij de ferritische structuur weer in een fijnkorrelige austeniet wordt omgezet, waaruit na afkoeling bij gevolg fijnkorrelige ferritische structuren kunnen ontstaan.

Een dergelijke gloeibehandeling is zeer ingrijpend en kostbaar en heeft vaak een nadelige uitwerking op de eigenschappen van het lasmetaal, in het bijzonder een sterke verlaging van rekgrens en treksterkte, zodat dan een lasmetaal moet worden gekozen dat hiertegen bestand is. De praktische problemen bij de uitvoering van een dergelijke gloeiing zijn echter dusdanig groot, dat deze zeer weinig wordt toegepast.

Om deze reden is het noodzakelijk bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte de afkoeltijd, dus de warmte-inbreng, te beperken. De mate waarin dit moet geschieden, hangt af van de samenstelling van het staal. Sommige legeringselementen kunnen bijvoorbeeld de verbrossing van de warmte beïnvloede zone enigszins tegen gaan, andere juist bevorderen. De elementen die wat dit betreft een gunstige uitwerking hebben, bevorderen toch ook de vorming van harde structuren, hetgeen weer nadelig is voor de mogelijke koudscheurvorming.

Ook microlegeringselementen kunnen invloed hebben. Zo maakt de gecombineerde toepassing van vanadium en niobium de warmte beïnvloede zone zeer gevoelig voor verbrossing. Titaan daarentegen maakt, mits goed gedoseerd, het staal minder gevoelig.

Dat er toch nog wel degelijk een zone met verslechterde eigenschappen aanwezig is, blijkt uit CTOD-proeven. Indien een proef wordt uitgevoerd waarbij de voet van de vermoeiingsscheur precies in het grove gedeelte van de warmte beïnvloede zone ligt, wordt een zeer lage waarde gemeten. Dat toch goede waarden worden gemeten, komt doordat het vrijwel onmogelijk is de voet van de kerf doelbewust in dat gebied te leggen. Meestal ligt hij er dus iets buiten, in materiaal met goede ductiliteit. Het normale beeld van een op deze wijze uitgevoerde CTOD beproeving van de warmte beïnvloede zone is dan ook een reeks goede waarden met incidenteel een slechte. Op deze wijze wordt men in de praktijk echter wel, ook bij normaal te achten lasprocedures, vaak geconfronteerd met het bestaan van een gebied met een verlaagde ductiliteit naast de las, de zgn. "brosse zones".

In § 6.2.4 zijn waarden opgenomen voor hardheden die in de door de laswarmte beïnvloede zone moeten voorkomen, opdat men voldoende sterkte overhoudt.

A.5 Mogelijke defecten

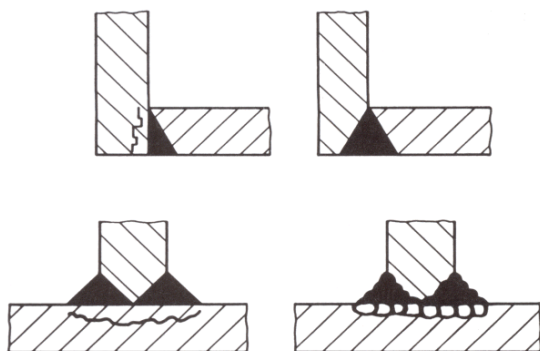
A.5.1 Inleiding

Over het algemeen moet er rekening mee worden gehouden, dat de kans op het optreden van defecten bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte groter is dan bij het lassen van normaal constructiestaal. Dit vanwege het feit dat de neiging tot harding en daardoor scheurvorming in de warmte beïnvloede zone en het lasmetaal groter is. Bovendien zal veelal het niveau van de krimpspanningen veel hoger zijn, waardoor het optreden van defecten die daarmee samenhangen (koudscheuren, lamellaire scheuren) in de hand wordt gewerkt. De mogelijke defecten kunnen doorgaans goed worden voorkomen door het treffen van een aantal maatregelen, waarvan de kosten maar een fractie bedragen van de anders noodzakelijke reparaties.

A.5.2 Lamellaire scheurvorming

Onder lamellaire scheurvorming verstaat men het optreden van trapsgewijs verlopende scheuren evenwijdig aan het plaatoppervlak onder lassen in starre constructies. Zij treden vooral op als een spanning vrijwel loodrecht op het plaatoppervlak uitwerkt. Dit verschijnsel kan optreden bij toepassing van staal dat verontreinigingen (silicaten en sulfiden) bevat die evenwijdig aan het plaatoppervlak zijn uitgewalst. Als gevolg hiervan is de vervormbaarheid van het staal in dikterichting zeer slecht. Tegenwoordig zijn er staalsoorten verkrijgbaar die een hoge mate van zuiverheid bezitten en daardoor vrijwel ongevoelig zijn voor dit verschijnsel. Dit zijn de staalsoorten met de zogenaamde "Z-kwaliteit". Toepassing hiervan is de voor de hand liggende oplossing in al die gevallen waarin met het optreden van lamellaire scheurvorming rekening moet worden gehouden.

In wat minder kritische gevallen kan worden volstaan met het kiezen van een zodanige voorbewerking, dat het optreden van zeer grote krimpspanningen loodrecht op het plaatoppervlak wordt voorkomen (zie figuur A.2)



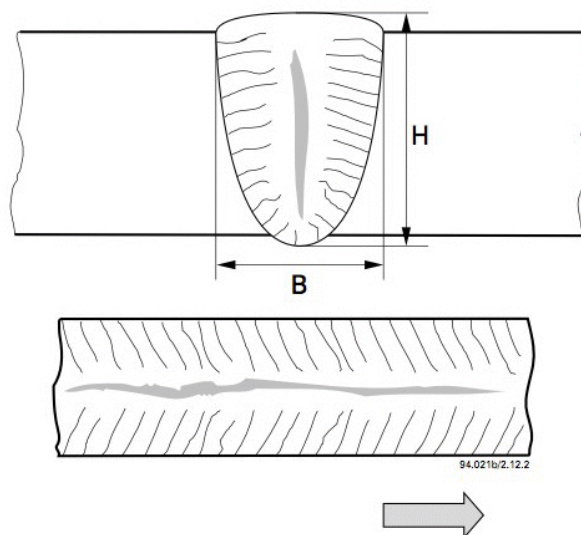
figuur A.2 Verschillende vormen van lamellaire scheurvorming en methoden ter voorkoming van dit verschijnsel door een geschikte keuze van de lasnaadvorm of door toepassing van een bufferlaag

Indien lamellaire scheurvorming in de praktijk optreedt, is het uitvoeren van bijzonder kostbare reparaties onvermijdelijk.

A.5.3 Warmscheurvorming

Warmscheurvorming is geen specifiek probleem bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte., hoewel het

hier ook kan optreden. De meest voorkomende vorm zijn de zgn. H/B scheuren (zie figuur A.3). Deze ontstaan indien bijvoorbeeld met onder poeder of MAG-lassen door de keuze van de lasnaadvorm en lasparameters een lasnaadvorm ontstaat met een ongunstige hoogte-breedte verhouding. Indien de hoogte groter of gelijk is aan de breedte van de las moet met het optreden van een warm-scheur in de lengterichting midden in de las rekening worden gehouden. Door aanpassing van de lasparameters kan dit worden voorkomen.



figuur A.3 Een H/B-scheur

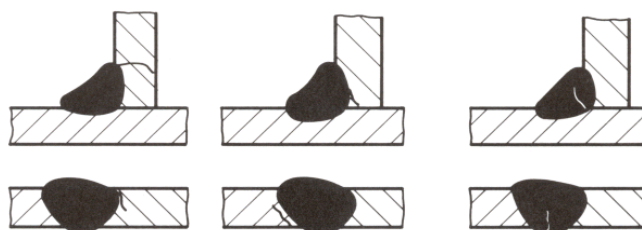
A.5.4 Koudscheuren

Bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte moet altijd rekening worden gehouden met de mogelijkheid van het optreden van zogenaamde koudscheuren in de warmte beïnvloede zone en/of het lasmetaal. Juist bij deze staalsoorten is een aantal factoren te onderkennen, die dit verschijnsel in de hand werken.

Een waterstofscheur of koudscheur treedt op als aan vier voorwaarden gelijktijdig wordt voldaan, namelijk:

- ▶ de aanwezigheid van harde en brose zones;
- ▶ de aanwezigheid van voldoende waterstof;
- ▶ het optreden van trekspanningen;
- ▶ temperaturen beneden 200 °C.

Koudscheuren kunnen zich op verschillende wijzen manifesteren in de warmte beïnvloede zone (zgn. underbead, root of toecracks) of in het lasmetaal zelf (dwarsscheuren, chevroncracks, microfissuring (zie figuur A.4).



figuur A.4 De meest voorkomende vormen van koudscheuren in lasmetaal en warmte beïnvloede zone

Hoewel er over het nauwkeurige mechanisme voor het ontstaan ervan nog veel onzekerheden bestaat, staat wel vast dat de scheurvorming een gevolg is van de aanwezigheid van een zekere hoeveelheid waterstof en een vol-

doend hoog spanningsniveau in een harde structuur. De scheuren ontstaan pas na afkoeling van de las tot beneden 150 °C, waarbij vaak een zekere vertraging kan worden geconstateerd. Een ogenschijnlijk scheurvrije lasverbinding kan zelfs na enkele dagen, d.w.z. soms zelfs na succesvolle non-destructieve inspectie, alsnog spontaan gaan scheuren. Indien dit onverwacht geschiedt, kunnen de gevolgen voor de veiligheid en de kostprijs van de constructie uitermate ingrijpend zijn.

A.5.4.1 *Harde structuren*

In § 6.2 is ingegaan op de structuur die ontstaat in de warmte beïnvloede zone na het lassen. Deze structuur bestaat voor een groot deel uit bainiet en martensiet, is hard en dus koudscheur bevorderend. Vandaar dat aandacht moet worden besteed aan de overige factoren die koudscheuren bevorderen.

A.5.4.2 *Waterstof*

Er moet in de praktijk van worden uitgegaan, dat de aanwezigheid van waterstof in het lasmetaal onvermijdelijk is. Waterstof wordt in het vloeibare lasmetaal vanuit de boogatmosfeer opgenomen. Veel van deze waterstof ontwijkt weer tijdens de afkoeling van het lasmetaal, maar de waterstofatomen kunnen ook gemakkelijk naar het basismateriaal diffunderen. Zeker naar voorkeursplaatsen zoals harde structuren.

Waterstof is de beslissende factor in de koudscheurvorming, zodat het van groot praktisch belang is, ervoor te zorgen dat zo min mogelijk waterstof in het lasmetaal terechtkomt en zoveel mogelijk kan ontwijken vóórdat de las is afgekoeld.

De voornaamste bronnen van de waterstof in de boogatmosfeer zijn het vocht in de elektrodebekleding, het vocht in de atmosfeer waarin wordt gelast (absoluut vochtgehalte), het laspoeder en het vocht dat in het toevoegmateriaal of beschermend gas bij het MAG-lassen aanwezig is. Verder kunnen andere stoffen die vocht bevatten in of op de toevoegmaterialen aanwezig zijn of op het oppervlak van het basismateriaal (bijvoorbeeld olie, vuil, vet, roest). Over het algemeen moet men er vanuit gaan dat, als geen bijzondere zorg aan toevoegmateriaal en lasuitvoering wordt besteed, het gehalte diffundeerbare waterstof van het lasmetaal al zeer snel hoog zal zijn (meer dan 20 ml per 100 g). Bij het lassen van ongelegeerd constructiestaal geeft dit weinig problemen, reden waarom men daar wat dit betreft nog vrij zorgeloos te werk kan gaan. Bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte leidt een dergelijke zorgeloosheid al snel tot grote schades. Zo is men hier niet alleen vrijwel verplicht met gedroogde, dan wel vacuümverpakte basische elektroden te werken, maar ook moet er veel zorg aan worden besteed dat het gewenste lage waterstofgehalte ook werkelijk wordt gerealiseerd en niet wordt tenietgedaan door onzorgvuldige opslag van de elektroden, slechte voorbereiding en verontreiniging van de laskanten en dergelijke.

A.5.4.3 *Spanningsniveau*

In de lasverbinding zijn altijd hoge spanningen aanwezig als gevolg van krimp van het lasmetaal tijdens afkoeling. Bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte kunnen deze spanningen extra hoog oplopen door de hoge rek-grens van het lasmetaal. Het is dus altijd gunstig om deze zo laag als praktisch mogelijk is te kiezen. Ook een slechte passing met te grote vooropening kan een extra bron van spanningen en spanningsconcentraties zijn.

A.5.4.4 *Vermijden van koudscheurvorming in de praktijk*

Ter voorkoming van koudscheurvorming kunnen verschillende maatregelen worden getroffen. Verhoging van de warmte-inbreng heeft altijd een gunstig effect, doch de mogelijkheden hiertoe blijken in de praktijk toch maar zeer beperkt te zijn. De meest gebruikte methoden ter voorkoming van koudscheuren zijn het kiezen van een bepaalde voorwarmtemperatuur en een lastoevoegmateriaal met een laag waterstofgehalte.

Voorwarmen is in de praktijk een zeer impopulaire maatregel, daar het kostbaar is en bovendien de arbeidsomstandigheden zeer verslechtert. Welke voorwarmtemperatuur moet worden toegepast hangt bovendien af van het koolstofequivalent en de dikte van het te lassen staal. In de norm NEN EN 1011 zijn grafieken opgenomen, waarmee de voorwarmtemperatuur in afhankelijkheid van het koolstofequivalent, de te lassen plaatdikte en de warmte-inbreng kan worden bepaald. Hierbij dient men zich ook nog te realiseren dat in de praktijk afkoeling van de las sterk kan worden versneld door luchtstromingen bijvoorbeeld als gevolg van tocht. Denk daarbij ook aan de koude luchtstroom die bij perslucht aangedreven slijptollen uit de uitstroomopening komt.

De sterke verlaging van het koolstofequivalent van de moderne thermo-mechanisch behandelde staalsoorten geeft wat dit betreft meer zekerheid. Echter, bij de huidige lage koolstofequivalenten van de staalsoorten met hoge sterkte en de sterke vermindering van de gevoeligheid voor scheurvorming in de warmte beïnvloede zone, dient men er wel op bedacht te zijn dat de zwakste schakel hierdoor kan verschuiven van de warmte beïnvloede zone naar het lasmetaal zelf. Bij de huidige goed lasbare staalsoorten met hoge sterkte is de kans groter dat scheurvorming in de las optreedt en dat de warmte beïnvloede zone nog heel blijft. Vooral bij dikke lassen, bijvoorbeeld gelegd onder poeder, waaruit de waterstof niet zo snel kan weg diffunderen, kan een zeer onacceptabele vorm van scheuren optreden, de zogenaamde chevroncracking.

De beste en goedkoopste methode om dit soort defecten in de praktijk te voorkomen, is te zorgen voor een zo laag mogelijk waterstofgehalte in het lasmetaal, door een goede keuze van toevoegmateriaal, zorgvuldige opslag en transport en een goede voorbereiding van het laswerk, in het bijzonder vermindering van vocht, vet, roest en dergelijke. Dit geldt zowel voor het lassen met beklede elektroden, het MAG-lassen, alsook voor het onder poeder lassen.

Ook kan aansluitend aan het lassen een waterstofgloeibehandling worden doorgevoerd. Dit gebeurt bij ca. 200 °C gedurende 2 uur. Deze warmtebehandeling wordt ook wel "soaken" genoemd.

Ook moet aandacht worden geschonken aan de lasnaadvoorbewerking, alsook het vullen van de lasnaad. Door een goede lasvolgorde te bepalen en aan te houden kunnen de spanningen gelijkmatig worden verdeeld over de verbinding en kunnen piekspanningen worden vermeden.

Een veel gehoord bezwaar tegen de toepassing van staalsoorten met hoge sterkte is, dat het niet mogelijk is er bevestigingsmiddelen en dergelijke zonder meer aan vast te lassen. Dit is inderdaad een aspect waarmee men rekening dient te houden. Ook hier kunnen alleen acceptabele resultaten worden verwacht, wanneer basische elektroden met een zeer laag waterstofgehalte worden toegepast of MAG-lassen met een droog beschermgas (dauwpunt van minimaal -60 °C) en een schoon toevoegmateriaal. Indien bijvoorbeeld ongelegeerde rutielelektroden voor dit doel worden gebruikt, kan vrijwel zeker scheurvorming onder of in de las worden verwacht.

A.6 *Invloed van een spanningsarmgloeïing op de mechanische eigenschappen van de lasverbinding*

Bij de verwerking van staalsoorten met hoge sterkte wordt vaak een warmtebehandeling in een temperatuurgebied tussen 550 en 650 °C (voor Q/T is 650 °C te hoog) van de gelaste verbinding voorgeschreven, in het bijzonder wanneer de dikte van het te lassen materiaal een zekere waarde (bijvoorbeeld 50 mm) overschrijdt. De bedoeling hiervan is verlaging van de inwendige spanningen die in de lasverbindingen aanwezig zijn en die het effect van de spanning tijdens het gebruik van de constructie kunnen versterken. Bovendien kunnen door een dergelijke behandeling de eigenschappen van de las- en warmte beïnvloede zone worden verbeterd.

Wat de warmte beïnvloede zone betreft kan spanningsarmgloeïen een gunstig effect hebben op eventueel aanwezige harde zones. Deze worden enigszins ontlaten, hetgeen doorgaans een goede fijnkorrelige structuur oplevert met sterk verminderde hardheid en verbeterde taaheid. Eventueel nog aanwezige waterstof wordt door een gloeibehandeling op afdoende wijze verwijderd. Bovendien is de ontlaten structuur niet meer gevoelig voor een koudscheurvorming geïnduceerd door waterstof, die tijdens het gebruik van de constructie, bijvoorbeeld als gevolg van corrosie, zou kunnen ontstaan.

De grofkorrelige "brosse zones", die als gevolg van een langzame afkoeling ontstaan in de warmte beïnvloede zone van de lasverbinding, worden als regel niet verbeterd door een dergelijke gloeibehandeling. Afhankelijk van de samenstelling van het staal moet rekening worden gehouden met een verdere verslechtering.

Hiervoor zijn moeilijk algemene regels te geven. Bekend is dat vooral staalsoorten met een betrekkelijk hoog fosforgehalte eventueel in combinatie met een hoog mangaanen siliciumgehalte, wat dit betreft ongunstig zijn. Ook het gecombineerde gebruik van vanadium en niobium als microlegeringselementen kan een nadelig effect hebben. De in het lasmetaal eventueel nog aanwezige waterstof zal door spanningsarmgloeïen grondig worden verwijderd, zodat na de gloeïing zeker geen nieuwe door waterstof veroorzaakte defecten meer kunnen ontstaan.

Men dient er rekening mee te houden dat de rekgrens en de treksterkte van het lasmetaal meestal enigszins dalen, zodat men bij de keuze van de lastoevoegmaterialen reserve moet inbouwen, wil men niet het risico lopen dat de rekgrens en treksterkte van het lasmetaal na gloeïing onvoldoende blijken te zijn. Ook de vervormbaarheid zoals gemeten met kerfslagproeven of CTOD-proeven wordt beïnvloed door de gloeibehandeling. Afhankelijk van de samenstelling van het lasmetaal kan deze beïnvloeding gunstig of ongunstig uitwerken.

Uiteraard trachten de leveranciers van lastoevoegmaterialen de samenstelling van hun producten zodanig te kiezen, dat geen verslechtering van de taaheid bij de gloeibehandeling optreedt. Dit is echter niet altijd te vermijden. De opmenging met het basismateriaal speelt hierbij ook een rol.

Zo moet bijvoorbeeld in veel lastoevoegmaterialen nikkel worden gebruikt, om een voldoende hoge taaheid te verkrijgen. Naarmate het nikkelgehalte hoger is, blijkt de ductiliteit onder invloed van de gloeibehandeling sterker terug te lopen. Aangezien dit effect sterker wordt naarmate de gloeitemperatuur hoger is, verdient het in die gevallen aanbeveling de gloeitemperatuur zo laag als mogelijk is te kiezen.



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