



Damstahl®
stainless steel solutions

Rustfrit stål og korrosion

Claus Qvist Jessen

RUSTFRIT STÅL OG KORROSION

af Claus Qvist Jessen

Rustfrit stål og korrosion
af Claus Qvist Jessen

1. udgave, 1. oplag 2011

© 2011 Damstahl a/s
All rights reserved

Redaktion Claus Qvist Jessen og Damstahl a/s

Layout og illustrationer Rune Bøttzauw

Foto Claus Qvist Jessen

Omslagsfoto Claus Qvist Jessen / Damstahl a/s

Omslag Lia Johnsson / KAN AB

Tryk Forlaget Møller & Nielsen

Sats og ombrydning Forlaget Møller & Nielsen

Gengivelse eller reproduktion af indholdet er ikke tilladt,
medmindre der foreligger skriftlig tilladelse fra Damstahl a/s

www.damstahl.dk

ISBN 978-87-92765-00-0

Printed in Denmark 2011



FORORD

For de fleste mennesker er rustfrit stål et brugsmetal med en masse fine egenskaber. Det er smukt og blankt, det er let at rengøre, det giver en aura af kvalitet, og så er det lige så rustfrit, som navnet siger. Eller er det? Desværre ikke altid, for selvom rustfrit stål i langt de fleste tilfælde forbliver både smukt og rustfrit, går det af og til galt, og stålet begynder at ruste. Og hvorfor så det?

Graver man i litteraturen for at finde en forklaring, havner man gerne i en tung og kryptisk ingeniørverden fuld af kedelige ligninger og triste formler, mens det er ret begrænset, hvad der findes, som også kan læses af "almindelige mennesker". Denne bog er et forsøg på at lappe hullet, for modsat næsten alle andre værker om rustfrit stål, korrosion og metallurgi er den ikke skrevet til færdiguddannede ingeniører. I stedet henvender bogen sig til den faglærte håndværker, der ønsker at udvide sin rustfri horisont.

Uanset målgruppen bliver ingen bog skrevet i et vakuum, og især skal lyde en stor tak til Damstahls adm. direktør, Mikael Sthaalros, som lider af samme smitsomme sygdom som jeg selv: Teknisk viden er både spændende og interessant, og spændende viden skal deles – og helst på en lidt sprællende måde, så læserne ikke falder i søvn undervejs. Viden er ikke meget værd, hvis ikke den spredes de rette steder.

På det faglige plan skylder jeg stor tak til især Erik-Ole Jensen, Arla Foods amba, og professor Per Møller fra MEK, DTU, og også Torben Henriksen, Migatronik A/S, Jesper Nielsen, Preben Z. Jensen A/S, Jon Kold, Stålcetrum, har leveret værdifulde input til bogen. Ydermere vil jeg gerne takke mine gamle kolleger på FORCE Technology og Cleanodan A/S / Steel-Tech ApS, begge Brøndby, for godt og konstruktivt fagligt pingpong. Det er svært at være ekspert inden for alt, og jeg bliver aldrig for gammel til at lære.

Oveni skal der lyde en stor tak til alle mine gode kolleger hos Damstahl samt Damstahls mange kunder og kursister, som gennem de seneste fire år har bombarderet mig med så mange konstruktive spørgsmål, at der nu er kommet en hel bog ud af svarene. Det er ikke nogen skade til at bygge bro mellem videnbegærlige kunder og Damstahls rustfri hjerneceller.

Sidst, men ikke mindst, fortjener min kone, Annette, stor tak for grænseløs tålmodighed med det seneste års skrivermæssige udskejelser. Ikke nok med at det rustfri skriveri har trukket på de hjemlige og til tider meget natlige veksler – Annette har også måttet leve med at få sit private køkkenbord besat af solide mængder af rustfrit stål udsat for dekorative korrosionsangreb. Der er intet som et flot angreb af grubetæring eller spændingskorrosion mellem hakket kød, salat og løg.

Skanderborg, marts 2011

Claus Qvist Jessen

cqj@damstahl.com
www.damstahl.dk

MIKAEL STHAALROS



VÆRS'GO'

Nogle sidder måske med bogen i hånden og tænker:
“Hvorfor koncentrerer Damstahl sig ikke bare om at sælge stål i stedet for at udgive en bog?”

Svaret er enkelt:
Fordi vi vil være verdens bedste til at have kunder!

Og det kræver:
At vi bidrager maksimalt til vores kunders konkurrenceevne og indtjening.
At vi som samarbejdspartnere vil meget mere end bare køb og salg.
At vi stiller vores store talentmasse til rådighed for vores kunder - Damstahl er fyldt med spændende, vidende og erfarne mennesker.

Jeg er glad for, at Claus påtog sig opgaven at “tømme sit lyse hoved” og dele sin store og omfattende viden med os alle. Generøst.

Jeg er taknemmelig for, at Claus har skrevet på sit levende og inspirerende sprog, så også jeg kan forstå det.

Jeg er stolt over hermed at overdrage bogen til dens brugere
- alle med interesse for rustfrit stål.

I vind og vejr

Mikael Sthaalros

adm. koncerndirektør, CEO
Damstahl a/s

PER MØLLER



Pas godt på den!

“Rustfrit stål og korrosion” er en bog, der er værd at eje, hvad enten man er håndværker, studerende, arkitekt, ingeniør eller måske endda materialeforsker. Bogen starter med et indblik i de rustfri ståls hovedgrupper og anvendelser. Dernæst bevæger bogen sig over i metallurgien, hvor bl.a. Schöffler-diagrammet introduceres. Efter en beskrivelse af de mekaniske egenskaber for de forskellige ståltyper gennemgår bogen de enkelte legeringselementers rolle. Naturligvis med særligt fokus på legeringselementet nikkel, hvis pris de seneste år har fået priserne på rustfrit stål til at himelflugte. Når noget sådant sker, spørger mange: ”behøver man nikkel i rustfrit stål?” – dette spørgsmål besvarer bogen på en ganske god og nuanceret måde.

Så kommer vi til korrosion.

Korrosion koster rigtig mange penge og udgør i størrelsesordenen 5 % af et lands nationalprodukt. Helt undgå korrosionsskader kan man næppe, men undersøgelser viser, at omkostninger til korrosion kan reduceres med signifikante beløb, helt op mod 30 %, hvis den nødvendige viden er til stede. Forfatteren har derfor god grund til at dedikere tæt ved en tredjedel af bogen til dette problem. Her er nemlig bogstavelig talt penge at hente ved den rigtige indsats.

Kapitel 8 giver hjælp til alle, der har behov at komme sikkert gennem junglen af Werkstoff-Numre og EN-betegnelser. Kapitlet følges op af en gennemgang af leveringsformerne for rustfrit stål med fokus på alt fra overfladetilstand for plader og coils over rør til fittings.

Bearbejdning er næste naturlige fokusområde. Bogen illustrerer nemlig klart, at man selv efter indkøb af det optimale materiale hurtigt kan møde nye problemer. Det gælder ikke mindst, hvis materialet skal svejses – men også simple operationer som klipning, savning og skæring byder på udfordringer.

Efter bearbejdningen kommer man til overfladebehandlingen, hvad enten den udføres mekanisk, kemisk eller elektrokemisk. Her berører bogen alt fra slibning over bejdsning og passivering til elektropløring.

Helt symbolsk har kapitel 13 fået overskriften ”Når ulykken er sket”. Et kapitel, der efterfølges af tips og gode råd til kontrol ved både forebyggelse og helbredelse af korrosionsskader. Til slut er bogen forsynet med ordbog og ordforklaringer samt nyttige henvisninger - en god hjælp til det fuldstændige overblik.

Bogen er skrevet i et underholdende sprog. Det er næsten som at høre forfatteren selv tale. Han forsøger at holde læseren fanget og lader ikke denne ”gå”, før budskabet er afleveret. Det er svært at lægge bogen fra sig – den er spækket med nyttig information, information som alle bør have adgang til.

Der bør dog lyde en advarsel til nybagte ejere af bogen: Pas godt på den! Det er den slags bøger, man ikke skal låne ud. Man får den aldrig igen!

Per Møller

Professor i korrosion og overfladeteknologi
Institut for Mekanisk Teknologi (MEK)
Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby

INDHOLDSFORTEGNELSE

INDLEDNING	1
1. RUSTFRIT STÅLS HISTORIE	7
1.1 Harry Brearlys riffelløb	7
1.2 Tyske austenitter og storpolitiske manganstål	8
1.3 Nordsøolie og superstål	9
1.4 Nutidens nikkelfri ferritter	10
2. TYPER OG ANVENDELSER AF RUSTFRIT STÅL	13
2.1 Austenitisk, rustfrit stål	13
2.2 Martensitisk, rustfrit stål	15
2.3 Ferritisk, rustfrit stål	17
2.4 Duplex, rustfrit stål	20
2.5 Udskilleleshærdende, rustfrit stål	22
3. RUSTFRIT STÅLS METALLURGI	25
3.1 Rustfri strukturer	25
3.2.1 Schäffler-diagrammet	26
3.2 Hærdningsmekanismer	28
3.2.1 Martensithærdning	28
3.2.2 Andre hærde mekanismer	29
3.3 Styrke og hårdhed	30
3.3.1 Styrkeforhold for forskellige legeringer	33
3.3.2 Styrke kontra temperatur	35
3.3.3 Sejhed og sprødhed	36
3.4 Termiske forhold	38
4. RUSTFRIT STÅLS LEGERINGSELEMENTER	41
4.1 Legeringselementer	41
4.2 Legeringselementer, sammenfatning	49

5. KORROSION GENERELT	51
5.1	Hvad er korrosion? 51
5.2	Elektronoverførsel 53
5.3	Spændingsrækken 54
5.3.1	Ædle og uædle metaller 56
5.4	Korrosionspotentialt / blandingspotentialt 57
5.4.1	Mediets betydning for spændingsrækken 58
5.4.2	Mediets elektriske ledningsevne 60
5.5	Galvanisk kobling 62
5.5.1	Arealforhold og katodisk beskyttelse 64
5.5.2	Elektrolytten – galvanisk kobling over og under vandlinjen 66
5.6	Passivitet 66
5.6.1	Korrosion af passiverbare legeringer 68
5.6.2	Når passiviteten slår fejl 69
5.6.3	Fiskelinesyndromet 70
6. RUSTFRIT STÅLS KORROSIONSFORHOLD	73
6.1	Generel korrosion 74
6.1.1	Isokorrosionsdiagrammer 75
6.1.2	Miljøfaktorer i syrer 77
6.1.3	Legeringselementernes effekt på generel korrosion 79
6.1.4	Generel korrosion i stærkt alkaliske medier 81
6.1.5	Transpassivitet og vagabonderende strømme 82
6.2	Grubetæring 83
6.2.1	Miljøfaktorer ved grubetæring 85
6.2.2	Kritisk pittingtemperatur (CPT) 85
6.2.3	Korrosionspotentialt og pH 88
6.2.4	Urenheder, salte og andre ukendte faktorer 90
6.2.5	Legeringselementernes effekt mod grubetæring 92
6.2.6	Pitting Resistance Equivalent, PREN 93
6.2.7	Flyverust 97
6.2.8	Ferritiske rustfri stål og nikkellegeringer 98
6.3	Spaltekorrosion 100
6.3.1	Mikrobielt induceret korrosion (MIC) 103
6.3.2	Bekæmpelse af spaltekorrosion 105
6.4	Spændingskorrosion 107
6.4.1	Mekaniske trækspændinger 109
6.4.2	Miljøfaktorer ved spændingskorrosion 111
6.4.3	Legeringselementernes indflydelse på spændingskorrosion 113

6.5	Interkrystallinsk korrosion	115
6.5.1	TTS-diagrammer og stålets kulstofindhold	116
6.5.2	Titanstabiliserede, rustfri stål	118
6.5.3	Interkrystallinsk korrosion – hvilke medier?	119
6.6	Tid	120
6.7	Kan man stoppe et korrosionsangreb i rustfrit stål?	121
6.8	Rustfrit stål i kontakt med andre metaller	124
6.8.1	Rustfrit stål og andre metaller over vandlinjen	126
6.9	Rustfrit stål til fødevarer	128
6.9.1	Ståltyper til fødevarer	128
6.9.2	Registrering og godkendelse	130
6.9.3	Hygiejnisk design og drift	130
7.	KORROSION OVER VANDLINJEN	133
7.1	Miljøet over vandlinjen	133
7.2	Grubetæring over vandlinjen	134
7.2.1	Kontakttiden	136
7.2.2	Konstruktions- og vejmæssige forhold	138
7.2.3	Inddampning og kritisk luftfugtighed	139
7.3	Indendørs forhold	140
7.4	Spændingskorrosion over vandlinjen	141
8.	RUSTFRI STANDARDS	145
8.1	EN/W.Nr.-systemet	146
8.1.1	Kurznahmen	149
8.1.2	Legeringstabel, EN-systemet	149
8.1.3	W.Nr. til EN	154
8.2	AISI-systemet	154
8.3	UNS-systemet	158
8.4	Det svenske SS-system	159
8.5	Sammenligning af standarder	161
8.5.1	Sammenligning af syrefaste stål	163
8.6	Støbelegeringer	165
8.7	Standarder for bolte og skruer	167
9.	LEVERINGSFORMER OG –STANDARDER	169
9.1	Plader og coils	169
9.1.1	Overfladetilstand, plader	170
9.1.2	Mønstervalsede og farvede rustfri plader	174

9.2	Rør	175
9.2.1	HF-svejste og Super Dairy-rør	177
9.2.2	Sømløse rør	179
9.2.3	Profilrør og emnerør	180
9.3	Lange produkter	181
9.4	Fittings	182
9.4.1	Pressfittings	183
9.5	Normoversigt	184
9.6	Certifikater	185

10. BEARBEJDNING AF RUSTFRI STÅL 219

- Konsekvenser for korrosionsbestandigheden

10.1	Svejsning, de korrosionsmæssige konsekvenser	192
10.1.1	Svejsemetallet / valg af tilsatstrå	193
10.1.2	Svejsning af materialekombinationer	195
10.1.3	Geometriske problemer ved svejsning	197
10.1.4	Opvarmning, karbiddannelser og intermetalliske faser	199
10.1.5	Anløbninger	202
10.1.6	Referenceatlas	205
10.1.7	Baggas: Argon og formier	207
10.1.8	Forbehandling af rør	209
10.1.9	Anløbninger kontra bejdsning	212
10.1.10	De fysiske forhold for svejseren	213
10.1.11	Svejsning og bukning af ferritiske, rustfri stål	213
10.2	Klipning, savning og andre skæremetoder	215
10.2.1	Vinkelslibere og svejsesprøjt	216
10.3	Håndtering, transport og risikoen for jernafsmitninger	218
10.4	Designmæssige forhold og korrosionsbestandighed	219
10.4.1	Drænbarhed	220
10.4.2	At undgå spalter	221
10.4.3	Varmetransmission	221
10.4.4	Kuldebroer og kondens	223

11. MEKANISK OVERFLADEBEHANDLING 225

11.1	Slibning, børstning og polering	227
11.1.1	Slibetips og fiduser	229
11.1.2	Ulemper ved slibning	230
11.1.3	Overfladeruhed og ruhedsprofiler	231
11.2	Blæsning og slyngrensning	236

12. KEMISK OG ELEKTROKEMISK OVERFLADEBEHANDLING _____ **241**

12.1	Bejdsning	242
12.1.1	Sammensætning af bejdsebadet	244
12.1.2	Flussyre vs. saltsyre	246
12.1.3	Dyppe- og badbejdsning	248
12.1.4	Spray- og pastabejdsning	250
12.1.5	Bejdsning i praksis; fordele, ulemper og staldfiduser	252
12.1.6	Elektrolytisk bejdsning	257
12.2	Passivering	259
12.2.1	Passiveringsbadet	259
12.3	Dekontaminering	260
12.3.1	Bade til dekontaminering	261
12.3.2	Jernafsmitninger og rouge	261
12.4	Elektropolering	264
12.4.1	Bade og virkemåde	265
12.4.2	Hvilke ståltyper og emner kan elektroteres?	269
12.4.3	Fordele og ulemper ved elektropolering	270
12.4.4	Anvendelser af elektropolering	271
12.5	Kemisk overfladebehandling, sammenfatning	272
12.6	Elektrolytisk pålægning af metaller	273

13. NÅR ULYKKEN ER SKET _____ **277**

- bestemmelse og reparation af korrosionsskader i rustfrit udstyr

13.1	Bestemmelse af årsagen til korrosionen	277
13.2	Reparation af korrosionsskader, hvornår?	278
13.3	Korrosionsskader, generel korrosion	279
13.3.1	Reparation af korrosionsskader, generel korrosion	280
13.4	Korrosionsskader, grubetæring	281
13.4.1	Reparation af korrosionsskader, grubetæring	284
13.5	Korrosionsskader, spaltekorrosion	286
13.5.1	Reparation af korrosionsskader, spaltekorrosion	287
13.6	Korrosionsskader, spændingskorrosion	288
13.6.1	Reparation af korrosionsskader, spændingskorrosion	290
13.7	Korrosionsskader, interkrystallinsk korrosion	291
13.7.1	Reparation af korrosionsskader, interkrystallinsk korrosion	292

14. KONTROL	295
14.1 Materialekontrol	295
14.1.1 PMI	295
14.1.2 Molybdæntest	299
14.2 Kontrol af forarbejdning; optiske metoder	300
14.2.1 Visuel inspektion og endoskopi	300
14.2.2 Kapillar- og penetrantprøvning	302
14.3 Kontrol af forarbejdning; elektriske og radiografiske metoder	304
ORDFORKLARING	307
DANSK-ENGELSK ORDBOG	317
ENGELSK-DANSK ORDBOG	319
REFERENCER	323
FIGURLISTE	327
TABELLISTE	333
STIKORDSREGISTER	335
FORFATTERBESKRIVELSE	357

INDLEDNING

Rustfrit stål er en stor gruppe af *passiverbare* legeringer, der alle sammen har det til fælles, at hovedelementet er jern (Fe), og at det indeholder mindst 10-12 % krom (Cr). Selvom Cr som udgangspunkt er mere *uædelt* end jern, bevirker de 10-12 % Cr, at stålet flytter sig fra at være en normal, aktiv legering, der passer ind i spændingsrækken, til at være en effektivt passiverbar legering med langt bedre korrosionsegenskaber.

Netop passiviteten gør rustfrit stål til et herligt materiale! Kombinationen mellem en god korrosionsbestandighed, en rimelig pris, et attraktivt udseende og en høj grad af bearbejdelighed har for længst gjort rustfrit stål til den hyppigst anvendte materialegruppe inden for alle mulige "kritiske" anvendelser. Rustfrit stål er et globalt "hit", og det er ikke nogen tilfældighed, at netop rustfrit stål er ekstremt populært inden for mejerier, slagterier, medicinalindustrien, den kemiske industri, husholdninger, raffinaderier, byggeri og design. Kort sagt alle steder, hvor man ønsker et attraktivt, blankt look kombineret med god korrosionsbestandighed og rengøringsvenlighed. Rustfrit stål må være det tætteste, man kommer på et korrosionsbestandigt universalmateriale til alt fra postkasser til gigantiske bygninger.

*Rustfrit stål
er ideelt
til kritiske
anvendelser*

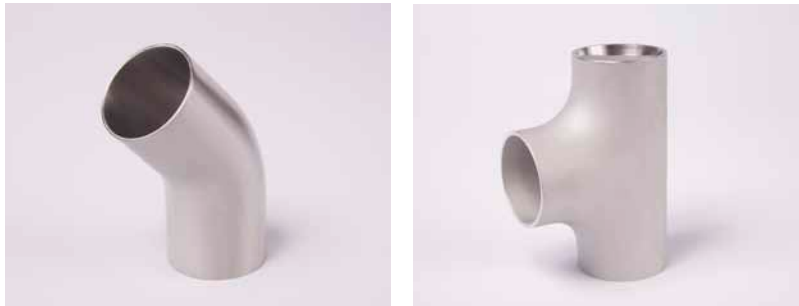


Figur 0.1: *Atomium er Bruxelles' vartegn og viser jernatomets kubisk rumcentrerede struktur (BCC). Kunstværket er 105 meter højt og blev oprindeligt lavet i aluminium til Verdensudstillingen i 1958. I 2005 blev beklædningen ændret til syrefast 4404 (1,2 mm plader) leveret af Aperam. Foto: Thomas Pauly, Euro-Inox [11].*

*Global
produktion af
rustfrit stål*

Rustfrit ståls fantastiske potentiale ses på både produktionen og forbruget. Verdensproduktionen (målt som smeltet stål) lå i 2001 på 19,2 mio. tons og i 2006 helt oppe på 28,4 mio. tons. Den globale afmatning i 2008-2009 medførte ganske vist en opbremsning af både forbrug og produktion, og de tilsvarende tal for hhv. 2007, 2008 og 2009 ligger på 27,6, 25,9 og 24,6 mio. tons [6], men i løbet af 2010 steg produktionen igen. Alene de tre første kvartaler i 2010 lå den på tilsammen godt 23 mio. tons, så der er ingen tvivl om, at rustfrit stål er og bliver fremtidens materiale.

Mens verdensproduktionen altså har været langsomt stigende gennem de seneste 10 år, er der i den grad blevet rørt rundt i bøtten med hensyn til produktionslandene. I 2001 stod Vesteuropa for 8,21 mio. tons, mens "Americas" (verden vest for Atlanten!) og Asien lå på hhv. 2,29 og 8,40 mio. tons. I 2009 lå de tilsvarende tal på hhv. 6,44, 1,96 og 7,13 mio. tons, mens Kina alene var spurtet op til 8,81 mio. tons, så Asien totalt lå på 15,94 mio. tons. Selv den rustfri verden peger mod øst, og der er ikke mange tegn på, at denne udvikling stopper lige med det samme.



Figur 0.2: *Produktionen af fittings er de senere år nærmest eksploderet i Kina. Både 45° mejeribøjningen (venstre) og t-stykket (højre) er fremstillet i netop Kina. Foto: Kenneth Stig Mortensen, Damstahl a/s.*

*Rustfrit stål er
kun "betinget
rustfrit"*

Desværre er selv ikke rustfrit stål 100 % sikkert. Trods sit forpligtende navn er stålet nemlig langt fra rustfrit under alle tænkelige forhold. Rustfrit stål er kun *betinget rustfrit* og skal behandles med omtanke, for at man kan få det bedste ud af det. Rustfrit stål minder på den måde meget om en god bil, for selvom en spritny Rolls Royce har masser af fine egenskaber, er den stadig ikke immun over for skader. Det hjælper gevaldigt på levetiden, hvis man behandler den korrekt, og sådan er det også med metaller og legeringer. De skal behandles korrekt.

Dette gælder også rustfrit stål. Man skal vælge det rigtige stål til det rigtige formål, man skal bruge den rigtige metode til sammenføjning, og man skal bruge den rigtige mekaniske og den rigtige kemiske efterbehandling. Og selv når alt dette er opfyldt, skal brugeren af udstyret sikre sig, at stålet ikke udsættes for noget, det ikke kan tåle. I modsat fald kan stålet let gå hen og blive langt mindre rustfrit, end det var tilsigtet.

Rustfrit stål er et enten-eller-materiale

For folk, der er vant til at arbejde med lavtlegeret, sort stål, kan overgangen til rustfrit være lidt af et kulturchok. Brugen af sort og galvaniseret stål indebærer oftest en "kalkuleret risiko", idet ens udstyr langsomt vil nedbrydes af korrosion, og man kan beregne levetiden, hvis man kender korrosionshastigheden. Rustfrit stål derimod er i meget højere grad et "enten-eller-materiale". Enten går det godt, og udstyrets levetid er nærmest uendelig. Eller også går det skidt, og levetiden bliver meget, meget kort.

Denne enten-eller-opførsel gør også, at konsekvenserne for fejlbehandling er langt større ved rustfrit stål end ved sort eller galvaniseret stål. Laver man en fejl ved en galvaniseret konstruktion, betyder det måske en reduktion i levetiden fra 20 til 15 år, mens en fejl i en rustfri konstruktion kan reducere levetiden fra evigheder til få måneder. Rustfrit stål er et mere "krakilsk" materiale end galvaniseret eller sort stål, og kravene til de forskellige led i kæden bliver tilsvarende større.

For at få det maksimale ud af rustfrit stål er det derfor en stor fordel at vide noget om det materiale, man sysler med. F.eks.:

- Hvorfor er "syrefast stål" bedre end "almindeligt rustfrit"?
- Findes der stål, der er mere korrosionsbestandige end syrefast?
- Hvorfor kan man ikke tillade blålige anløbninger omkring svejsningerne?
- Hvorfor er rodfejl og bindingsfejl alvorlige, korrosionsmæssige svækkelser?
- Hvorfor er begroninger ikke heldige?
- Hvorfor er almindeligt havsalt så pokkers korrosivt?
- Hvorfor opstår der revner lige ved siden af svejsningerne i stedet for midt i dem?
- Hvorfor er det en fordel at bruge lavkulstofstål?
- Hvorfor er jernafsmitninger ikke kun kosmetisk uheldige?
- Hvorfor er grove slibninger værre end fine?
- Hvad indebærer en bejdsning, og hvorfor bør man bejds efter svejseprocessen?



Figur 0.3: *Med sine 828 meter fordelt på 162 etager er Burj Khalifa i Dubai verdens højeste bygning og samtidig en af planetens mest imponerende konstruktioner. Grundet risikoen for salt fra havet er store dele af bygningen lavet af syrefast, rustfrit stål af typen 4404.*

*Konstruktiv
dovenskab: Lav
tingene rigtigt
første gang*

Rustfrit stål er en videnskab, som rummer masser af spørgsmål. Jo mere man ved om det materiale, man arbejder med, desto lettere er det dog at undgå alvorlige fejltagelser, og jo lettere er det at have tilfredse kunder. Konstruktiv dovenskab er at lave tingene rigtigt første gang, og de følgende kapitler skulle meget gerne være et godt skub i den rigtige retning.

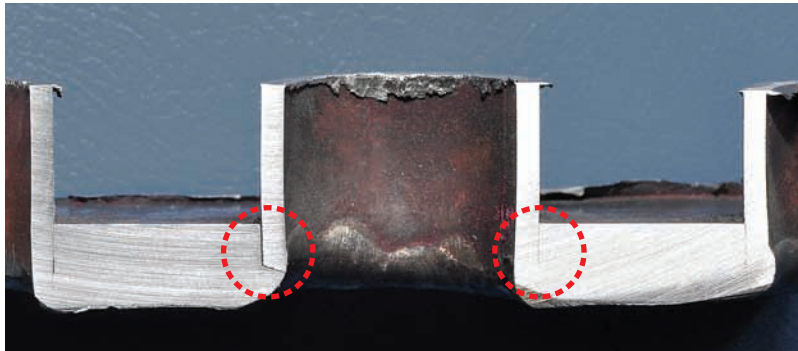
Næsten alle bøger, der er lavet omkring emnerne rustfrit stål og/eller korrosion, er lavet til ingeniører eller ingeniørstuderende, mens det kan være svært at finde noget læsbart for mere praktisk orienterede håndværkere. For at råde bod på dette har forfatteren forsøgt at undgå alt for mange, alenlange formler og i stedet krydret teksten lystigt med en syndflod af mere eller mindre dekorative korrosionsskader. Eksemplets magt er ikke at foragte, og man kan så udmærket lære af tidligere tiders fejltagelser.

Inden vi går videre med det rustfrie stål, skal lige falde et par ord om navngivning. Om man kalder vores hovedemne, rustfrit stål, for rustfrit eller rustfast, synes mest at være et geografisk spørgsmål. Øst for Storebælt er stålet *rustfrit*, og det samme gælder det meste af Fyn og store dele af Jylland, men så snart vi bevæger os nordpå, begynder stålet at være *rustfast*. Om det skal hedde rustfrit eller rustfast, vil redaktionen overlade til teoretikerne, men for ikke at skulle jonglere med alt for mange betegnelser har vi valgt at holde os til det *rustfri*. Stort undskyld til Nordjylland og andre rustfaste regioner i landet.

Oveni er det jo for de fleste smede og mange ingeniører sådan, at rustfrit stål er mere eller mindre synonymt med "type 304" eller "syrefast type 316". Begge navne der er hentet fra det antikke, men ualmindeligt sejlivede AISI-system, som i bedste fald må anses for at være ude af trit med virkeligheden. Det er lidt som stadigvæk at omtale en knallert som "cykel med hjælpemotor", for AISI har ikke klassificeret nogen nye ståltypen siden en gang i 60'erne. At mange fagfolk stadig anvender AISI-betegnelserne, er i bedste fald lidt gammeldags og i værste fald misvisende.

I stedet for AISI-numrene anvender redaktionen derfor som hovedregel de europæiske EN-numre, der i sin tid blev bygget på grundlag af de gamle, tyske Werkstoff Numre, W.-Nr. Et rustfrit stål klassificeret efter EN-systemet vil hedde f.eks. EN 1.4301, men for en nemheds skyld har vi i de fleste tilfælde udeladt "EN 1." og nøjes med at kalde stålet "4301". Til læsere, der savner en slags "oversættelse" mellem de klassiske AISI-numre, er der hjælp at hente i Tabel 8.3 side 153.

6.3 Spaltekorrosion

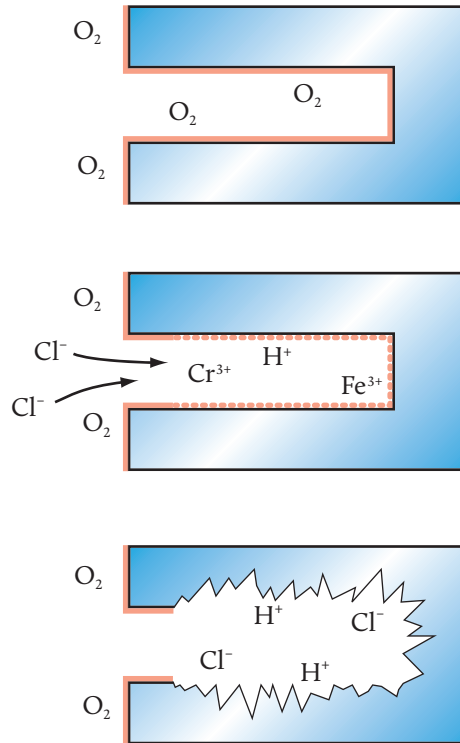


Figur 6.16: *Alle snævre steder i en konstruktion kan fungere som spalter. Al transport sker ved diffusion, og miljøet i spalten kan let blive langt mere korrosivt end udenfor. I rørvarmevekslere er risikoen for spalter mellem endebund og de isvejste rør kritisk og noget, man skal tage højde for ved valg af stål.*

Spaltekorrosion skyldes dårlige transportforhold

Spaltekorrosion (engelsk: crevice corrosion) minder meget om grubetæring, og sammen kaldes de ofte lokalkorrosion. Forskellen er, at mens grubetæring finder sted på de "fri flader", opstår spaltekorrosion i spalter, flangesamlinger, under bolte, gevind, porer eller andre snævre steder, hvor der ikke er omrøring, og hvor vandet derfor er helt stillestående. Al transport sker ved diffusion, og sådanne steder har det rustfrie stål det med af sig selv at danne et miljø, der er betydeligt mere korrosivt end de fri flader udenfor. Den svage passivstrøm, der skal til for at opretholde stålets beskyttende lag af kromoxider, giver anledning til en meget, meget svag afgivelse af positive og sure metalioner. De skal balanceres ladningsmæssigt, hvilket giver en vis diffusion af negative kloridioner ind i spalten.

Kombinationen af stigende klorid og faldende pH gør mediet inde i spalten markant *mere korrosivt* end "bulk-mediet" udenfor. I ekstreme tilfælde kan man inde i spalten få en fortyndet saltsyre (HCl), mens mediet udenfor kun er almindeligt brugsvand, og den slags har naturligvis stor betydning for korrosionsforholdene inde i spalten. På et tidspunkt brister boblen, og korrosionen starter, og når dette sker, fungerer spalten som anode, mens resten af stålet er katode. Det er den samme, uheldige, galvaniske kobling, man oplever ved grubetæring, men ved spaltekorrosion er mekanismen geometrisk betinget.

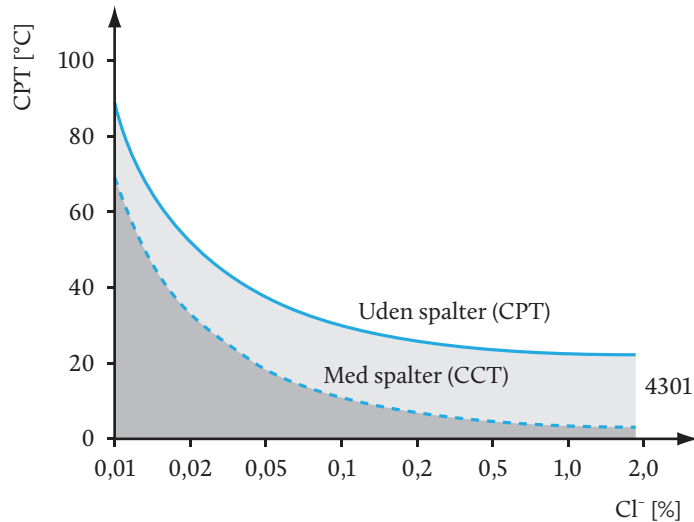


Figur 6.17: Øverst: Opretholdelsen af passivfilmen medfører en ultra svag udsivning af positive metalioner til væsken i spalten. Midten: De positivt ladede metalioner kræver ladningsbalance, og tiltrækker derfor negativt ladede ioner – især det korrosive klorid. Nederst: Klorid nedbryder stålets beskyttende oxidfilm, og spalten aktiveres, og spalten bliver herved anode, mens området uden for spalten fungerer som katode.

Spaltekorrosion er en større risiko end grubetæring

Grundet mekanismen, hvor det yderst korrosive klorid trækkes ind fra en stor væskefase, kan spaltekorrosion kun finde sted ved fuldt neddykkede forhold. Til gengæld betyder den kraftige opkoncentrering af klorid i spalten, at risikoen for spaltekorrosion altid er større end risikoen for grubetæring. En gammel tommelfingerregel for austenitiske stål siger således, at den kritiske spaltekorrosionstemperatur (CCT) ligger 20-25 °C lavere end den tilsvarende kritiske pittingtemperatur (CPT). Dette betyder med andre ord, at man kan risikere spaltekorrosion ved en temperatur, der er 20-25 °C under temperaturen for grubetæring, hvilket man især skal holde sig for øje ved design af konstruktioner. Ligger ens stål tæt på den korrosionsmæssige ”smertegrænse” (ifølge f.eks. Figur 6.10), skal det med voldsom magt sikres, at der ikke er nogen spalter i systemet. Kan dette ikke sikres, skal man vælge et mere korrosionsbestandigt stål, hvor der er indlagt en ekstra stor sikkerhedsmargin – mere end 25 °C.

Denne tommelfingerregel gælder for de *austenitiske* stål, mens de nikkelfri ferritter (f.eks. 4509, 4521, etc.) repassiverer ringere og derfor må forventes at have større afstand mellem spaltekorrosion og grubetæring. Ved de ferritiske stål vil man derfor forvente større følsomhed over for spaltekorrosion end for de tilsvarende austenitter.



Figur 6.18: CPT-kurven for rustfrit stål 4301 (efter Figur 6.10) samt en tilsvarende simuleret CCT-kurve fratrukket 25 °C. Den nederste kurve simulerer bestandigheden over for spaltekorrosion. Bemærk, at spaltekorrosion altid vil opstå før grubetæring.

Spalte- geometri

Ikke alle spalter er lige korrosive. Ud over de involverede materialer har selve geometrien af spalten stor betydning, og jo dybere, spalten er, jo mere kritisk bliver den. Tilsvarende er meget snævre spalter mere kritiske end mere åbne, ganske enkelt fordi omrøring bliver mere besværlig, så transporten bliver mere og mere diffusionsafhængig. Alene derfor er metal-gummi-spalter som regel mere kritiske end metal-metal-samlinger. Pakninger er jo til for at gøre samlingerne mere tætte, men har altså den ulempe, at spalterne bliver potentielt mere følsomme over for korrosion.

Talrige andre faktorer kan også påvirke spalternes farlighed, og i det hele taget er spaltekorrosion en korrosionsform, der er yderst svær at simulere og dermed at forudse. Dels har *spaltegeometrien* som nævnt stor indflydelse, og dels tager det lang tid at få dannet det korrosive miljø. Sidstnævnte gør, at det næsten er umuligt at lave nogle enkle og hurtige korrosionsforsøg, der kan simulere forholdene i et laboratorium. I stedet vælger man ofte at måle bestandigheden over for grubetæring (f.eks. CPT-forsøg) og derpå trække 25 °C fra, som det er sket i Figur 6.18. Metoden er bestemt ikke 100 % sikker, men dur til et hurtigt materialevalg.



Figur 6.19: Spaltekorrosion i svejsenippel af 4404 udsat for en vandig opløsning af kobberklorid (CuCl_2). Bemærk, at korrosionen er koncentreret til pakningsporet.

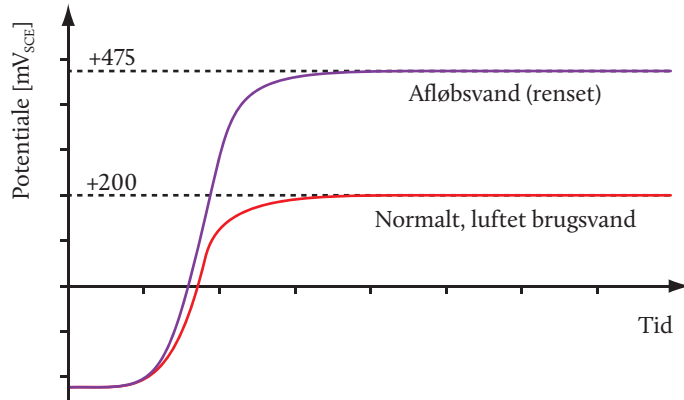
6.3.1 Mikrobielt induceret korrosion (MIC)

En om muligt endnu mere uforudsigelig side af sagen er forekomsten af mikroorganismer. Bitre erfaringer har vist, at netop mikroorganismer kan påvirke det rustfrie ståls korrosionsforhold i særdeles uheldige retninger, dels ved at lave egentlige begroninger, der kan fungere som spalter, og dels ved at danne biofilm, der ændrer miljøet lokalt.

En af de målelige effekter af visse bakterietyper er, at de kan øge stålets korrosionspotentiale til niveauer langt over det, der ellers ses i rent brugsvand (typisk $150\text{-}300\text{ mV}_{\text{SCE}}$ i brugsvand; over 400 mV i rensset spildevand – se Figur 6.20). Resultatet er, at CPT-kurverne i Figur 6.10 skubbes radikalt nedad, og betingelserne derved bliver langt værre for stålet.

*Spalter er
grosteder
for mikro-
organismer*

Oveni vil *eksisterende* spalter bedre end de fri flader kunne fungere som grosted for mikroorganismene, hvorfor mikrobielt aktive miljøer ofte vil gøre stålet langt mere følsomt over for netop spaltekorrosion end over for grubetæring. Som beskrevet ovenfor er der normalt en temperaturdifference mellem spaltekorrosion og grubetæring på $20\text{-}25\text{ °C}$ (se Figur 6.18), men i mikrobiologisk aktive medier kan denne temperaturgrænse blive langt større. Der kendes således eksempler fra især renselanlæg, hvor syrefast 4404 er blevet angrebet af galoperende spaltekorrosion i $12\text{-}15\text{ °C}$ koldt vand med under 100 mg/l klorid, selvom kurverne siger, at CPT burde være pænt over 100 °C . I så fald burde spaltekorrosion traditionelt først kunne ske ved temperaturer over 80 °C , men det sker altså ved langt lavere temperaturer.



Figur 6.20: Skitserede målinger af passivt rustfrit ståls korrosionspotentialer i hhv. almindeligt brugsvand og rensset spildevand. Målingerne er udført over en periode på mere end 14 dage, og fælles for begge er, at korrosionspotentialer starter langt nede, men stiger kraftigt efter en uges tid. Bemærk, at slutpotentialer (pga. bakteriel aktivitet) er langt højere for rustfrit stål i rensset spildevand end ved samme stål i rent brugsvand.

Spildevand kan være ekstremt korrosivt over for rustfrit stål

Et glimrende eksempel på dette er spildevand, og rustfrit stål i netop renseanlæg kan opføre sig meget "underligt". Umiddelbart ville man jo tro, at den stærkt lugtende, urene indløbsende af et renseanlæg ville være mest problematisk, men dette er ikke tilfældet. I indløbet finder man store koncentrationer af voldsomt oxygenforbrugende mikroorganismer, som i praksis gør vandet næsten helt oxygenfrit. Dette giver et meget lavt korrosionspotentialer, hvilket igen giver en særdeles god korrosionsbestandighed for alle rustfri stål kvaliteter. Det er således mere reglen end undtagelsen, at almindeligt rustfrit af 4301-klassen holder i indløbsenden.

Syrefast stål er ikke altid nok i renseanlæg

Helt omvendt er det i den rene udløbsende (efterklaringstanke, sandfilter, m.m.), hvor vandet nærmest er lige så rent som brugsvand (postevand). Her opfører vandet sig langt mere iltende end normalt luftet brugsvand, og netop pga. de bakterielle vækster kan man ofte måle korrosionspotentialer på over 400 mV_{SCE} (uofficiel dansk rekord: +475 mV_{SCE}!) svarende til niveauet for fortyndet brintoverilte (hydrogenperoxid). I sådanne medier kan selv syrefast, rustfrit af 4401/4404-klassen angribes af spaltekorrosion, hvorfor svejse specifikationerne for netop renseanlæg ofte indeholder en klausul om, at der slet ikke må være hverken porer eller spalter tilstede. Rustfrit ståls opførelse i spildevand er behandlet grundigt i [16].



Figur 6.21: *Spaltekorrosion i pressfittings (t.v.) og rør (t.h.) af 4404 som følge af bakterievækster i drikkevandsinstallation. Korrosionen er opstået i 45-50 °C vand med under 100 ppm klorid, og det bemærkes, at korrosionen (de lysegrå områder til højre) har taget fat på de snævraste steder, hvor muffen er klemt sammen om røret.*

Imidlertid er effekten af bakterier og biofilm ikke begrænset til kun renseanlæg. Alle ikke-sterile medier (altså næsten alle medier!) rummer muligheden for bakteriel indflydelse på korrosionsforholdene, og selv ellers rent drikkevand kan give ubehagelige overraskelser. Da pressfittingsystemet blev introduceret for over 20 år siden, var alle rør og fittings således af almindeligt 4301, hvilket i teorien *burde* holde til koldt brugsvand, i hvert fald med klorid under 100-150 mg/l (se Figur 6.10 og Figur 6.18). Dette skete bare ikke, og vore dages pressfittings er alle af det klart bedre, syrefaste stål (4404). Det går heldigvis godt i langt de fleste tilfælde, men der kendes sjældne eksempler på så aggressive bakterier, at selv ikke syrefast stål kan holde mod spaltekorrosion.

6.3.2 Bekæmpelse af spaltekorrosion

Grundet de lidt underlige miljøforhold, tidsfaktoren, effekten af mikrobiologi og det umulige i at lave en "veldefineret spalte" er spaltekorrosion en af de vanskeligste korrosionsformer overhovedet at bekæmpe. De legeringselementer, der bedst bekæmper spaltekorrosion, er som udgangspunkt de samme, som er nyttige mod grubetæring. En rangering af de forskellige stål vil derfor komme til at se meget ud som Tabel 6.1.

Imidlertid er der visse forskelle mellem grubetæring og spaltekorrosion. Erfaringsmæssigt passiverer molybdæn væsentligt bedre i *oxygenfattige* medier (og derved spalter) end krom, og stålets indhold af netop molybdæn må derfor forventes at batte mere ved spaltekorrosion end grubetæring. Erfaringsmæssigt er molybdæn derfor endnu vigtigere ved bekæmpelse af spaltekorrosion end grubetæring, og man må derfor forvente, at PREN-faktoren mellem krom og molybdæn ved spaltekorrosion er højere end de 3,3 der er beskrevet i Eq. 6.1 og anvendt i Tabel 6.1.

Molybdæn er godt mod spaltekorrosion

Oveni indebærer selve mekanismen omkring spaltekorrosion en svag, *generel* korrosion og deraf følgende udsivning af bittesmå mængder af positive metaller (se Figur 6.18), og her har nikkel en vis, positiv betydning. Som udgangspunkt er det dog ikke forkert at mene, at de stål, der har bedst bestandighed mod grubetæring, også har den bedste bestandighed mod spaltekorrosion, og det er derfor ikke helt skævt at gå opad i tabellen for at forbedre stålet.



Figur 6.22: *Havvand er et af de mest korrosive miljøer over for rustfrit stål. Risikoen er især spaltekorrosion, og skal det undgås, bliver man nødt til at anvende "superlegeringer". Dette kølevandssystem fra en boreplatform på den danske del af Nordsøen er fremstillet af 4547 (254 SMO). Foto: © Maersk Oil.*

*Babysalve
og spalte-
korrosion*

En glimrende metode er naturligvis helt at undgå spalter i systemet. Den slags kan kun sjældent lade sig gøre ved f.eks. svejseporer og bindingsfejl, men ved "planlagte spalter" som boltsamlinger og flanger kan man lave et lille trick, en rigtig hundehandlerløsning, der måske ikke er videnskabeligt avanceret, men som virker i praksis. Ved at smøre pakfladen med et *tyndt lag vaseline* gør man spalten vandskyende, hvorved mekanismen i Figur 6.18 slet ikke kan finde sted. Dette trick virker teoretisk set midlertidig, men i praksis holder effekten meget længe, især hvis man i stedet for ren vaseline anvender en blanding af vaseline og basisk zink-oxid – det samme, der bruges som babysalve! Faktisk er apotekets babysalve aldeles glimrende til formålet, om end det naturligvis skal sikres, at brugen af vaseline og/eller zink-oxid ikke på nogen måde kan påvirke mediet.



Rustfrit stål er et af forrige århundredes helt store, tekniske landvindinger. Skal man lave en hitliste over vore vigtigste legeringer, kommer rustfrit stål meget tæt på toppen, og det er i vore dage meget vanskeligt at forestille sig et mejeri eller en medicinalfabrik, som ikke består næsten 100 % af rustfrit stål. Rustfrit stål er kommet for at blive.

Desværre er rustfrit stål ikke altid rustfrit. Hvis betingelserne er til det, kan stålet angribes af en hel vifte af korrosionsformer, men ved at kende "fjenden", er det meget lettere at bekæmpe problemerne. Man skal vælge det rigtige stål til det rigtige formål, man skal bearbejde det på den rigtige måde, og man skal anvende den rigtige overfladebehandling.

Brug stålet korrekt og man har et evighedsmateriale.