



## Index - Teknisk information

1	Hvad er rustfri stål? What is Stainless Steel?	Side Page	186-188 225-227
2	Rustfrit ståls legeringselementer The Alloying Elements of Stainless Steel	Side Page	189-190 228-229
3	Anvendelser af rustfri standardlegeringer Applications of Common Stainless Steel Alloys	Side Page	191-195 230-234
4	Rustfrit ståls korrosionsforhold Corrosion of Stainless Steel	Side Page	196-200 235-239
5	Ferritisk, rustfrit stål Ferritic, Stainless Steel	Side Page	201-207 240-246
6	Bearbejdning af rustfrit stål – korrosionsmæssige konsekvenser The Manufacturing of Stainless Steel and how it affects the Corrosion Resistance	Side Page	208-211 245-248
7	Kemisk overfladebehandling af rustfrit stål Chemical Surface Treatment of Stainless Steel	Side Page	212-214 251-253
8	Svejsemetoder Welding methods	Side Page	215-219 254-258
9	Legeringstabel - Stålkvaliteter og deres kemiske sammensætning Table showing the most frequently used stainless steel grades and their chemical composition	Side Page	220 259
	Legeringstabel - Stålkvaliteter og deres mekaniske egenskaber Table showing the most frequently used stainless steel grades and their mechanical qualities	Side Page	221 260
10	Normoversigt	Side	222-224

## Kapitel 1: Hvad er rustfrit stål?

Rustfrit stål er en stor gruppe materialer, der alle har det til fælles, at hovedelementet er jern (deraf "stål"), og indholdet af krom (Cr) er 10-12 % eller derover. Udover krom og jern kan stålet indeholde en stor vifte af andre legeringselementer, der alle har til formål at forbedre enten de mekaniske og / eller korrosionsmæssige egenskaber for stålet. Beskrivelsen og betydningen af de forskellige legeringselementer findes i Kapitel 2.

Det lavest legerede af alle rustfri stål kvaliteter (f.eks. EN 1.4003) indeholder kun 10,5 % krom og resten jern og blev opfundet helt tilbage i 1912. Allerede i 1913 fandt man i Tyskland på at tillegere nikkel af hensyn til de mekaniske egenskaber, og i 1920 opdagede man, at tillegeringen af selv små mængder molybdæn (Mo) gavner korrosionsbestandigheden gevaldigt. De "syrefaste" ståltyper var født. Rustfrit stål kan efter krystalstruktur opdeles i *fem hovedgrupper*:

### Austenitisk, rustfrit stål

Kendetegnet ved et højt indhold af krom (Cr), højt indhold af nikkel (Ni), lavt indhold af kulstof (C) og ofte tilsætning af molybdæn (Mo). Dette er langt den største og vigtigste gruppe rustfrit stål, og både det almindelige 18/8 og "syrefast" hører til denne gruppe. Normalt umagnetisk, men bliver svagt magnetisk ved kolddeformation.



Blandt rustfrit stål er det fortsat 4301- og 4401-klasserne, der fylder mest på verdensplan. Disse rør er "almindeligt rustfrit" – dvs. 4301.

Mekanisk har austenitisk stål lang "brudforlængelse" = stor sejhed. Austenitisk stål er relativt blødt og særdeles egnet til plastisk formgivning, f.eks. dybtrækning af køkkenvaske. Sammenlignet med de øvrige typer er austenitterne nærmest "tyggegummistål", og netop den gode formbarhed, svejsbarheden og korrosionsbestandigheden gør, at austenitterne stadig er langt den mest anvendte gruppe. Alt lige fra dørhåndtag til enorme bryggeritanke kan laves af austenitisk, rustfrit stål.

Austenitisk stål bliver i modsætning til ferritisk stål ikke sprødt ved lave temperaturer og har tillige bedre egenskaber mod krybning ved meget høje temperaturer. Austenitisk stål besidder generelt god korrosionsbestandighed, men er følsom over for kloridinduceret spændingskorrosion (SPK, se Kapitel 4). Er derfor ikke altid egnet til meget varme komponenter i vandige medier.

## Kapitel 1: Hvad er rustfrit stål?

### Martensitisk, rustfrit stål

Typisk 12-16 % Cr, lavt Ni, sjældent Mo og relativt højt kulstof (C, 0,12-1,2 %). Kan hærdes ved bratkøling til over 1000 HV og pga. den ekstreme hårdhed særdeles velegnet til skærende værktøj, f.eks. kirurgiske instrumenter og højkvalitets-køkkenknive.



*Kirurgiske instrumenter, begge fremstillet af martensitisk, rustfrit stål. Dette giver en høj styrke, men desværre en relativt ringe korrosionsbestandighed.*

Martensitisk stål kan *efter hærkning* hverken formgives plastisk eller svejses. Ved svejsning eller anden varmebehandling vil stålet miste sin hærkning. Martensitterne er stærkt magnetiske, og pga. det lave Cr-indhold og høje indhold af C har de generelt ringe korrosionsbestandighed. Dette ses ofte ved dyre køkkenknive efter en tur i opvaskemaskinen.

### Ferritisk, rustfrit stål

Typisk 12-18 % Cr, lavt Ni, lavt Mo og lavt kulstof ( $C \leq 0,12$ ). Ferritterne har samme struktur som sort stål, men pga. det lave kulstofindhold er de ikke hærbare. Relativt blødt, men ringere sejhed end austenit. Ferritisk stål kan kolddeformeres, men ikke i samme grad som det austenitiske "tyggegummistål". De "stabiliserede" typer er svejsbare (45XX-typerne), og alle er stærkt magnetiske.



*Ferritisk, rustfrit stål kan med fordel anvendes til emner med tyndt gods, store materialeomkostninger og enkel forarbejdning. Denne syrisk fremstillede kande er af 4016 (AISI 430), et meget anvendt materiale inden for catering. I øvrigt et glimrende eksempel på, at man kan dybttrække ferritisk, rustfrit stål.*

De lavest legerede (f.eks. 4003) har relativt ringe korrosionsbestandighed (især i syre), mens de højere (f.eks. 4521) er på linje med syrefast stål med hensyn til grubetæring og til dels spaltekorrosion. Oveni er ferritisk stål det austenitiske langt overlegen med hensyn til den alvorlige spændingskorrosion (SPK).

Pga. det lave nikkelindhold er ferritterne relativt billige og anvendes i stigende grad til formål, hvor man ikke skal bruge austeniternes store formbarhed og svejsbarhed, eller hvor man ønsker en smuk og magnetisk overflade: f.eks. køleskabsdøre, sparkeplader og dørgreb (Kapitel 4). Af samme grund er verdensforbruget af de ferritiske, rustfri ståltyper stærkt stigende.

Ydermere har ferritisk stål store muligheder i forbindelse med varme komponenter, hvor der er risiko for SPK i både almindelige og syrefaste, rustfri ståltyper (Kapitel 4 + 5), samt hvor der er brug for den termiske ledningsevne, som er bedre end for austenitterne. Den *termiske længdeudvidelse* svarer til sort ståls, hvilket er ca. 2/3 af den for austenitisk stål.

### Duplex, rustfrit stål

Tofaset blandingsstruktur med typisk 55 % ferrit og 45 % austenit. Højt Cr, medium Ni, som regel Mo og lavt C. Korrosionsbestandigheden er oftest meget høj, hvad angår grubetæring, spaltekorrosion og især spændingskorrosion.

Mekanisk set er duplex stål magnetisk og har markant højere flydespænding end både de austenitiske og de ferritiske stål kvaliteter. Dette gør duplex stål velegnet til store konstruktioner, da man kan reducere godstykkelsen i forhold til austenitisk stål og derved få et mere korrosionsbestandigt stål uden at øge prisen. Ulempen er en vanskeligere mekanisk bearbejdning samt risiko for dannelse af intermetalliske faser (Cr-Mo, Cr-Fe) under svejseprocessen. Denne risiko stiger med stigende indhold af Cr og Mo i stålet.

De termiske udvidelses- og varmetransmissionskoefficienter ligger for duplex stål mellem ferritisk og austenitisk stål, hvilket vil sige bedre varmetransmission og mindre termisk udvidelse end for austenitterne.

### Udskillelseshærdende, rustfrit stål (precipitation hardening, PH)

Tofaset martensitisk-austenitisk højstyrkestål. Indeholder typisk 15-17 % Cr, 4-8 % Ni, lavt Mo og op til 5 % kobber (Cu). Modningshærder ved forhøjet temperatur gennem udskillelsen af fremmedfaser, hvilket generelt gør PH-legeringerne stærke, men mindre korrosionsbestandige. De mest almindelige er "15-5 PH" og "17-4 PH", som ind imellem bruges til rustfri kædeled og golfkøller, men derudover er udskillelseshærdende stål en sjældent anvendt gruppe af rustfri stål.



*En glimrende anvendelse af den relativt sjældne, rustfri 17-4-PH-legering (15-5 PH, EN 1.4542). Både slagflade og "krop" af denne golfkølle er fremstillet af udskillelseshærdende, rustfrit stål.*

## Kapitel 2: Rustfrit ståls legeringselementer

**Krom, Cr**

Hovedlegeringselementet i alt rustfrit stål og normalt tilføjet i 10-25 %. Stålets *usynlige passivfilm* består primært af kromoxider, og generelt stiger stålets korrosionsbestandighed i de fleste miljøer (især grubetæring og spaltekorrosion) med *stigende* indhold af netop Cr. Passiverer bedst under iltende (oxiderende) betingelser. *Ferrit*danner. Mekanisk stiger brudstyrken med stigende kromindhold, og det samme gør varmebestandigheden og bestandigheden mod dannelse af glødeskaller.

**Molybdæn, Mo**

Tilføjes 0,8-6,2 %. Endnu bedre end krom til at passivere, og selv små mængder af Mo vil forbedre korrosionsbestandigheden mærkbart – især i sure, iltfattede medier. Virker gavnligt mod alle korrosionsformer. *Ferrit*danner, der ligesom krom øger stålets mekaniske styrke.

**Nikkel, Ni**

Blødgører, som øger stålets sejhed – især ved lave temperaturer. Ni ligger på 8-25 % i austenit, 4-7 % i duplex og max. 2 % i ferrit/martensit. Ni stabiliserer *austenit*fasen, og øget indhold af Cr og Mo medfører krav om øget Ni for at holde den duktile austenitstruktur. Øger stålets bestandighed mod *generel korrosion* og *spændingskorrosion* og medvirker til at få f.eks. grubetæring til at gå langsommere efter initieringen. Dyrt og prismæssigt ustabil.

**Carbon (kulstof), C**

Skadeligt element, som i alle andre end martensitiske typer søges holdt så langt nede som muligt. Normalt < 0,08 %; lavkulstof < 0,03 %. For martensitisk stål ligger indholdet af C typisk på 0,12-1,2 % – jo højere, jo mere hærdbart. C binder Cr, især ved temp. 500-850 °C (= *sensibilisering*), som kan føre til *interkrystallinsk* korrosion. Dette er årsagen til, at man i vore dage hyppigt anvender lavkulstofstål EN 1.4306, 4307, 4404 og 4435. C er en stærk *austenit*danner, hvorfor det lave indhold i moderne stål skal kompenseres ved ekstra Ni, hvis austenitstrukturen skal holdes. Dette ses især ved 4435.

**Nitrogen (kvælstof), N**

0-0,5 %. Styrker passiviteten, selv i ekstremt små mængder, men er i praksis vanskeligt at tilsætte til det smeltede metal. Bruges ofte i højtlegerede austenitter og duplex stål. Eneste austenitdanner, der *gavner* stålets passivitet og særligt effektiv mod *grubetæring* og *spaltekorrosion*. Øger "Pitting Resistance Equivalent" (PREN) med en faktor 16.

**Silicium, Si**

Tilføjes som regel som forurening fra stålværkernes smeltedigler. *Ferrit*danner og normalt til stede under 1,0 %. Ingen stor effekt på korrosionsbestandigheden i det normale koncentrationsområde, men er nyttigt i højtemperatur-austenitter som f.eks. 4828 and 4841.

**Mangan, Mn**

Som Si normalt til stede som forurening i stålet (< 2 %), men i "AISI 200-serien" (f.eks. 4372) anvendes Mn som en billig nikkelsubstitut, og Mn kan nå op over 7,5 %. Forbedrer stålets varmvalseegenskaber og virker moderat styrkeøgende. Austenitdanner, der ikke har den store effekt på korrosionsforholdene udover at binde svovl til yderst skadelige mangan-sulfider (MnS).

### Svovl, S

Uønsket forurening og yderst skadelig for korrosionsbestandigheden. Normalt ligger  $S < 0,015\%$  (0,030 for stangmateriale og fladstål), men *rustfrit automatstål* (4305, AISI 303) indeholder 0,15-0,35 %. Svovlet danner mangansulfider (MnS), som gør stålet kortspånet og reducerer værktøjsslid, og automatstål er derfor langt bedre til spåntagende bearbejdning end de "normale", seje austenitter. Desværre er MnS intet mindre end en katastrofe for korrosionsbestandigheden, og eksempelvis er det svovllegerede automatstål 4305 *meget mindre korrosionsbestandigt* end det almindelige 4301. Svovllegeret stål kan hverken svejses eller bejdses med godt resultat.

### Fosfor, P

Som S en uønsket forurening, men knapt så katastrofal for korrosionsbestandigheden. Søges nedbragt til et minimum ( $< 0,045\%$ ), men oftest endnu lavere.

### Kobber, Cu

0-2 %. Styrker korrosionsbestandigheden i sure, ikke-iltende medier (f.eks. svovlsyre) ved at accelerere brintudviklingen og derved få gjort mediet mere iltende (= anodisk beskyttelse). 904L indeholder 1,2-2,0 % Cu og er særligt egnet til svovlsyre. Cu virker moderat styrkeøgende.

### Titan / Niob, Ti / Nb

Vigtige elementer og normalt til stede op til 0,8 %. Både Ti og Nb binder kulstof og derved modvirker C's skadelige effekt i *austenitisk* stål (sensibilisering og interkrystallinsk korrosion). Effekten af at tilsætte Ti/Nb svarer ca. til at anvende lavkulstofstål, og 4541 og 4571 kan som regel erstattes med hhv. 4306/07 og 4404 – og omvendt. Det er som regel et spørgsmål om traditioner, hvor tyskerne foretrækker de titanstabiliserede typer, mens de fleste andre hælder til lavkulstofstål. Ti- og Nb-legeret stål er mekanisk en smule stærkere end det tilsvarende lavkulstofstål, men er til gengæld sværere at polere. Sammen med nitrogenholdig baggas kan Ti-stabiliseret stål give gullige svejse sømme. I ferritisk stål (f.eks. 4509, 4521, 4526) anvendes Ti og/eller Nb som stabilisatorer og forhindrer uønsket kornvækst, hvilket gør stålet svejsbart uden at forringe muligheden for at polere eller elektropolere stålet.

## Kapitel 3: Anvendelser af rustfri standardlegeringer

Nedenfor ses eksempler på de almindeligste *Damstahl*-ståltyper og deres anvendelsesmuligheder. Alle typer er angivet efter EN, som næsten (men langt fra 100 %!) svarer til de gamle W.Nr.-numre. De angivne AISI-numre er *nærmeste parallelnummer*, og der er ikke nødvendigvis 100 % "fodslag" mellem dem og de tilsvarende EN-numre. Oversættelsen er at betragte som omtrentlig snarere end "absolut".

### Ferritiske typer

#### EN 1.4003 / AISI 410

Enklest mulige, rustfri legering med ca. 11 % krom og resten jern. Grundet manglen på nikkel og molybdæn en relativt billig legering med tilsvarende ringe korrosionsegenskaber. Legeringen har god mekanisk styrke og kan let både smedes og svejses og derved anvendes mange steder, hvor almindeligt, sort stål ikke er godt nok, eller hvor man nu anvender galvaniseret stål indendørs. Anvendes til f.eks. busschassier og fås også titanstabiliseret for bedre svejsbarhed (EN 1.4512).

#### EN 1.4016 / AISI 430

15,5 % kromstål med god mekanisk styrke og bedre korrosionsbestandighed end 4003. Mht. grubetæring over/under vand er ferritisk 16 % kromstål næsten at sammenligne med 4301. 4016 har tillige god bestandighed ved temperaturer op til 800 °C, men kan *ikke* svejses uden efterfølgende varmebehandling pga. dannelsen af sprøde, intermetalliske faser i og omkring svejsesømmen. Anvendes derfor bedst som bånd- og pladestål og bruges meget til f.eks. cateringformål, men bør også kunne erstatte galvaniseret stål – især indendørs.

#### EN 1.4113 / AISI 434

Molybdænlegeret (ca. 1,0 %), ferritisk stål med god korrosionsbestandighed i kloridholdige medier; nærmest en mellemting mellem 4301 og 4401. EN 1.4113 kan *ikke* svejses, og stålet er derfor bedst anvendt som bånd- og pladestål.

#### EN 1.4509 / AISI 441

Ti-Nb-stabiliseret, ferritisk, 17½ % Cr stål svarende til en lettere opgraderet 4016 (AISI 430) med forbedrede egenskaber. Pga. den gode korrosionsbestandighed, svejsbarheden og den lave (og meget stabile) pris er 4509 en af de mest interessante og brugbare ståltyper på markedet, og inden for en årrække må det forventes, at netop 4509 fortrænger 4301 på mange større områder, f.eks. catering, byggeri og varmevekslere. Både teori og praksis har vist, at 4509 ligger på linje med 4301 mht. bestandighed mod grubetæring (pitting, Kapitel 4 + 5), og til varme komponenter er de ferritiske ståltyper endda langt bedre end deres austenitiske modstykker, alene pga. den meget mindre risiko for SPK. 4509 har endvidere et stort potentiale som erstatning af galvaniseret stål, men er som alle andre ferritiske stål kvaliteter lettest at skaffe som tyndplader og til dels rør. *Ved alle ferritiske, rustfrie stål kvaliteter skal der dog udvises omhu ved valg af svejseproces, tilsatsmateriale og beskyttelsesgas.*

#### EN 1.4510 / AISI 439 (430Ti)

En Ti-stabiliseret og dermed svejsbar udgave af 4016. 4510 er svejsbar, men samtidig marginalt mindre korrosionsbestandig end 4509 og tillige sværere at skaffe, hvorfor 4510 kun sjældent anvendes.

### EN 1.4512 / AISI 409

Med kun omtrent 11 % Cr det lavest legerede Ti-Nb-stabiliserede (og derfor svejsbare) stål. Ikke særligt korrosionsbestandigt, men både svejsbart og (især) prisbilligt og prisstabil og kan i visse tilfælde erstatte f.eks. galvaniseret stål til indendørs brug. Pga. ferriternes gode bestandighed mod spændingskorrosion bedst til varme pladekomponenter.

### EN 1.4521 / AISI 444

Sammen med 4509 er "syrefast ferrit", 4521, et af fremtidens mest interessante, ferritiske stål kvaliteter. Både Ti- og Nb-stabiliseret og udover en høj, mekanisk styrke kendetegnet som "syrefast" med 17,0-20,0 % Cr og 1,80-2,50 % Mo. Både i teori og praksis har 4521 vist sig at ligge mindst på linje med syrefast 4404, hvad angår bestandighed mod grubetæring, og er klart overlegen i forhold til det almindelige 4301 i alle kloridholdige medier. Som de øvrige ferritiske ståltyper er 4521 endda de austenitiske overlegen under varme forhold (60+ °C) pga. den klart bedre bestandighed mod kloridinduceret spændingskorrosion (SPK). EN 1.4521 er derfor velegnet til mange formål, hvor man normalt ville anvende netop de syrefaste, austenitiske stål kvaliteter 4401, 4404 eller 4571. Udover mulige problemer med svejseprocessen er ulempen ved 4521, at udbudet er ringere end 4404, samt at det i lighed med de fleste andre, ferritiske kvaliteter kun kan fås som tyndplade eller tyndvæggede rør.

### EN 1.4526 / (AISI 436)

Niobstabiliseret stål med godt 17 % Cr og 1,25 % Mo, hvilket placerer stålet midt mellem 4301 and 4404 mht. bestandighed mod f.eks. grubetæring. Glimrende korrosionsbestandighed i både saltholdig atmosfære og industri-luft og i lighed med andre ferritiske stål kvaliteter *ikke* følsom over for kloridinduceret spændingskorrosion. Er derfor særdeles velegnet til varme komponenter, hvor austenitiske stål kvaliteter i 4301- og 4401-klassen ikke kan anvendes. Kan smedes og formgives og (ved passende omhu) modstandssvejses uden efterfølgende varmebehandling.

### Martensitiske typer:

#### EN 1.4057 / AISI 431

Hærdbart, 15 % kromstål med en (efter martensitisk målestok) god korrosionsbestandighed. Anvendes i vid udstrækning til skærende værktøj (bl.a. knivblade) eller aksler. Lettest at finde som stangstål.



#### EN 1.4104 / (AISI 430F)

Martensitisk automatstål med højt S-indhold (max. 0,35 %) aht. spåntagende bearbejdning. Kan også anvendes, hvor man ønsker et magnetisk stål med spånbrydende egenskaber.

*Det bedste fra to meget forskellige verdener: En dyr kniv af mærket Gense, hvor bladet er fremstillet af det hærdbare, martensitiske 4057, og håndtaget er af det lettere bearbejdelige og mere korrosionsbestandige 4301.*

## Kapitel 3: Anvendelser af rustfri standardlegeringer

### Austenitiske typer:

#### EN 1.4301 / AISI 304

Det klassiske 18/8-standardstål og stadig det vigtigste, rustfri konstruktionsmateriale til alt lige fra køkkenvaske og gaffler til mejerier og slagteriudstyr. Duktigt (smidigt), let svejsbart og rimeligt korrosionsbestandigt i de fleste normale medier, mens bestandigheden i kloridholdige medier (især ved forhøjet temperatur) ofte er utilstrækkelig. Grundet risikoen for klorid bør 4301 derfor ikke anvendes udendørs, men er bedre egnet indendørs. Ved temperaturer over 60 °C (og til tider under) er SPK en alvorlig risiko (Kapitel 4). I mange tilfælde kan eventuelle korrosionsproblemer løses ved en opgradering til det endnu mere korrosionsbestandige (og "syrefaste") 4404. Alternativt skal endnu højere legerede materialer overvejes.

#### EN 1.4305 / AISI 303

Svovllegeret 18/8-stål med fremragende, spånbrydende egenskaber pga. dannelsen af mangansulfider (Kapitel 2). Leveres kun som stang og tråd til spåntagende bearbejdning, men kan til gengæld hverken svejses eller bejdses. Ringere korrosionsbestandighed i næsten alle medier sammenlignet med almindeligt 18/8 (4301) og skal derfor bruges med omtanke.

#### EN 1.4306 / AISI 304L

Lavkulstofudgave af 4301. C 0,03 % for at imødegå risikoen for sensibilisering og følgende interkrystallinsk korrosion (Kapitel 2 + 4). Den teoretiske ulempe er en marginalt lavere mekanisk styrke. 4306 ligger relativt højt i nikkel (10-12 %) og er derfor let "overaustenitisk", hvilket giver mindre tendens til deformationshærdning og derved gode egenskaber til f.eks. strækformgivning. Ulempen er højere pris pga. nikkels indflydelse på legeringstillægget, hvilket samtidig gør den svær at få fat i.

#### EN 1.4307 / AISI 304L

Standard-lavkulstofudgaven af 4301, men med Ni (8-10,5 %), hvilket svarer til niveauet for almindeligt 4301. 4307 er derfor helt identisk med 4301 bortset fra, at den øvre grænse for kulstof er lavere (0,03 %), hvilket klart er at foretrække ved svejsning af især tykke konstruktioner (Kapitel 2 + 4). Med sit lavere Ni er 4307 både billigere og "mindre austenitisk" end høj-nikkel-stålet 4306 (10-12 %). Spor af deformationsmartensit og/eller ferrit kan få stålet til at optræde en smule magnetisk, især efter bearbejdning.

#### EN 1.4310 / AISI 301 / 302

"18/8 classic". En ældre udgave af 4301, som især er kendetegnet ved et meget højt kulstof og derved højere styrke og tilsvarende større risiko for sensibilisering (og risiko for interkrystallinsk korrosion). 4310 anvendes, hvor man ønsker netop højtemperaturstyrke, men altså med ringere svejsbarhed til følge.

#### EN 1.4401 / AISI 316

Standard "syrefast" stål. Mekanisk at sammenligne med 18/8, men med sine 2,0-2,5 % Mo markant bedre korrosionsbestandighed i næsten alle medier, uanset om der er tale om generel korrosion, grubetæring/spaltekorrosion eller spændingskorrosion (Kapitel 4). 4401 burde i virkeligheden erstatte 4301 som standardmateriale mange steder, hvor dette er korrosionsmæssigt for svagt. At det ikke sker, må tilskrives den til tider voldsomme prisudvikling på nikkel og til dels molybdæn.

#### EN 1.4404 / AISI 316L

Lavkulstofudgaven af 4401 (ovenfor) og et standardmateriale til hele den farmaceutiske branche. 4404 er klart det mest benyttede konstruktionsmateriale til kritiske komponenter, hvor 4301 eller 4306/7 af korrosionsmæssige årsager ikke slår til. 4404 er således Damstahls mest solgte, syrefaste kvalitet og let at finde i alle mulige og umulige dimensioner – inkl. en stor vifte af fittings.

### EN 1.4418 / -

Relativt lavtlegeret, "syrefast" stål, der kun leveres som stangstål. 4418 indeholder kun ca. 1 % Mo og 4-6 % Ni, hvilket giver en mekanisk stærk tofasestruktur, som bruges til f.eks. hydraulikstænger (gerne belagt med hårdkrom). Meget populær til norsk offshore.

### EN 1.4432 / AISI 316L

Udviklet til den finske papirindustri og næsten identisk med 4435, men med marginalt lavere Cr og derved noget lavere Ni og tilsvarende lavere pris. Med hele 2,5-3,0 % Mo er 4432 derved *mere korrosionsbestandigt* end "normale", syrefaste ståltyper uden at blive ret meget dyrere. Ulempen er ringere leveringsforhold.

### EN 1.4435 / AISI 316L

Lavkulstofmodellen af 4436 og derved en højtlegeret udgave af 4404. Analogt med 4436 giver det høje Mo en tilsvarende høj korrosionsbestandighed, men ulempen er det meget høje nikkelindhold forårsaget af både det ekstra Mo og det lave C. 4435 bliver derved det dyreste (og som regel det mest korrosionsbestandige) af de syrefaste standardstålqualiteter. Af samme grund ofte svært at skaffe.

### EN 1.4436 / AISI 316

Højtlegeret, "syrefast" stål indeholdende 2,5-3,0 % Mo mod 2,0-2,5 for normalt 4401 eller 4404. Det ekstra Mo giver en mindre forbedring af korrosionsegenskaberne, men desværre også en noget højere pris, dels pga. Mo selv og dels (især) pga. det ekstra Ni, der skal til for at holde austenitstrukturen.

### EN 1.4539 / "904L"

Med 20 % Cr, 25 Ni og 4,5 Mo et særdeles korrosionsbestandigt, austenitisk stål. Oprindeligt udviklet til at klare generel korrosion i stærk svovlsyre, hvilket forklarer de 25 % Ni og 1,2 % Cu. Overaustenitisk legering med fremragende korrosionsbestandighed i næsten alle medier, men grundet det høje nikkelindhold uforholdsmæssig dyr. Bemærk, at "904L" ikke er nogen AISI-standard, men et gammelt, svensk kaldenavn.

### EN 1.4541 / AISI 321

Titanstabiliseret 18/8. Ti binder kulstof (Kapitel 2 + 4), og stålet er derfor bedre end 4301 egnet til at svejse i, især for tykvæggede konstruktioner. Svarer mht. korrosion og svejsbarhed til 4307 og bruges traditionelt meget i især Tyskland til de samme formål, endda med den ekstra forskel, at 4541 er mekanisk en anelse stærkere end 4301/7. Til gengæld kan titanstabiliseret stål give gullige svejssømme ved brug af nitrogenholdig baggas (f.eks. Formier) og er tillige sværere at polere. EN 1.4550 (AISI 347) er den nioblegerede 4301 med tilsvarende egenskaber.

### EN 1.4571 / (AISI 316Ti)

Den syrefaste analogi til 4541 og det mest brugte rustfri konstruktionsmateriale i den tyske industri. Brugen af titanstabiliseret stål i stedet for lavkulstof 4404 skyldes mest tradition, men har dog en vis styrkemæssig fordel, mens man på minussiden kan regne, at Ti-stål er sværere at polere og kan give gullige svejsninger ved anvendelse af Formiergas. Analogt med 4541/4307 kan man i langt de fleste tilfælde skifte fra 4404 til 4571 (og omvendt) uden problemer. De marginale forskelle mellem 4571 og 4404 er de samme som mellem 4541 og 4307 (se EN 1.4541 ovenfor).



*Grundet deres høje brudforlængelse (> 45 %) er de austenitiske stålqualiteter særdeles duktile og derfor lette at forme; her illustreret ved nogle opkravede flanger af EN 1.4404.*

## Kapitel 3: Anvendelser af rustfri standardlegeringer

### Varmebestandige, austenitiske stålqualiteter:

#### EN 1.4828 / AISI 309

Det lavest legerede højtemperaturstål. Minder meget om 4301, dog med den vigtige forskel, at 4828 indeholder mellem 1,5 og 2,5 % silicium (Si), som forbedrer bestandigheden over for skalning.

#### EN 1.4841 / AISI 314

Meget højt legeret stål, der indeholder 24-26 % Cr og 19-22 % Ni. Sammenlignet med lillebroren ovenfor har 4841 forbedrede mekaniske egenskaber og endnu bedre bestandighed mod korrosion og "scaling". Den største ulempe er det høje indhold af Ni, der gør stålet både dyrt og prismæssigt ustabil.

### Duplexe stålqualiteter:

#### EN 1.4460 / AISI 329

På mange måder det oprindelige duplex-stål og det eneste af slagsen, der er klassificeret efter det gamle AISI-system. Med 25-28 % Cr, 1,30-2,0 % Mo og 4,5-6,5 % Ni er strukturen af 4460 mere end 50 % ferritisk (resten er austenit), hvilket giver et mekanisk stærkt og hårdt stål. Fås kun som stangmateriale og er almindeligt anvendt til f.eks. hårdt belastede aksler.

#### EN 1.4462 / "2205"

Med 22 % Cr, 5 Ni og 3 Mo er 4462 det hyppigst anvendte duplexe stål. Høj mekanisk styrke kombineret med fremragende korrosionsegenskaber har gjort 4462 til et oplagt konstruktionsstål. Overlegen bestandighed i alle medier sammenlignet med de almindelige, syrefaste ståltyper (4401-klassen), især mht. SPK. Ulempen er begrænset tilgængelighed og øgede forarbejdningssomkostninger – både til formgivning og svejsning.

### Udskilleleshærdende stålqualiteter:

#### EN 1.4542 / –

Et sjældent stål fra en sjælden gruppe. Med 14-17 % Cr har 4542 normalt en korrosionsbestandighed, der ligger mellem martensitisk knivstål og det austenitiske 4301. Tillegering af 3 % Cu gør stålet hærdbart ved hjælp af opvarmning, om end den opnåelige hårdhed for 4542 ligger lavere end for de martensitiske typer. En typisk anvendelse er høj kvalitetsgolfjern (!), f.eks. Callaway Big Bertha eller Ping G10.

## Kapitel 4: Rustfrit ståls korrosionsforhold

Rustfrit stål er et korrosionsmæssigt set genialt materiale. Netop den gode korrosionsbestandighed kombineret med en rimelig pris har for længst gjort rustfrit stål til den hyppigst anvendte materialegruppe inden for "kritiske" anvendelser, såsom fødevarer- og medicinaludstyr, husholdninger og talrige steder i den kemiske industri.

Rustfrit ståls normalt store korrosionsbestandighed skyldes en ultratynd film af oxider af især krom og jern. Denne film er kun få nanometer tyk og helt usynlig, men er ikke desto mindre så tæt og stærk, at stålet effektivt "isoleres" fra det omgivende miljø. Skulle det ske, at der trods alle forholdsregler går hul på den beskyttende oxidfilm, gendannes den hurtigt af sig selv, og stålet er igen beskyttet.

Desværre går det ikke altid, som præsten prædiker. I uheldige tilfælde kan oxidfilmen nedbrydes, uden at den gendannes bagefter, og resultatet kan være alvorlige korrosionsangreb. Når først korrosionen er startet, kan man opleve særdeles hurtig gennemtæring, og brugen af rustfrit stål bliver derfor ofte en slags enten-eller, hvor forskellen mellem de to yderligheder kan være endog meget lille. Hvis man kan hindre korrosionen i overhovedet at starte, har man nærmest et evighedsmateriale. Hvis ikke, vil der ske alvorlig korrosion meget hurtigt, og levetiden af ens udstyr kan blive uhyggeligt kort.

De korrosionsformer, man typisk kan risikere ved rustfrit stål, er:

### Generel korrosion

Kaldes også syrekorrosion (acid corrosion, abtragenden Korrosion), da det er en korrosionsform, der oftest ses i stærkt sure, men også i stærkt alkaliske medier. Modsat alle andre korrosionsformer er generel korrosion kendetegnet ved, at hele overfladen korroderer. Materiale-tabet udtrykt i gram pr. kvadratmeter bliver derfor stort, mens hastigheden til gennemtæring ofte er langsom.

Generel korrosion finder som nævnt sted i stærkt sure eller (sjældnere) i stærkt alkaliske medier. Typiske medier er svovlsyre, fosforsyre og lignende, og udover syretypen og -styrken afhænger korrosionshastigheden især af temperaturen og mængden af urenheder (især klorid). Helt generelt stiger korrosionshastigheden med stigende temperatur og stigende kloridkoncentration i mediet.

På stålsiden er det austenitisk, rustfrit stål, der holder bedst, især stål med højt indhold af nikkel og molybdæn. Lavtlegeret, ferritisk og især martensitisk stål er normalt uegnet til stærke syrer og baser.

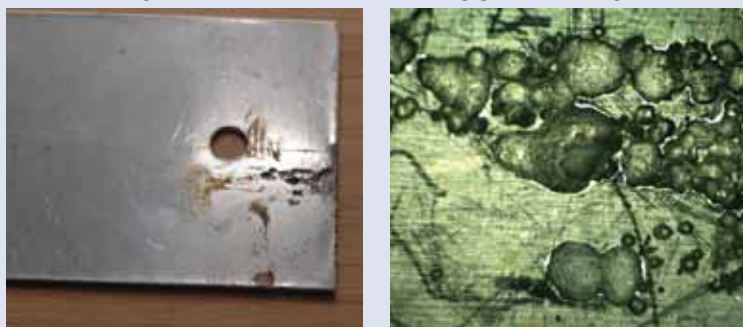


*Rustfri bolt (4301) efter et længere ophold i stærk bejdsesyre (salpetersyre-flussyre). Bemærk, at korrosionstab er ganske ensartet og over det hele, og at mængden af tabt metal er ganske stor. Trods det imponerende materialetab er der endnu ikke sket gennemtæring.*

## Kapitel 4: Rustfrit ståls korrosionsforhold

### Grubetæring og spaltekorrosion

Grubetæring (pitting corrosion, Lochfraß-Korrosion, punktfrätning) er en korrosionsform, der skyldes en *lokal nedbrydning* af det beskyttende oxidlag. Ved tilstrækkeligt kraftig miljøpåvirkning sker der ikke som normalt en gendannelse af oxidfilmen, og korrosionen tager fart. Grubetæring er det perfekte eksempel på en enten-eller-korrosionsform og resulterer ofte i særdeles hurtig gennemtæring.



Rustfri 4301-plade efter få dage neddykket i en blanding af salt (NaCl) og brintoverilte (hydrogenperoxid, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Mens 99 % af stålets overflade forbliver helt uberørt, er der alligevel sket alvorlig gennemtæring enkelte steder. Billedet til højre er en mikroskopforstørrelse af det indrammede område.

*Spaltekorrosion* (crevice corrosion, Spaltkorrosion) minder meget om grubetæring, men finder sted i spalter, porer og andre steder, hvor der er ringe eller slet ingen væskeudskiftning. Sådanne steder er al transport styret af diffusion, og sammenlignet med de "frie flader" er risikoen for korrosion i eventuelle spalter altid højere.

En gammel tommelfingerregel siger, at man kan risikere *spaltekorrosion* ved en temperatur, der er 20-25 °C lavere end temperaturen til *grubetæring* (= kritisk pitting-temperatur, CPT), så ligger ens stål tæt på den korrosionsmæssige "smertegrænse", skal det ved design sikres, at der ikke er nogen spalter i systemet. Kan dette ikke sikres, skal man vælge et mere korrosionsbestandigt stål.

Risikoen for både grubetæring og spaltekorrosion stiger stærkt med

- Stigende kloridkoncentration
- Stigende temperatur
- Koncentrationen af oxidanter
- Lav pH (sure forhold)

Hvad angår legeringselementerne, stiger stålets bestandighed med stigende Cr, Mo og N, mens effekten af Ni er relativt lille. Ikke-metalliske urenheder som f.eks. S og P sænker korrosionsbestandigheden drastisk.

Baseret på hundreder af praktiske forsøg kan stålets bestandighed mod grubetæring beskrives i form af en Pitting Resistance Equivalent (PREN):

$$\text{PREN} = \% \text{ Cr} + 3.3 \times \% \text{ Mo} + 16 \times \% \text{ N}$$

## Kapitel 4: Rustfrit ståls korrosionsforhold

Erfaringsmæssigt vil to ståltyper med samme PREN have omtrent samme bestandighed mod grubetæring. Jo højere PREN, jo bedre, og det er værd at bemærke, at det teoretisk set er lige meget, om man adderer 1 % Mo eller 3,3 % Cr. Det er stigningen i PREN, der er afgørende.

Som regel er korrosion værst, når stålet er helt *neddykket* i mediet, men selv over vandlinjen kan sprøjt med saltvand være rigeligt til at give overfladiske grubetæring, om end den slags angreb sjældent fører til egentlige funktions-svigt. Korrosion over *vandlinjen* har som regel "kun" kosmetisk karakter, men den slags kan såmænd også være dybt irriterende, når der er tale om en dyr, rustfri postkasse eller facaden på et operahus.

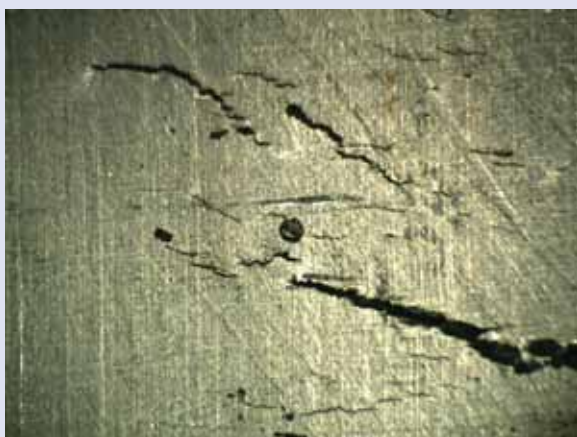
### Spændingskorrosion

Spændingskorrosion (SPK, stress corrosion cracking, Spannungsrißkorrosion) er en korrosionsform, der giver sig udslag i *lokale revnedannelser* og ekstremt hurtig gennemtæring i selv tykt gods. At fænomenet hedder "spændingskorrosion" hænger sammen med, at korrosionen finder sted i områder med *indre trækspændinger*, altså steder, hvor metallet er blevet "hevet i". Dette kan ske ved de fleste typer mekanisk bearbejdning, f.eks. svejsning, smedning, slibning m.m.

Miljømæssigt stiger risikoen for SPK med følgende faktorer:

- Stigende kloridkoncentration
- Stigende temperatur
- Lav pH (sure forhold)
- Inddampning

Af disse er temperaturen den vigtigste enkeltfaktor, og SPK er mere afhængig af netop temperaturen end nogen anden korrosionsform.



Venstre:

Spændingskorrosionsrevner i mælketank af 4301. Den længste revne (øverst, tv.) er ca. 15 mm lang, og korrosionen skyldes desinfektion ved høj temperatur.

Højre:

Mikroslib gennem SPK-revner i en 4301 destillationskolonne. Årsagen til revnerne er, at der i den lille "lomme" har stået en sjat med kloridholdigt vand. Driftstemperaturen har været 60-70 °C.

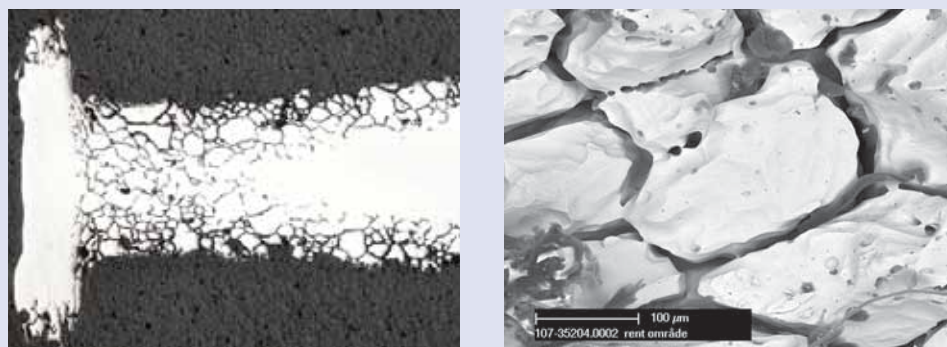
## Kapitel 4: Rustfrit ståls korrosionsforhold

SPK er en korrosionsform, der næsten selektivt angriber det lavest legerede, austenitiske stål som f.eks. 4301-klassen, og normalt siger man, at 4301 er i farezonen ved temperaturer over 60–70 °C. I praksis er det dog sket, at 4301 er blevet angrebet af SPK ved meget lavere temperaturer, helt nede under stuetemperatur. Pga. indholdet af Mo og Ni er 4401-klassen noget mere bestandig over for SPK, og den vejledende temperaturgrænse ligger omkring 100–110 °C. Heller ikke denne grænse er dog sikker, og der er rapporteret om SPK i 4401 ved kun 30–40 °C.

*Ferritisk og duplex stål er meget mindre følsom over for SPK end austenitisk stål, så hvis det er SPK, der er den primære korrosionsrisiko, er det ingen dårlig ide at overveje rør af f.eks. 4509 eller 4521 i stedet for 4301 eller 4404.*

### Interkrystallinsk korrosion

Interkrystallinsk korrosion (intergranular corrosion, interkristalline Korrosion) er en korrosionsform, der skyldes dannelser af kromkarbider i stålets korngrænser. Ved opvarmning til temperaturer i området 500–850 °C binder kulstof det nyttige krom, og korrosionen finder sted *langs stålets korngrænser*. Det svarer til at opløse mørtelen mellem murstenene i et hus.



*Mikroslib (venstre) og SEM-foto (højre) af interkrystallinsk korrosion i austenitisk, rustfrit stål af typen 1.4307. At der er opstået sensibilisering og siden interkrystallinsk korrosion i lavkulstofstål skyldes, at stålet har været udsat for en opvarmning under tilstedeværelse af en kulstofkilde (olie!). Under opvarmningen er olien dekomponeret, kulstoffet er diffunderet ind langs korngrænserne, og det nyttige krom er blevet bundet. Derved er områderne lige ved siden af korngrænserne blevet svækket (sensibilisering), og ved eksponering i et korrosivt medie opløses disse svage zoner.*

Risikoen for interkrystallinsk korrosion stiger voldsomt med stålets indhold af kulstof (Kapitel 2), og netop interkrystallinsk korrosion er årsagen til, at man så vidt muligt bør vælge lavkulstofstål (f.eks. 4306, 4307, 4404 eller 4435) eller titanstabiliserede stål kvaliteter (4541 og 4571). Dette er især vigtigt ved tykke plader og fittings, hvor varme-påvirkningen varer længst tid.

Grundet stålværkernes effektive fjernelse af netop kulstof er sensibilisering og efterfølgende interkrystallinsk korrosion et ret sjældent fænomen

### Tid

For alle korrosionsformer gælder det endvidere, at TIDEN er en vigtig faktor. Langtidseksponeringer er altid værre end korttidspåvirkninger, og ofte kan man slippe af sted med at udsætte stålet for et meget hidsigt miljø – så længe kontakttiden er ultrakort. Dette ses ofte ved f.eks. desinfektionen af rustfri tanke. Så længe desinfektionen kan holdes inden for nogle få minutter, går det godt, mens efterladte sjetter giver langtidseksponering og hyppig korrosion.

Endnu tydeligere ses det ved korrosion *over vandlinjen*. Rustfri bygningskonstruktioner bør eksempelvis udføres, så alt vand hurtigt kan løbe af; i modsat fald risikerer man henstående, saltholdige vandsjetter, som kan give alle mulige skader, lige fra kosmetisk uheldige, overfladiske grubetæringer (kølige forhold) til SPK ved forhøjede temperaturer.

Næsten alle tilgængelige korrosionsdata er baseret på langtidseksponering. Hvis kontakttiden kan holdes kort, er der ofte mulighed for, at stålet kan holde endnu bedre end beskrevet i tabellerne.

## Kapitel 5: Ferritisk, rustfrit stål

For kun få år siden var nikkelfrit, ferritisk, rustfrit stål noget, man grinede af. Ringe korrosionsbestandighed, ringe svejsbarhed og ringe mekaniske egenskaber var ikke tilstrækkeligt til at kompensere for den lavere pris, hvorfor ferritisk, rustfrit stål historisk set er blevet hyppigt anvendt til enkle og billige konstruktioner.

De senere års kraftige stigninger (og fald!) i nikkelpriiserne har ændret kraftigt på dette. Alene i løbet af 2006 og 2007 steg nikkelpriisen fra små 15.000 til 55.000 \$/ton for derefter at falde til godt 30-35.000. I december 2008 droppede prisen til mellem 9.000 og 12.000 \$/ton, og i skrivende stund (august 2009) ligger prisen på ca. 20.000 \$/ton. Grundet sin pletvis høje og meget svingende pris er nikkelt det prissættende legeringselement i almindeligt rustfrit stål, og hovedparten af legeringstillægget for et EN 1.4301-stål (= AISI 304) udgøres af netop nikkelt. Nikkel er kort sagt stærkt fordyrende for det rustfrie stål og dertil prismæssigt ustabil, hvorfor meget ville være vundet, hvis man kunne droppe det dyre nikkelt og alligevel opnå en god korrosionsbestandighed.

Og det kan man heldigvis! Ved de fleste korrosionsforhold er de nyttigste legeringselementer krom (Cr) og molybdæn (Mo), mens nikkelt (Ni) især er tilsat for at stabilisere austenitfasen (Kapitel 2). Ved at skære ned på Ni-indholdet og bibeholde Cr og Mo fås således et stål med en fremragende korrosionsbestandighed og væsentligt lavere pris – og det er i virkeligheden det, der er "hemmeligheden" ved ferritisk rustfrit stål. Højt Cr, eventuelt Mo og lavt eller slet intet Ni.

Tabellen nedenfor er et uddrag af tabellen bagest i kataloget og angiver legeringssammensætningen for en serie almindeligt rustfrit stål. Bemærk, at Ni-indholdet for alle de ferritiske stål kvaliteter (de øverste fem) er meget lavt, mens de austenitiske (de nederste fem) indeholder mindst 8,00 %.

EN 1.-	Struktur	% C	% Cr	% N	% Mo	Andet	AISI	SS
4003	Ferrit	≤ 0,08	10,5-12,5	0,30-1,00	-	N ≤ 0,030	410S	-
4016	Ferrit	≤ 0,03	16,0-18,0	-	-	-	430	2320
4509	Ferrit	≤ 0,030	17,5-18,5	-	-	Ti 0,10-0,60; Nb 3xC+0,30 - 1,00	441	-
4512	Ferrit	≤ 0,03	10,5-12,5	-	-	Ti 6x(C+N) - 0,65	409	-
4521	Ferrit	≤ 0,025	17,0-20,0	-	1,80-2,50	N ≤ 0,030; Ti 4(C+N)+0,15 - 0,80	444	2326
4301	Austenit	≤ 0,07	17,5-19,5	8,00-10,5	-	N ≤ 0,11	304	2333
4306	Austenit	≤ 0,030	18,0-20,0	10,0-12,0	-	N ≤ 0,11	304L	2352
4307	Austenit	≤ 0,030	17,5-19,5	8,00-10,5	-	N ≤ 0,11	304L	-
4404	Austenit	≤ 0,07	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	N ≤ 0,11	316	2347
4404	Austenit	≤ 0,030	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	N ≤ 0,11	316L	2348

Pga. ferritisk ståls gunstige forhold mellem pris og korrosionsbestandighed er forbruget af ferritter nærmest eksploderet. I 2006 var 27 % af verdenstønnen af rustfrit stål, ferritisk (og martensitisk) stål, og dette forventes i 2010 at vokse til hele 47 %.

De tilsvarende tal for Skandinavien er hhv. 15 og 25 %, et noget lavere niveau, hvilket skyldes, at vi ikke på vores breddegrader har helt samme koncentration af store bilfabrikker som i f.eks. Frankrig og Tyskland. Netop bilfabrikkerne er storaftagere af især lavtlegeret, rustfrit stål, men også inden for husholdning, catering og andre kritiske komponenter er der et stort marked for netop ferritisk, rustfrit stål.

### Korrosionsforhold, grubetæring

I de fleste medier afhænger bestandigheden mod lokalkorrosion (grubetæring + spaltekorrosion) af stålets indhold af især Cr og Mo, og historisk set er dette forklaringen på ferritternes ringe popularitet. Datidens ferritiske ståltyper rummede nemlig kun omkring 12 % Cr og slet intet Mo, hvilket slet ikke var tilstrækkeligt til at sikre en god korrosionsbestandighed. Dette har heldigvis ændret sig radikalt, og nutidens ferritter kan fint konkurrere med både almindeligt rustfrit og syrefast, hvad angår Cr og Mo – og dermed korrosionsbestandighed.

Grubetæring (pitting) er en af de mest destruktive korrosionsformer for rustfrit stål, og stålets bestandighed mod netop grubetæring kan udtrykkes i form af en *Pitting Resistance Equivalent* (PREN, Kapitel 4).

Erfaringsmæssigt vil to ståltyper med samme PREN have samme bestandighed mod grubetæring, og ud fra tabellen ovenfor kan man se, at 4301 (AISI 304) har en PREN på 17.5. Det ferritiske 4509 har eksakt samme PREN, hvorfor disse to ståltyper forventes at have samme bestandighed mod initiering af grubetæring (pitting). Dette blev i oktober-november 2008 bekræftet af elektrokemiske forsøg på Danmarks Tekniske Universitet, DTU.

Tilsvarende burde det ferritiske 4521 (PREN 22,9) på linje med det austenitiske 4404 (AISI 316L, PREN 23,1), hvilket også er blevet bekræftet af DTU's elektrokemiske forsøg. Faktisk klarede den syrefaste ferrit, 4521, sig mærkbart bedre mht. *pittingpotential* end den parallelle, syrefaste austenit, 4404. For begge grupper kan man altså substituere den traditionelle austenit med den parallelle ferrit uden at give køb på bestandigheden over for grubetæring.

Imidlertid er der andre korrosionsfaktorer at tage højde for end initiering af grubetæring. Ideelt set skal man vælge et rustfrit stål, hvor korrosionen *aldrig* starter (= initieres), men skulle ulykken endelig ske, er Ni nyttigt at have, hvorfor korrosionen løber hurtigere i ferritisk stål end i austenitisk. Dette er blot endnu et argument for at vælge sit stål med omtanke. Man skal ganske enkelt vælge et stål, hvor korrosionen aldrig starter i det aktuelle miljø – altså et stål med en tilstrækkelig høj PREN.

### Spændingskorrosion

*Spændingskorrosion* (SPK) er en korrosionsform, der giver ødelæggende revnedannelser, og som opstår som en kombination mellem mekaniske spændinger og et korrosivt (oftest kloridholdigt) medie. SPK angriber især *austenitisk* stål af 4301- og 4401/04-klasserne.

SPK finder for 4301-stål typisk sted ved temperaturer på 50-60 °C og derover, mens syrefast 4401/04-stål er mere bestandigt og først angribes ved temperaturer over 100-110 °C (Kapitel 4). Dette gør i virkeligheden mange austenitiske ståltyper uegnede til mange tekniske formål – lige fra reaktorer og destillationskolonner til varmevekslere, inddampere og tørreudstyr.

Her har ferritisk stål en kæmpe fordel, idet det slet ikke angribes af kloridinduceret SPK! Ferritisk stål kan derfor fint anvendes mange steder, hvor SPK er den levetidsbegrænsende korrosionsform, og hvor stål af 4301- og 4401/04-klasserne derfor ikke kan anvendes.

## Kapitel 5: Ferritisk, rustfrit stål

### Generel korrosion

Generel korrosion er en korrosionsform, der typisk finder sted i stærke syrer eller stærke baser, og i disse miljøer er austenitisk stål generelt lidt bedre end de ferritiske paralleller. Til brug i forbindelse med ekstreme pH-værdier er traditionelt, *austenitisk*, rustfrit stål derfor normalt at foretrække.

Det skal nævnes, at forskellige typer af *passivt*, rustfrit stål normalt kan sættes sammen *uden risiko for galvanisk kobling* mellem de forskellige legeringer, såfremt miljøet er så tilpas skikkelig, at der ikke kan ske korrosion i nogen af de to ståltyper. Der bør derfor ikke være korrosionsproblemer forbundet med at sætte f.eks. 4301 og 4509 sammen.

### Mekaniske forhold

Mekanisk set er der visse forskelle mellem nye ferritiske ståltyper og de traditionelle austenitiske. Målt med HRC, Rp 0,2 eller Rm ligger ferritisk stål nogenlunde på linje med austenitisk, men bemærk, at flydespændingen (Rp 0,2) generelt er lidt højere for de ferritiske ståltyper, mens Rm er lidt lavere. Ferritterne er på mange måder sammenlignelige med højstyrke-kulstofstål.

Til gengæld er der store forskelle på *brudforlængelsen*. Brudforlængelsen for et 4301 eller 4404 ligger typisk på 45 % eller derover, hvilket vil sige, at disse ståltyper kan strækkes ganske langt, før de "knækker". Brudforlængelsen for de ferritiske, rustfri kvaliteter ligger noget lavere (minimum 18-20 %), hvilket gør ferritterne mindre egnede til kraftige, mekaniske deformationer. Dette gælder især for ren *strækformgivning*, mens ferritterne er glimrende egnede til dybtrækning, og bl.a. anvendes ferritter i udstrakt grad til komplekse udstødningssystemer og, især i England og Italien, er 4016 et populært materiale til cateringformål.

Med hensyn til koldbearbejdning kan ferritisk, rustfrit stål i høj grad sammenlignes med kulstofstål, og det er et fint plus, at man ikke skal anvende mere maskkraft sammenlignet med austenitterne. Til gengæld skal man ikke regne med at kunne dybtrække en kompliceret, dobbelt køkkenvask ud af et ferritisk stål. I sådanne tilfælde er de traditionelle austenitter (f.eks. 4301) bedre.

En anden forskel er de mekaniske forhold ved ekstremt lave og ekstremt høje temperaturer, hhv. slagsejhed (AV) og krybning. Nb-stabiliserede ferritter deformerer dog mindre end austenitterne ved langvarige påvirkninger.

Modsat austenitisk stål kan ferritisk, rustfrit stål blive sprødt ved meget *lave temperaturer*, og det bevarer heller ikke i samme grad den mekaniske styrke ved meget høje temperaturer (typisk over 7-800 °C). Ferritter er generelt bedre egnede til cykliske påvirkninger, mens austenitterne har det bedre ved isoterme anvendelser. Oveni kan længerevarende henstand ved temperaturer mellem 400 og 550 °C give anledning til "475°-sprødhed", noget der også kan opleves ved duplex stål i samme temperaturområde. Ferritisk stål er derfor generelt set *mindre egnet* til ekstreme temperaturer end austenitisk, om end de enkelte tilfælde bør vurderes hver for sig.

### Magnetisme, termisk udvidelse og slid

Magnetisk minder ferritisk, rustfrit stål mest af alt om almindeligt, "sort" stål. Alt ferritisk stål er således stærkt magnetisk, mens nikkelholdigt, austenitisk stål er umagnetisk eller (f.eks. efter deformation eller spåntagende bearbejdning) svagt magnetisk.

Også med hensyn til termisk længdeudvidelse ligger ferritterne tættere på sort stål end på austenitisk, rustfrit stål. Ferritisk, rustfrit stål udvider sig således 30-35 % mindre end austenitisk, hvilket giver mindre risiko for, at ens udstyr "slår sig" ved konstruktion eller ved efterfølgende store temperaturspring under drift. Dette har især betydning, hvis man bygger udstyr af flere forskellige stål kvaliteter, f.eks. svøb af rustfrit stål og udvendige støttinge af sort stål. Her vil valg af ferritisk, rustfrit stål minimere de mekaniske spændinger mellem rustfrit og sort stål.

Med hensyn til slid har rustfrit stål mod rustfrit stål en trist tendens til rivning og adhæsivt slid. Denne tendens kan reduceres ved at vælge to ståltyper med forskellig struktur, og eksempelvis er et ferritisk stål mod et austenitisk en bedre slidkombination end to austenitiske ståltyper mod hinanden, selv om der stadig er lang vej op til gode slidkombinationer som f.eks. bronze mod rustfrit stål.

### Svejsning af ferritisk stål

Modsat tidligere tiders fordomme kan man fint svejse i ferritisk, rustfrit stål, om end det er noget mindre "idiotsikkert" end de konventionelle austenitter. Manglen på nikkel øger risikoen for uønsket kornvækst og andre uheldige, metallurgiske fænomener som følge af varmepåvirkningen. Den slags kan give både sprøhed og reduceret korrosionsbestandighed, hvorfor man skal være meget mere opmærksom på varmetilførslen ved svejsning af ferritisk stål end de traditionelle austenitter. Tykke plader er bedre til at "holde på varmen", og risikoen for dannelsen af intermetalliske faser stiger generelt med stålets godstykkelse, hvilket i øvrigt er en af grundene til, at det kan være svært at få ferritisk stål over 3 mm's godstykkelse.

Netop ønsket om at stabilisere stålet er årsagen til, at de bedre, ferritiske typer er tillegeret titan (Ti) og/eller niob (Nb). Ti og Nb er begge stærke karbiddannere og blokerer kornvækst.

Mekanismen ligner den for tilsætning af Ti til f.eks. 4541 eller 4571 og sikrer, at der ikke dannes kromkarbider under svejseprocessen. Ikke-stabiliserede typer kan derfor være følsomme over for interkristallinsk korrosion i den varmepåvirkede zone, og ferritisk stål uden stabiliserende elementer (f.eks. 4003 og 4016) er derfor ikke egnet til svejsning uden efterfølgende varmebehandling.



Makrofoto af svejsesøm i ferritisk 4521.  
Godstykkelse: er 2 mm, svejsemetode: TIG, tilsats: AISI 316LSi,  
Strøm: 90 A  
Beskyttelsesgas: ren Ar.

## Kapitel 5: Ferritisk, rustfrit stål

Både 4509, 4510, 4521 og 4526 samt det lavtlegerede 4512 (10,5-12,5 Cr) kan svejdes ved brug af tilsatsmateriale af typen 4430 eller lignende (20 Cr, 2,5-3,0 Mo). 4512 og 4509 kan endvidere svejdes med lavere legeret "308L"-tråd (18-21 Cr, 10-12 Ni, 0 Mo), om end 4430-tråden giver større korrosionsmæssig sikkerhed. Ved godstykkelser op til 1-1½ mm kan man nøjes med at løbe stålet sammen uden brug af tilsatsmateriale. Der bør normalt ikke være problemer med at svejse ferritisk, rustfrit stål sammen med austenitisk stål af 4301- eller 4404-klasserne. Til 4301/4509-klassen anbefales tråd af typen AISI 309L (22-24 Cr, 12-15 Ni, 0 Mo), mens man til de syrefaste ståltyper bør anvende ovennævnte 4430-tråd.

En vigtig forskel mellem ferritter og austenitter er *valget af beskyttelsesgas* (og baggas). Til TIG-svejsning af ferritisk, rustfrit stål skal der anvendes *argon* (Ar) eller evt. argon-helium (max. 20 % He), mens Formiergas (N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>) *ikke* må anvendes pga. risikoen for kornvækst og efterfølgende sprødhed pga. N og/eller H. Til MIG anbefales Ar + 2 % CO<sub>2</sub>. Højere CO<sub>2</sub> kan give karbiddannelser (sensibilisering).

### Kemisk efterbehandling

Modsat hvad der ofte står i litteratur fra sidste århundrede (før 2000!), kan man udmærket udsætte ferritiske, rustfri ståltyper for en kemisk efterbehandling. EN 1.4509, 4521 og 4526 kan således både bejdses og elektropoleres, om end det anbefales at være mere forsigtig ved de ferritiske end ved de austenitiske ståltyper. Årsagen er, at ferritterne generelt er mere følsomme over for stærke syrer end de parallelle austenitter.

Ved *bejdsning* skal man således være opmærksom på, at ferritisk stål normalt ætzes kraftigere i bejdsesyren end austenitisk, og man bør derfor anvende en relativt mild salpetersyre-flussyre-baseret bejds. Dette er en af flere gode grunde til at tilstræbe svage anløbninger ved svejsning af ferritiske stål kvaliteter.

*Elektropolering* af ferritisk stål kan fint lade sig gøre, men ferritterne ætzes hurtigere i den stærke syre (50-70 % svovlsyre-fosforsyre, temperatur 60 °C !), og sammenlignet med de traditionelle austenitter opnås derfor ikke samme ekstreme blankhed (= marginalt større ruhed). Skal man partout have en spejlblank overflade, er austenitterne at foretrække.

En *passivering* udføres bedst med en ren salpetersyre (Kapitel 7). Bemærk dog, at de lavest legerede ferritter som 4003 og 4512 ikke kan bejdses og ej heller elektropoleres. Disse ståltyper kan dog passiveres, men helst kun i kromatinhiberet salpetersyre.

### Nikkelafgivelse til fødevarer

Ferritisk stål kan uden problemer anvendes til langt de fleste formål, hvor man nu anvender austenitisk stål – også til håndtering af fødevarer. Det ferritiske 4016 anvendes allerede nu i vid udstrækning til cateringformål i England og Italien, og de højere legerede 4509, 4521 og 4526 kan sagtens anvendes i samme branche.

En særlig fordel ved ferritisk stål er, at risikoen for nikkelafgivelse til mediet er lig nul, ganske enkelt fordi, der ikke er nikkel i stålet! 4301 og 4404 indeholder hhv. 8 og 10 % Ni, som (f.eks. ved korrosion) kan afgives til mediet. Der eksisterer p.t. ingen krav om brug af nikkefrie materialer til håndtering af fødevarer, men skulle de komme, skader det ikke at være på forkant med udviklingen.

### Leveringsformer, dimensioner og priser

De vigtigste ferritiske kvaliteter er især 4509 og det syrefaste 4521 – og til dels det meget populære 4016. De mest aktuelle konstruktionsståltyper, kvalitetene 4509 og 4521, findes både som plader (med forskellig overfladefinish) og rør; dog med den ulempe, at godstykkelsen kun sjældent overstiger 3 mm. Ferritisk stål er primært tyndplader og tyndvæggede rør, og især ved 4521 må der påregnes en vis leveringstid.

Priserne afhænger af kvaliteten og leveringsformen samt af det evigt fluktuerende legeringstillæg. Dette er især afhængigt af nikkelpriserne, hvorfor prisfordelen ved brug af ferritisk stål automatisk kommer til at følge nikkel. Jo højere nikkelpris, jo større fordel.

I juli 08 var forskellen mellem 4509 og 4301 hele 25 % (til 4509's fordel!), men seks måneder efter (januar 09) var nikkelprisen faldet, hvilket reducerede den økonomiske fordel ved ferritterne, udover at de stadig er markant mere prisstabile end de parallelle austenitter. Ved en højere nikkelpris kan man således forvente eksploderende priser på austenitterne, men ikke for ferritterne. Tilsvarende fordele opnås ved 4521 i forhold til den syrefaste austenit (4404).

### Mulige anvendelser

Ferritterne er ikke fuldt så formbare som austenitterne, og endvidere er svejseprocesserne forbundet med lidt flere problemer, ligesom de begrænsede leveringsmuligheder kan spille negativt ind. Andre ikke-korrosionsrelaterede faktorer kan være magnetiske eller termiske egenskaber, og en lille (ikke komplet!) oversigt er vedlagt nedenfor:

Fordele	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"><li>• Glimrende bestandighed mod grubetæring (PREN4509 = PREN4301)</li><li>• Fremragende bestandighed mod SPK, langt bedre end for austenitisk stål</li><li>• God bestandighed mod generel og interkrystallinsk korrosion</li><li>• Bejdsning, passivering og elektroplering mulig</li><li>• Ingen risiko for Ni-afgivelse til fødevarer</li><li>• Lav termisk udvidelse</li><li>• God varmeledningsevne</li><li>• Mindre tendens til tilbagefjedring ved koldbearbejdning</li><li>• Magnetisk (kan være en fordel)</li><li>• Lavere og mere stabil pris</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grundet risikoen for spaltekorrosion skal man være mere opmærksom på design</li><li>• Svejseparametrene mere kritiske</li><li>• Lav slagsejhed ved godstykkelser &gt; 3 mm</li><li>• Lavere brudforlængelse = mindre egnet til strækformgivning</li><li>• Lavere slagsejhed ved meget lave (kryo-)temperaturer</li><li>• Sprødhed ved langtids-eksponering ved temperaturer omkring 475 °C</li><li>• Magnetisk (kan være en ulempe)</li><li>• Færre dimensioner og mindre varelager (især i tykke dimensioner) kræver bedre planlægning</li></ul>

## Kapitel 5: Ferritisk, rustfrit stål

Ferritisk, rustfrit stål kan således forventes at have potentiale inden for følgende områder:

- Simple geometrier uden for meget kompliceret buk / stræk / svejsning
- Tyndt gods
- Enkel bearbejdning
- Store materialeomkostninger (= store besparelser!)

En af Europa og USA's helt store forbrugere af ferritisk stål er bil- og busindustrien, men også inden for byggeri, industri, postkasser, skilte, husholdning, hvidevarer og catering er der et stort marked for de prisbillige og korrosionsbestandige, ferritiske, rustfrie stål kvaliteter. Især de højtlegerede, svejsbare ferritter (4509, 4510, 4521 o. lign.) vil utvivlsomt erstatte store dele af markedet for 4301- og 4401-klasserne. De steder, hvor grubetæring er den levetidsbegrænsende korrosionsform, kan man derfor skifte fra austenitisk til ferritisk, rustfrit stål uden at give køb på korrosionsbestandigheden.

Oveni er galvaniseret stål de senere år blevet så dyrt, at man nogle gange kan overveje at erstatte det traditionelle varmforzinkede stål med et ferritisk, rustfrit stål. Her er især den svejsbare 4509 og lillebroderen 4512 (kun 11 % Cr) relevante indendørs, mens den mekanisk stærkere og mere korrosionsbestandige 4521 er at foretrække udendørs.

Over vandlinjen (under kolde forhold) er netop overfladisk grubetæring den kritiske korrosionsform, og i sådanne tilfælde vil man som regel kunne erstatte 4301 med en 4509 – og en 4404 med en 4521. Sådanne substitutioner er ganske almindelige i f.eks. cateringbranchen, men burde være endnu mere almindelige til f.eks. lamper, skilte o. lign. 4509 er perfekt indendørs, mens 4521 har alle forudsætninger for at blive et godt standardmateriale udendørs, hvor 4404 er for dyrt, og hvor mange konstruktører derfor anvender det ofte utilstrækkelige 4301.

Endnu bedre er det, når det er *spændingskorrosion*, der er den kritiske korrosionsform. Dette er typisk tilfældet ved temperaturer på 60 °C og opefter (for 4301-klassen, 100 °C for syrefaste), som tilfældet er ved f.eks. *udstødningsrør* til biler, *bageri- og røgeovne eller varmevekslere*. Her er ferritisk stål de austenitiske typer korrosionsmæssigt overlegen, og ved at skifte til ferritter opnås netop en *øget korrosionsbestandighed* og en *lavere og mere stabil pris*.

Ikke nogen ringe kombination!

## Kapitel 6: Bearbejdning af rustfrit stål – korrosionsmæssige konsekvenser

Kun de færreste anvender rustfrit stål uden at bearbejde det. Stålet skal klippes, bukkes, svejdes, slibes eller på anden måde udsættes for mekanisk forarbejdning, og det har desværre konsekvenser for korrosionsbestandigheden. Rustfrit stål er kun betinget rustfrit, og korrosionsbestandigheden er afhængig af, hvordan man behandler stålet.

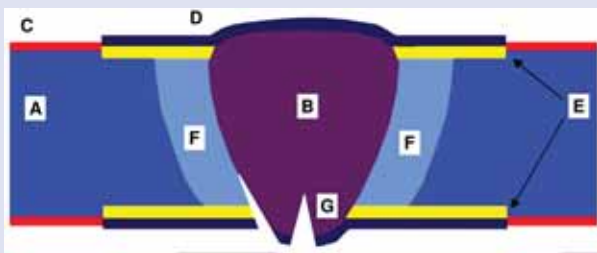
Som udgangspunkt er stålet "perfekt" fra leverandøren. I det øjeblik stålet forlader stålværket, har det sin maksimale korrosionsbestandighed, og flertallet af mekaniske processer, man kan udsætte stålet for, *svækker korrosionsbestandigheden*. Al forarbejdning og håndtering af rustfrit stål bør derfor gøres, så disse svækkelser bliver så små som mulige. Er dette ikke muligt, bør processerne efterfølges af en passende kemisk efterbehandling (Kapitel 7).

### Svejsning

Et af de korrosionsmæssigt alvorligste "indgreb" er svejsning. Udover at introducere en ny fase (svejsemetallet) bliver stålet udsat for en kraftig varmepåvirkning, som indebærer mindst tre potentielle farer: *sensibilisering, anløbninger og indre trækspændinger*.

De korrosionsrisici, der er forbundet med selve svejsemetallet, søges oftest minimeret ved at anvende et "overlegere" tilsatsmateriale. Sværere er det at sikre, at der ikke er *neddykkede spalter* i systemet. Den slags kan opstå i form af *porer, sugninger, bindingsfejl, manglende gennembrænding* o. lign., og korrosionsrisikoen er primært spaltekorrosion (Kapitel 4).

En god tommelfingerregel siger, at der vil kunne ske spaltekorrosion ved en temperatur, der er 20–25 °C lavere end den kritiske pitting-temperatur (CPT) – den temperatur, over hvilken der vil kunne ske grubetæring. Løsningen er enten helt at hindre neddykkede spalter (= intensiveret kontrol) eller valg af et bedre stål, der har højere Pitting Resistance Equivalent (PREN) og derved større indbygget sikkerhed (f.eks. 4404 i.st.f. 4301).



Tegnet snit gennem en svejsesøm.

A: Basisstål

B: Svejsesøm

C: Naturlige oxidfilm

D: Anløbninger

E: Afkromede lag (lige under anløbningerne)

F: Heat Affected Zone (HAZ)

G: Porer, sugninger, bindingsfejl m.m.

Opvarmning af stålet til temperaturer mellem 500 og 850 °C (en uundgåelig bivirkning af f.eks. svejseprocessen) medfører en risiko for dannelse af skadelige *kromkarbider* (= sensibilisering). Dette sker ikke i selve svejsesømmen, men i en varmepåvirket zone tæt ved ("Heat Affected Zone" = HAZ), og problemet er størst ved svejsning i svære godstykkelser. I praksis bekæmpes det bedst ved at anvende *lavkulstofstål* (f.eks. 4306, 4307 eller 4404) eller *titanstabiliserede ståltyper* (4541 eller 4571).

Et beslægtet fænomen er dannelsen af skadelige, intermetalliske faser (f.eks. "sigma" (Cr-Fe) eller "ksi" (Cr-Mo)), noget man især kan opleve ved svejsning højtlegerede, "superduplexe" stålqualiteter (f.eks. 4410, duplex 2507, Zeron 100) eller de højest legerede ferritiske stålqualiteter (f.eks. 4509, 4526 og 4521).

## Kapitel 6: Bearbejdning af rustfrit stål – korrosionsmæssige konsekvenser

Mindst lige så alvorlige er de blålige eller gullige *anløbninger*, der dannes på overfladen af stålet ved siden af svejse sømmen. Disse anløbninger er stærkt fortykkede oxider af krom og jern og skyldes en varm oxidation (iltning) af selve den rustfrie ståloverflade. En sådan iltning medfører i praksis en alvorlig korrosionsmæssig svækkelse af stålet, så vil man have det optimale ud af sit stål, skal det sikres, at al svejsning foregår under helt iltfrie betingelser, hvilket betyder anvendelsen af en helt ekstrem mængde beskyttelsesgas (se FORCE's "Referenceatlas").

Et mere økonomisk og oftest hurtigere alternativ er at tolerere en vis blåfarvning og derpå at fjerne anløbningerne igen, enten med en ren *bejdsning* (Kapitel 7) eller med en kombination mellem *slibning* og kemisk efterbehandling (bejdsning eller *passivering*). En glasblæsning er ikke velegnet til formålet, idet både anløbninger og afkromet lag vil blive mast ind i overfladen i stedet for at blive fjernet. Dette klares med en bejdsning forud for glasblæsningen.

Endelig medfører enhver svejseproces ligesom enhver anden mekanisk forarbejdning dannelsen af *indre trækspændinger* og derved en forøget risiko for *spændingskorrosion*. Dette er der intet at gøre ved udover at tage højde for problemet allerede i designfasen og vælge et stål, der med god margin er immunt over for SPK ved de projekterede driftsbetingelser. Det er ikke anbefalelsesværdigt at bekæmpe SPK ved at sætse på, at det færdige produkt slet ikke har indre trækspændinger.

### Klipning, savning og andre skæremetoder

De "farligste" processer er generelt de varmeudviklende, da man ligesom ved svejsning kan risikere anløbninger, som skal fjernes mekanisk/kemisk. En "varm klassiker" er *vinke/slibere*, som udover at give meget grove, anløbne overflader tillige har det med at sprøjte vildt med varme partikler til andre overflader end dem, der behandles. Disse partikler kan brænde fast i ståloverfladen og give anledning til både spalter og anløbninger – en yderst uheldig kombination, som kan medføre stærkt reduceret korrosionsbestandighed. Måden at klare det på er at fjerne alle partikler ved *forsigtig* brug af en skruetrækker eller stemmejern og derpå foretage en bejdsning.

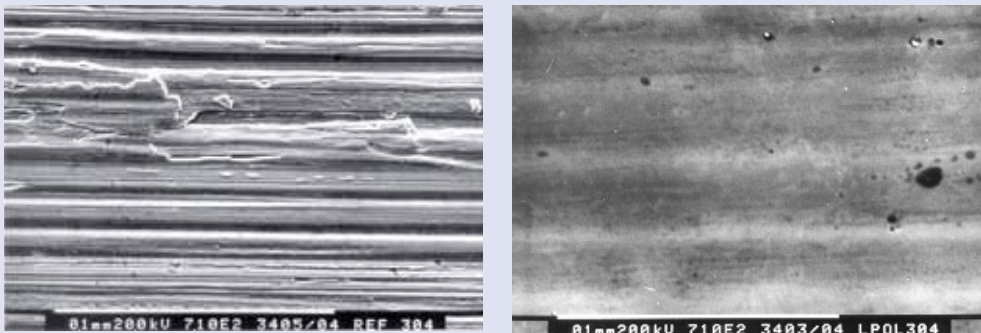
Selv de kolde skæreprocesser kan imidlertid genere stålets korrosionsbestandighed, idet man derved bløtlægger centrum af stålet, som alt andet lige indeholder flere skadelige urenheder end overfladen. Denne effekt stammer helt tilbage fra størkningen af smelten til tonstunge "slabs". Størkningen sker naturligt nok udefra og ind, og under denne proces "skubbes" urenhederne foran det størknede metal for til sidst at ende i centrum, og selv en trinvis valsning fra fx 300 til under 1 mm ændrer ikke ved, at urenhederne er opkoncentreret i centrum.

Centrum af en plade er derved mindre korrosionsbestandigt end overfladen – et fænomen, der hænger sammen med selve fremstillingen af stålet på stålværket, og som ovenfor kan problemet minimeres ved at foretage en afsluttende bejdsning.

### Børstning, blæsning, slibning og spåntagende bearbejdning

Den meste mekaniske bearbejdning af rustfrit stål påvirker overfladeruheden, og også dette påvirker stålets korrosionsbestandighed. Alt andet lige *falder korrosionsbestandigheden med stigende overfladeruhed*, og en meget grov overflade (især groft slebne, drejede, børstede eller sandblæste overflader) har en målbart lavere korrosionsbestandighed end en glat (f.eks. 2B).

Årsagen til dette er todelt: Dels er en grov overflade bedre til at opsamle salte og danne lokalelementer, dels vil en grov behandling frilægge stålets naturlige indhold af urenheder. Disse urenheder (især sulfider) kan fungere som angrebepunkter for f.eks. grubetæring og derved nedsætte korrosionsbestandigheden.



To rustfri plader af typen EN 1.4301 (AISI 304). Den til venstre er blevet slebet, mens den højre efterfølgende er blevet elektropoleret. Det er ikke vanskeligt at forestille sig, at den venstre plade er bedst til at opsamle korrosive salte. Den hvide linje nederst på begge billeder er 100  $\mu\text{m}$ . Begge billeder er stillet til rådighed af DTU.

Ydermere vil grove slibninger inducere flere indre spændinger end en fin, hvilket reducerer bestandigheden mod spændingskorrosion (SPK). Til gengæld vil en fin blæsning (glasblæsning eller shot-peening) øge niveauet af indre trykspændinger og derved øge bestandigheden mod netop SPK. Sandblæsning derimod giver en ekstremt grov overflade uden formildende omstændigheder.

Ud fra et rent korrosionsmæssigt synspunkt er det således oftest en fordel *ikke* at foretage nogen mekanisk overfladebehandling overhovedet! Den glatte og bejdsede 2B-overflade, man får med en koldvalset tyndplade, kan ganske enkelt ikke forbedres korrosionsmæssigt, og man bør aldrig slibe bare fordi, "det plejer vi at gøre". Som ovenfor er den bedste metode til at undgå korrosionsmæssige svækkelser at foretage en effektiv, kemisk overfladebehandling.

## Kapitel 6: Bearbejdning af rustfrit stål – korrosionsmæssige konsekvenser

### Håndtering og transport

En særlig risiko ved næsten al håndtering af rustfrit stål er jernafsmitninger; et problem, der især ses, hvis f.eks. ens bukkeværktøj, gaffeltruck eller lastvogn har været anvendt til håndtering af sort stål. Udover at se grimt ud reducerer jernafsmitninger selve det rustfri ståls korrosionsbestandighed, idet korrosionen af jernpartiklerne kan fortsætte ned i selve det rustfri stål og medføre korrosion dér.



*Et grimt eksempel på jernafsmitninger i form af en partikel, der i et valseværk er blevet mast ind i det rustfri stål. Partiklen må have været ganske hård, for den er blevet trykket dybt ind i det rustfri, og selv om en bejdsning vil fjerne alt sort stål/rust, vil behandlingen efterlade et lille hul.*

Som beskrevet i Kapitel 7 kan jernafsmitninger fjernes kemisk, men mindst lige så effektivt er det at forebygge problemet. Især er det vigtigt kun at bruge værktøj, der alene bruges til rustfrit stål, hvilket inkluderer alt lige fra bukkeværktøj til gaflerne på ens gaffeltruck.

Selv ved en total separation af værktøj og udstyr er slibestøv en "klassiker". Sort slibestøv kan være uhyggeligt mobilt, og forebyggelsen af jernafsmitninger kan blive lidt af et sisyfosarbejde. Ideelt set bør sort og rustfrit nærmest forarbejdes på to forskellige postadresser, men dette krav ses der ofte igenem fingre med. I så fald er der ingen vej udenom den kemiske efterbehandling.

Al bearbejdning af rustfrit stål medfører en risiko for svækkelse af stålets naturlige korrosionsbestandighed. Er denne svækkelse større, end materialevalget har taget højde for, skal korrosionsbestandigheden retableres, hvilket sikrest (og ofte billigst!) sker ved at anvende en *kemisk overfladebehandling*.



*Blålige, anløbne svejsninger fra en tank lavet af 4301. Tabet af korrosionsbestandighed i sådanne anløbninger er alvorligt, og for at stålet skal retablere sin gode korrosionsbestandighed, skal disse anløbninger fjernes. Dette gøres bedst og billigst ved en bejdsning.*

### Bejdsning

Langt den vigtigste, kemiske overfladebehandling af rustfrit stål er en bejdsning. Selve bejdsbadet består typisk af 10–20 % *salpetersyre* (HNO<sub>3</sub>) og 1–8 % *flussyre* (HF). Højtlegeret stål kræver et aggressivt bejdsbad med højt indhold af flussyre, mens "normalt", rustfrit stål af 4301- og 4401-klassen bedst bejdses med et relativt lavt indhold af HF. I stedet for flussyre kan man teoretisk set anvende saltsyre (HCl), hvilket dog medfører dels en mere aggressiv bejds (kon-gevand!), dels en stor risiko for følgeskader i form af grubetæring. Saltsyreholdige bejdses kan ikke anbefales.

Ved stuetemperatur er bejdssetiden normalt mellem 30 min. og flere timer af hængig af graden af anløbninger, der skal fjernes (jo mørkere, jo længere tid), og koncentrationen af metalforureninger i badet. Efter bejdsningen har man igen det rene stål uden nogen korrosionsmæssige svækkelser.

Den dominerende ulempe ved en bejdsning er, at der er tale om en egentlig ætsning. Dette betyder, at overfladeruheden vil stige, især for meget glatte emner, hvilket kan være yderst generende i medicinal- og fødevarerbranchen, hvor ruheden skal holdes nede aht. mikroorganismer. Ofte opererer man med en maksimal ruhed (som Ra) på 0,6 µm.

Ydermere kan variationer i overfladeruheden få emnet til at se mindre homogent ud, hvilket dog mest har kosmetisk betydning.



*Bejdsset svejsesøm i et emne af 4404. Bemærk, at stålet får et "glansløst" udseende. Dette skyldes, at en bejdsning indebærer en ætsning af stålet, hvilket forøger overfladeruheden.*

giftattest (fås på politistationer).

Påføringen af bejdsen sker lettest ved at dyppe emnet i bejdsbadet, men er dette ikke muligt, kan man anvende en fortykket bejdsopslæmning, som kan "males på" ved hjælp af en pensel. Dette er yderst nyttigt ved f.eks. montagesvejsninger, hvor man ikke ønsker at bejds hele fabrikken, men blot svejsningerne.

Bemærk, at de lavest legerede ferritiske ståltyper (f.eks. 4003 og 4512) ikke er egnede til bejdsning, og ej heller svovllegeret automatstål (4305) eller martensitisk knivstål kan bejdses. De højere legerede ferritter som 4509 og 4521 kan bejdses, men man bør bruge en mildere og mindre aggressiv bejds end for de tilsvarende austenitter.

Bemærk endvidere, at brugen af flussyre i Danmark fordrer en

## Kapitel 7: Kemisk overfladebehandling af rustfrit stål

### Passivering

En passivering har til formål at styrke stålets naturlige, beskyttende oxidfilm, og i tilgift opløses blotlagte indeslutninger og andre korrosionsmæssige svækkelser. Begge dele gavner korrosionsbestandigheden.



Venstre:  
Steel-Tech "Bejdssegel 122", et salpeter-syre-flussyrebaseret produkt, der anvendes til "almindelige rustfri" og syrefaste stålkaliteter.  
Højre:  
Pastabejdsning af en svejsesøm på indersiden af et 4436-rør.

Badet er oftest en ren, 18-25 % salpetersyre ( $\text{HNO}_3$ ), og procestiden er normalt en time. Svovllegeret automatstål (4305) og lavtlegeret, ferritisk stål kan kun passiveres i *dikromat-inhiberet salpetersyre*.

En stor fordel ved en passivering er, at *overfladeruheden* ikke påvirkes, og en passivering er derfor fremragende til behandling af f.eks. slibne eller glasblæste overflader. En stor ulempe er til gengæld, at anløbningerne omkring svejsningerne *ikke* fjernes. Har man anløbninger, slipper man altså ikke for enten en bejdsning eller en fin slibning efterfulgt af en bejdsning eller en passivering.

### Dekontaminering

"Dekontaminering" betyder afgiftning, og det er lige præcis, hvad der sker. Alle urenheder fjernes, mens selve det rustfrie stål slet ikke påvirkes – hverken anløbninger, det afkromede lag eller de frie flader. En dekontaminering er en slags avanceret opvask og påvirker hverken stålets overfladeruhed eller de almindeligste gummi- og plasticmaterialer, hvilket gør processen særligt egnet til rensning af medicinsk udstyr eller andet, hvor en bejdsning eller passivering ikke kan anvendes, enten af hensyn til stålet selv eller sårbare pakninger. De fleste kunststoffer har det skidt med salpetersyre og andre sure oxidanter.

En dekontaminering foretages typisk med en 2-10 % opløsning af en halvsvag syre (fosforsyre, citronsyre, salpetersyre, myresyre, oxalsyre o. lign.). Temperaturen kan være 20-90 °C og procestiden op til mange timer, hvis det er noget mere genstridigt, der skal fjernes.

*Jernafsmitninger* er et specielt problem, som ofte kan klares med en dekontaminering. *Rust* (jern-oxider og -hydroxider) er kun langsomt opløseligt i salpetersyre, men langt bedre i en varm blanding af citronsyre og fosforsyre. *Metallisk jern* derimod opløses bedre i salpetersyre.

### Elektropolering

Elektropolering (el-polering) er den eneste overfladeprocess, der kræver en ydre strømkilde. Badet er typisk en stærk blanding af svovlsyre og fosforsyre, temperaturen er oftest over 50 °C, og selve emnet kobles anodisk ved hjælp af en ensretter.

Under selve processen opløses en del af stålet, og da opløsningen primært sker fra toppen af overfladens mikroruheder, vil processen give en langsom nivellering, og overfladeruheden falder, hvilket igen medfører, at overfladen bliver blankere (se billede i Kapitel 6). El-polering kan teoretisk set også opløse anløbninger, men gør det langt fra altid, hvorfor det anbefales at foretage en *bejdsning* før elektropoleringen.

Udover at producere en smuk, blank overflade vil en elektropolering øge korrosionsbestandigheden af stålet. Faktisk er elektropolering den eneste proces, der er i stand til at hæve korrosionsbestandigheden væsentligt sammenholdt med en normal 2b-overflade, hvilket skyldes den lave overfladeruhed, der gør overfladen meget uegnet til at opsamle klorid og andre forureninger. Over vandlinjen gør den fine ruhed, at salte og andre korrosive sager ikke så let kan blive siddende på stålet, og der kendes eksempler på, at elektropoleret 4301 klarer sig lige så godt som 4401, 2b.

Ulempen ved el-polering er især *prisen*. Det er en kompliceret og dyr proces, dels pga. udstyret, dels pga. besværet med at montere katoderne de rette steder. El-polering er derfor en proces, der næsten udelukkende anvendes til særligt kritisk udstyr i f.eks. medicinalbranchen, hvor man netop ønsker den lave ruhed aht. rengøringsvenligheden og den minimale risiko for mikrobielle vækster.

### Kemisk overfladebehandling af rustfrit stål, oversigt:

	Badsammensætning	Procestid	Anløbninger	Cr-oxider	Ruhed
Bejdsning	10-20 % HNO <sub>3</sub> + 1-6 % HF	1-12 timer	Fjernes	Fjernes	Stiger
Passivering	18-25 % HNO <sub>3</sub>	30-60 min.	Ingen effekt	Styrkes	Uændret
Dekontaminering	2-10 % "halvsvage" syrer	1-48 timer	Ingen effekt	Ingen effekt	Uændret
El-polering	60-70 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	10-15 min.	Nogen effekt	Nogen effekt	Falder

## Kapitel 8: Svejsemetoder

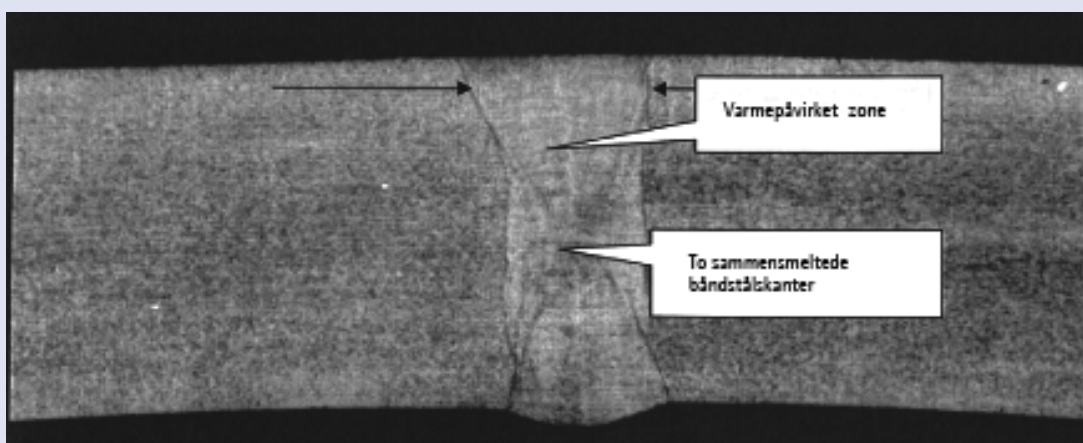
### TIG og laser

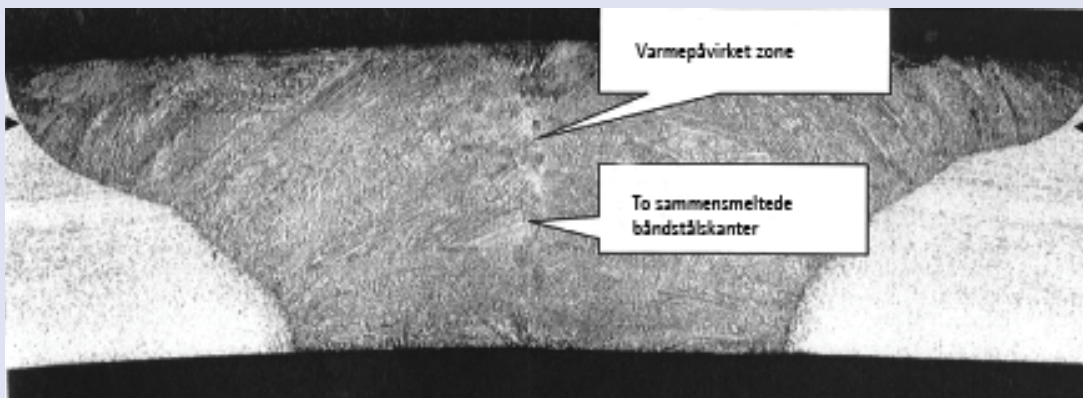
Damstahls leverandør udfører in-line-svejsning med en fuldautomatisk LASER- og TIG- (Tungsten Inert Gas)-metode afhængig af rørvæggens tykkelse i henhold til de almindeligt anvendte produktionsstandarder.

Svejsning udføres ved at sammensmelte de to båndstålkanter, hvorved det varmемæssigt ændrede område begrænses, og det indvendige område beskyttes med en passende beskyttende gas. LASER- og TIG-svejsmetoderne sikrer høj pålidelighed for svejseområdet, hvilket gør produktet egnet til ethvert formål.

Se foto n° 1 : Lasersvejsning – varmepåvirket zone ca. 1mm (x50)

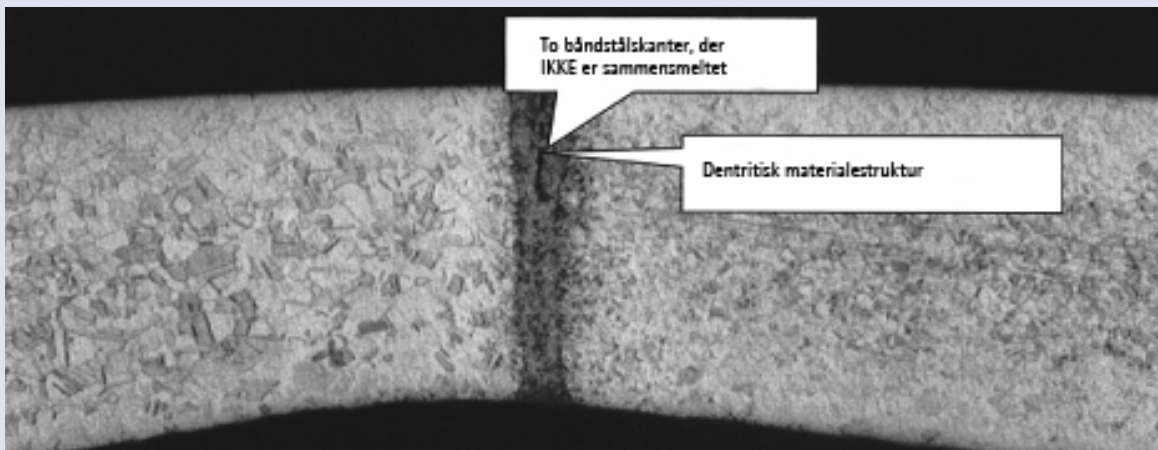
Se foto n° 2 : TIG-svejsning – varmepåvirket zone ca. 4,5 mm(x50)





#### H.F. højfrekvenssvejsning

Udføres i forbindelse med fremstilling af rør til konstruktionsmæssige formål samt i forbindelse med produktion af udstødningssystemer til biler. Til disse anvendelsesområder foretrækkes HF-metoden pga. dens omkostningseffektive produktivitetsfordele. Derimod er den lille svejsesøm, der opnås med HF (se foto n° 3 – x50), ikke altid optimal mht. evnen til at arbejde, modstå pres og korrosionsbestandighed pga. manglende sammensmeltning af båndstålkanter og oxyddannelsen på svejsekanterne.



## Kapitel 8: Svejsemetoder

### Blankglødning

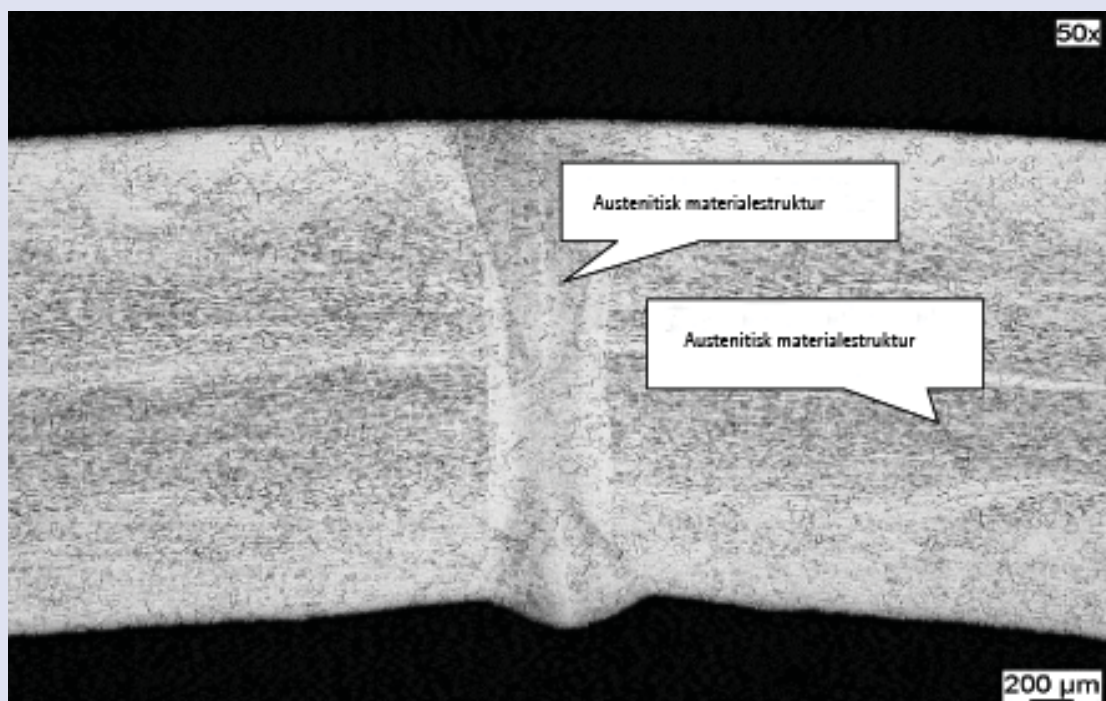
Blankglødning udføres i en ovn fuld af hydrogen (H<sub>2</sub>) ved temperaturer på mellem 1040° C og 1100° C og efterfølges af en hurtig afkøling. Hydrogenet er IKKE et iltningmiddel og derfor dannes der ingen overfladeiltning, og bejdning er ikke længere påkrævet efter blankglødningen.

Den største fordel ved denne løsning er – udover en blank og jævn overflade, som letter videre bearbejdning af rørene – materialets forbedrede korrosionsbestandighed.

En sådan behandling, der udføres på det sidste trin i produktionsprocessen, sikrer en komplet løsning for evt. karbider dannet ved kornkanten, hvorved der opnås en austenitisk matrice uden fejl. Dette gør det muligt at undgå det farlige fænomen intergranular korrosion (tilstedeværelse af svovl og klor under svejsning pga. høje temperaturer). Den austenitiske struktur, der opnås gennem off-line blankglødning, er homogen med regelmæssig kornstørrelse (dimensionen varierer fra 6 til 8 ASTM); som en konsekvens heraf forbedres stålets strækegenskaber – især forlængelse – med forøget plasticitet og formindsket spændinger.

Denne materialeegenskab er meget værdsat af alle slutforbrugere, som udfører yderligere forarbejdninger af rør så som bøjning og formning.

Se foto n° 4- x50, hvor materialet i den dentritiske zone er blevet helt erstattet af det austenitiske materiale.

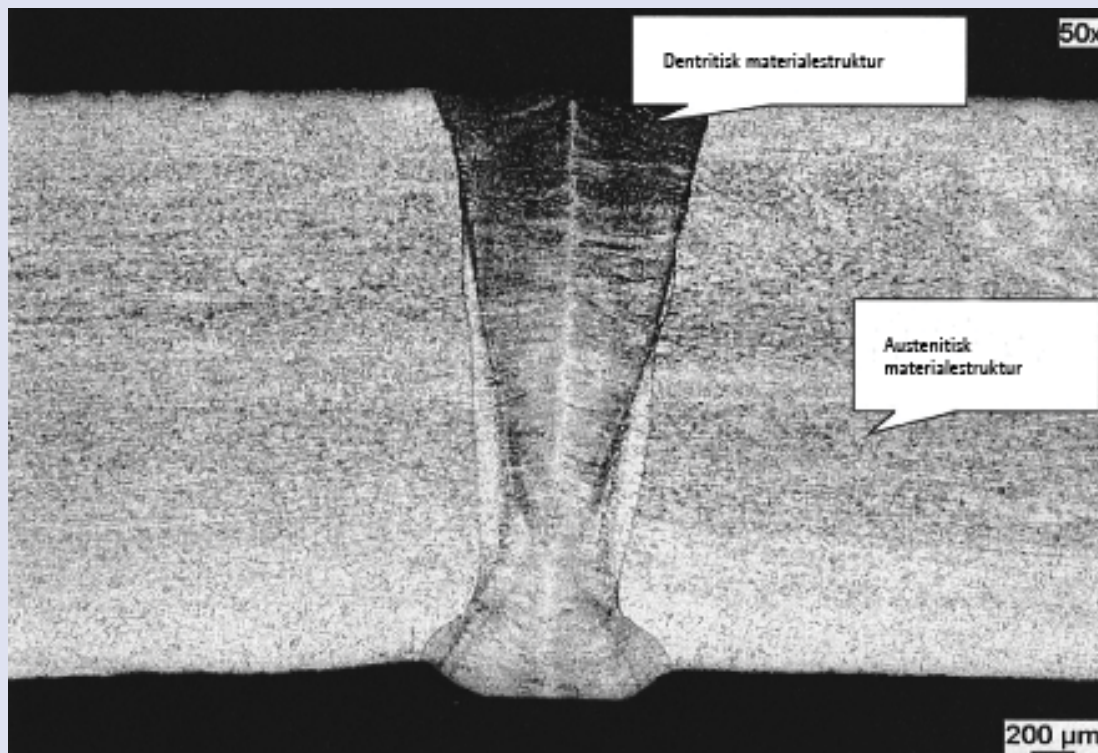


### Rør, ikke-glødede - bejdsede

Svejste rør kan leveres i ikke-glødet udførelse. Dette produkt gennemgår den samme produktionsproces bortset fra varmebehandlingen. Rørene sendes i stedet til en kemisk bejdsbehandling. Bejdsbadet består af svovlsyre og fluorsyre.

Denne proces kan – både på den ydre og den indre overflade og på enderne – eliminere ethvert tegn på ferro-kontaminering og også evt. oxyder, som kan forekomme på metaloverfladen som et resultat af mekanisk bearbejdning (svejserruller, slibebånd, skæreudstyr) og svejsning.

Se foto n°5 – x50 rør, ikke-glødede.



## Kapitel 8: Svejsemetoder

### BØRSTEDE RØR

Børstede rør kan fås på markedet. Kun den ydre overflade børstes for at undgå den kemiske behandling i forbindelse med bejdsning.

Disse produkter har dog en lavere korrosionsbestandighed end bejdsede rør, hvis de udsættes for det samme miljø-mæssige angreb. Dette skyldes både aflejringerne på metaloverfladen, der er blevet kontamineret under produktionsprocessen, og at overfladen er mere ru, hvilket nemt kan holde på oxyder og spor af ferrokontamination. Selve slibebåndene kan efterlade materiale, som kan give anledning til korrosion.

Børstede rør, kræver pga. deres finish en hyppigere periodisk vedligeholdelse sammenlignet med bejdsede rør. Det skal understreges, at der udelukkende er tale om en udvendig børstning, og derfor kan den ikke fjerne en evt. kontaminering på den indvendige overflade og i enderne, der er afskåret med en klippemaskine lavet af stålbaseerede materialer.

### EDDY CURRENT-TEST

De svejste rør, der leveres i TIG og Laser svejste udførelse fra Damstahl, gennemgår – efter de er blevet kalibreret – en Eddy Current-test. En sådan ikke-destruktion-test udføres ved at danne et magnetisk felt rundt om røret og spore enhver afbrydelse, der skyldes lækager eller huller.

Kapitel 9: Tabel over de hyppigst anvendte rustfri stål kvaliteter og deres kemiske sammensætning

EN	STRUKTUR	C %	Cr %	Ni %	Mo %	Si ≤ %	Mn ≤ %	S ≤ %	P ≤ %	Andet	AISI (UNS)	SS
1.4003	Ferrit	≤ 0,03	10,5-12,5	0,30-1,00	-	1,00	1,50	0,015	0,040	N ≤ 0,030	410S	-
1.4016		≤ 0,08	16,0-18,0	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	-	430	2320
1.4509		≤ 0,030	17,5-18,5	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	Ti 0,10-0,60; Nb 3xC+0,30-1,00	441 UNS 43932	-
1.4510		≤ 0,05	16,0-18,0	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	Ti 4x(C+N)+0,15-0,80	430Ti	-
1.4512		≤ 0,03	10,5-12,5	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	Ti 6x(C+N)-0,65	409	-
1.4521	≤ 0,025	17,0-20,0	-	1,80-2,50	-	1,00	1,00	0,015	0,040	N ≤ 0,030; Ti 4(C+N)+0,15-0,80	444	2326
1.4021	Martensit	0,16-0,25	12,0-14,0	-	-	1,00	1,50	0,030	0,040	-	420	2303
1.4057		0,12-0,22	15,0-17,0	1,50-2,50	-	1,00	1,50	0,015	0,040	-	431	2321
1.4104	Austenit	0,10-0,17	15,5-17,5	-	0,20-0,60	1,00	1,50	0,15-0,35	0,040	-	(430F)	2383
1.4301		≤ 0,07	17,5-19,5	8,00-10,5	-	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	304	2333
1.4305		≤ 0,10	17,0-19,0	8,00-10,0	-	1,00	2,00	0,15-0,35	0,045	Cu ≤ 1,00; N ≤ 0,11	303	2346
1.4306		≤ 0,030	18,0-20,0	10,0-12,0	-	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	304L	2352
1.4307		≤ 0,030	17,5-19,5	8,00-10,5	-	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	304L	-
1.4310	0,05-0,15	16,0-19,0	6,00-9,5	≤ 0,80	2,00	2,00	0,015	0,045	0,045	N ≤ 0,11	302	2331
1.4541	≤ 0,08	17,0-19,0	9,00-12,0	-	1,00	2,00	0,015	0,045	0,045	Ti 5x(C)-0,70	321	2337
1.4401	Austenit (syrefast)	≤ 0,07	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316	2347
1.4404		≤ 0,030	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316L	2348
1.4418		≤ 0,06	15,0-17,0	4,00-6,00	0,80-1,50	0,70	1,50	0,015	0,040	N 0,020	-	2387
1.4432		≤ 0,030	16,5-18,5	10,5-13,0	2,50-3,00	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316L	2353
1.4435		≤ 0,030	17,0-19,0	12,5-15,0	2,50-3,00	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316L	2353
1.4436	≤ 0,07	16,5-18,5	10,5-13,0	2,50-3,00	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316	2343	
1.4539	≤ 0,020	19,0-21,0	24,0-26,0	4,00-5,00	4,00-5,00	0,70	2,00	0,015	0,030	N ≤ 0,15; Cu 1,20-2,00	"904L" *	2562
1.4571	≤ 0,08	16,5-18,5	10,5-13,5	2,00-2,50	2,00-2,50	1,00	2,00	0,015	0,045	Ti 5x(C)-0,70	"316Ti" *	2350
1.4828	Austenit (varmebest.)	≤ 0,20	19,0-21,0	11,0-13,0	-	1,50-2,50	≤ 2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	309	-
1.4841		≤ 0,20	24,0-26,0	19,0-22,0	-	1,50-2,50	≤ 2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	314	-
1.4845		≤ 0,10	24,0-26,0	19,0-22,0	-	≤ 1,50	≤ 2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	-	-
1.4460		≤ 0,05	25,0-28,0	4,50-6,50	1,30-2,00	1,00	2,00	0,015	0,035	N 0,05-0,20	329	2324
1.4462	Duplex	≤ 0,030	21,0-23,0	4,50-6,50	2,50-3,50	1,00	2,00	0,015	0,035	N 0,10-0,22	-	2377

Bemærk, at nutidens EN-normer kun er næsten identiske med de gamle W.Nr.-betegnelser. Spalte med "AISI", "UNS" og "SS" angiver nærmeste, parallelle standard. Især AISI-systemet "passer" ikke helt med EN, hvorfor AISI- og SS-angivelserne skal betragtes som omtrentlige.

\*) Hverken "316Ti" eller "904L" eksisterer i AISI-systemet, men begge betegnelser anvendes jævnligt som "kaldenavne".

Kapitel 9: Tabel over de hyppigst anvendte rustfri stålqualiteter og deres mekaniske egenskaber

EN	HB 30 hårdhed (HRC)	R <sub>p0,2</sub> (≥ N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>p1,0</sub> (≥ N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> Brudstyrke (≥ N/mm <sup>2</sup> )	A <sub>5</sub> Brudforl. (L <sub>0</sub> = 5 do) (≥ %)	Z Areal- red. (≥ %)	AV Kærvislag- sejhed (≥ J)	Masse- fylde (kg/dm <sup>3</sup> )	Varme- kap. (J/g·K)	Varme- ledn. (W/K·m)	Termisk udvid. 20-100°C (10 <sup>-6</sup> /°C)	Elektrisk modstand (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	Elast.- modul (kN /mm <sup>2</sup> )
1.4003	≤ 200	260	-	450-600	20	-	-	7,7	0,43	25	10,4	0,60	220
1.4016	≤ 200	240	-	400-630	20	60	-	7,7	0,46	25	10,0	0,60	220
1.4509	≤ 200	200	-	420-620	18	-	-	7,7	0,46	25	10,0	0,60	220
1.4510	≤ 185	270	-	450-600	20	60	-	7,7	0,46	25	10,0	0,60	220
1.4512	≤ 180	220	-	390-560	20	-	70	7,7	0,46	25	10,5	0,60	220
1.4521	≤ 200	320	-	450-650	20	-	-	7,7	0,43	23	10,4	0,80	220
1.4021	≤ 230	500	-	700-850	12	50	20	7,7	0,46	30	10,5	0,60	215
1.4057	≤ 295	600	-	800-950	14 / 12	45	25 / 20	7,7	0,46	25	10,0	0,70	215
1.4104	≤ 220	300	-	500	12/10	50	0	7,7	0,46	25	10,0	0,70	215
1.4301	≤ 215	190	225	500-700	45 / 35 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,73	200
1.4305	≤ 230	190	225	500-750	35	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,73	200
1.4306	≤ 215	180	215	460-680	45 / 35 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,73	200
1.4307	≤ 215	175	210	500-700	45 / 35 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,73	200
1.4310	≤ 230	195	230	500-750	40	50	-	7,9	0,50	15	16,0	0,73	200
1.4541	≤ 215	190	225	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	50	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,73	200
1.4401	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,75	200
1.4404	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,75	200
1.4418													
1.4432													
1.4435	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,75	200
1.4436	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,0	0,75	200
1.4539	≤ 230	230	260	530-730	40 / 30 <sup>1)</sup>	-	100 / 60 <sup>1)</sup>	8,0	0,45	12	15,8	1,00	195
1.4571	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	50	100 / 60 <sup>1)</sup>	7,9	0,50	15	16,5	0,75	200
1.4828	≤ 223		60 <sup>2)</sup>	500-750	30								
1.4841	≤ 223		60 <sup>2)</sup>	550-750	30								
1.4845	≤ 192		60 <sup>2)</sup>	500-700	35								
1.4460	≤ 260	450	-	620-880	20	-	85	7,8	0,50	15	13,0	0,80	200
1.4462	≤ 270	450	-	650-880	25	-	100	7,8	0,50	15	13,0	0,80	200

1): Traversmåling

2): Ved 600°C. Alle øvrige data for Rp 1,0 er målt ved stuetemperatur

## Kapitel 9: Normoversigt

### Stålrør

DS/EN ISO 1127	Rustfrie stålrør Dimensioner, tolerancer og masse pr. enhedslængde
DS/EN 10216-5	Sømløse stålrør til trykbærende formål Tekniske leveringsbetingelser - Del 5: Rustfrie stålrør
DS/EN 100294-1	Hulprofiler til maskinbearbejdning Tekniske leveringsbetingelser - Del 1: Ulegerede og legerede stål
DS/EN 10217-7	Svejste stålrør til trykbærende formål Tekniske leveringsbetingelser - Del 7: Rustfrie stålrør
DS/EN 10305-1	Præcisionsstålrør Tekniske leveringsbetingelser - Del 1: Sømløse koldtrukne rør
DS/EN 10305-2	Præcisionsstålrør Tekniske leveringsbetingelser - Del 2: Svejste koldtrukne rør
DS/EN 10312/A1	Svejste rustfrie stålrør til transport af vandige væsker, inkl. drikkevand Tekniske leveringsbetingelser

### Levnedsmiddel

ISO 2037	Rustfrie stålrør til levnedsmiddelindustrien Specificerer dimensioner, tolerancer, overfladeruheder, kvaliteter og hygiejniske krav for sømløse eller svejste rør i rette længder til levnedsmiddelindustrien.
ISO 2851	Rustfrie bøjninger og t-stykker til levnedsmiddelindustrien Specificerer dimensioner, tolerancer, overfladeruheder, kvaliteter og hygiejniske krav. Beregnet til brug sammen med rustfrie stålrør specificeret i ISO 2037.
ISO 2853	Rustfrie unioner til levnedsmiddelindustrien Specificerer dimensioner, tolerancer, overfladeruheder, kvaliteter og hygiejniske krav for unionsdele. Beregnet til brug sammen med rustfrie stålrør specificeret i ISO 2037.
DIN 11850	Rustfrie stålrør til levnedsmiddel, kemisk og farmaceutisk industri Dimensioner og kvaliteter.
DIN 11851	Rustfrie fittings til levnedsmiddel, kemisk og farmaceutisk industri Forskruningsdele til valsning og svejsning.
DIN 11852	Rustfrie fittings til levnedsmiddel, kemisk og farmaceutisk industri Teer, bøjninger og reduktioner til svejsning.
DIN 11864-1	Rustfrie fittings til aseptisk, kemisk og farmaceutisk industri Del 1: Aseptiske rørforbindelser - forskruningsdele, standard type.

fortsættes...

## Kapitel 10: Normoversigt

DIN 11864-2	Rustfrie fittings til aseptisk, kemisk og farmaceutisk industri Del 2: Aseptiske rørforbindelser - flangedele, standard type
DIN 11865	Rustfrie fittings til aseptisk, kemisk og farmaceutisk industri Teer, bøjninger og reduktioner til svejsning
DIN 11866	Rustfrie stålrør til aseptisk, kemisk og farmaceutisk industri Dimensioner og kvaliteter
<b>Stangstål</b>	
DS/EN 10056-2	Konstruktionsstål. Uligesidet og ligesidet vinkeljern Del 2: Tolerancer for form og dimensioner
DS/EN 10058	Varmvalsede flade stålstænger til generelle formål Dimensioner, form- og måltolerancer
DS/EN 10059	Varmvalsede kvadratiske stålstænger til generelle formål Dimensioner, form- og måltolerancer
DS/EN 10060	Varmvalsede runde stålstænger til generelle formål Dimensioner, form- og måltolerancer
DS/EN 10088-3	Tekniske leveringsbetingelser for halvfabrikata, stænger, valsetråd, tråd, profiler og blankstål af korrosionsbestandig stål til generelle formål
DS/EN 10278	Blankstål Dimensioner og tolerancer for blankstålprodukter
<b>Plader</b>	
DS/EN 10028-7	Stålblader til trykbærende formål Del 7: Rustfrie stål
DS/EN 10029	Varmvalsede stålblader med en tykkelse på 3 mm eller mere Tolerancer for dimensioner, form og masse
DS/EN 10051+A1	Kontinuerligt varmvalsede, ubelagte plader og bånd af ulegerede og legerede stål Dimensions- og formtolerancer
DS/EN 10088-2	Tekniske leveringsbetingelser for plader og bånd af korrosionsbestandige stål til generelle formål
DS/EN ISO 9445	Kontinuerligt koldvalsede, smalle og brede rustfrie stålbånd, plader/bånd og klippede længder Tolerancer for dimensioner og form
DIN 59220	Flade produkter af stål - Varmtvalsede mønstrede plader Tolerancer for dimension, form og masse

fortsættes...

## Kapitel 10: Normoversigt

### Flanger

DIN 2527

DIN 2576

DIN 2633

DIN 2642

Blindflanger – NT 10

Plane flanger til påsvejsning – NT 10

Svejsflanger med krav – NT 16

Løsflanger – NT 10

DS/EN 1092-1

*(erstatte på sigt  
DIN-normerne)*

Flanger og flangesamlinger

Runde flanger til rør, ventiler, fittings og tilbehør, PN-betegned

Del 1: Stålflanger:

Type 01 – Plane flanger

Type 02 – Løsflanger

Type 05 – Blindflanger

Type 11 – Svejsflanger

### Øvrige

DS/EN 10088-1

Liste over rustfrie stål

DS/EN 10204

Metalliske produkter

Typer af inspektionsdokumenter

For yderligere informationer omkring standarder, henvises til de respektive organisationer:

ASME

American Society Of Mechanical Engineers  
[www.asme.org](http://www.asme.org)

ASTM

American Society for Testing and Materials  
[www.astm.org](http://www.astm.org)

BS

BSI British Standards  
[www.bsi-global.com](http://www.bsi-global.com)

DS/EN

Dansk Standard  
[www.ds.dk](http://www.ds.dk)

DIN

Deutsches Institut für Normung  
[www.din.de](http://www.din.de)

ISO

International Organization for Standardization  
[www.iso.org](http://www.iso.org)

3-A

3-A Sanitary Standards, Inc.  
[www.3-a.org](http://www.3-a.org)

FDA

U.S. Food and Drug Administration  
[www.fda.gov](http://www.fda.gov)

## Chapter 1: What is Stainless Steel?

*Stainless steel is a large group of metals with a couple of properties in common: The main element is iron (> 50 % Fe = "steel"), and apart from that the steel contains at least 10-12 % chromium (Cr). In its simplest form, no other elements are required in order to make "stainless steel", proved by the fact that the simplest possible stainless steel (EN 1.4003) contains only 10.5 % Cr, and the rest is iron.*

*Historically, the simple chromium alloyed steel types were invented back in 1912. In 1913, the German Krupp Company added nickel (Ni) in order to improve the mechanical properties (the birth of the austenitic stainless steel), and in 1920, the beneficial effect of adding even small amounts of molybdenum was observed. Thereby, the "acid resistant" stainless steel was invented.*

*Apart from chromium and nickel, the steel may contain a large array of other elements, all of which affect the mechanical or chemical properties in one way or the other. The description of the effect and importance of the different elements is enclosed in Chapter 2.*

*According to their microstructure, the stainless steel types may be classified into five main groups:*

### Austenitic Stainless Steel

Usually recognized by a high content of chromium (Cr), high nickel (Ni), low carbon (C) and frequently molybdenum (Mo, up to 6 %), the austenitic group is by far the largest and most important type of stainless steel, and both the common EN 1.1.4301 (18/8, AISI 304) and the acid resistant steel types (4401/04, AISI 316(L) etc.) belong to this group.



*Among stainless steel, the EN 1.4301 and 4401 types still make out about 70 % of the world-wide market. These welded pipes are made of "common stainless steel", 4301.*

*Mechanically, the austenites are recognized by being non-magnetic; however, cold deformation may lead to the steel being slightly magnetic. In general, the austenitic steel types possess a long elongation (A5). This implies great ductility, and the austenites are generally soft and particularly adapted to plastic deformation such as deep drawing of kitchen sinks.*

*Compared to the other types, the ductile austenites behave a bit like "chewing-gum", and the excellent combination in between the mechanical ductility and the corrosion resistance has ensured that the austenites are still the most widely used group of stainless steel. Anything from door handles to king-size brewery tanks are made of austenitic stainless steel.*

*In contrast to the ferritic, martensitic and duplex types, the austenitic steel types do not suffer from brittleness at very low temperatures, and their tendency to suffer from "creep" at higher temperatures is lower as well. In addition, the corrosion resistance of the austenitic steel types is generally high; however, in particular the lower ones (4301 and 4401 classes) are vulnerable to stress corrosion cracking (SCC, see Chapter 4). For that reason, the austenites are not always useful in warm conditions.*

### Martensitic Stainless Steel

Normally contains 12-16 % Cr, low Ni, rarely Mo and a relatively high content of carbon (C, 0.12-1.2 %). Due to the carbon content, the martensitic steels can be hardened to more than 1000 HV by rapid cooling, and they are extremely adapt for manufacturing cutting tools, surgical instruments and high-quality kitchen knives.



*Surgical instruments, both made of martensitic stainless steel. Their mechanical strength is impressive, whereas the corrosion resistance is low.*

After the hardening, the martensitic steel types can be neither welded nor cold deformed. Along with any other heat treatment, welding will cause the steel to lose its hardness. The martensitic steel types are strongly magnetic and due to the low chromium content, the corrosion resistance is generally poor. This is the reason why expensive kitchen knives frequently suffer from superficial pitting corrosion after a turn in the dish washing machine.

### Ferritic Stainless Steel

Typically, this type contains 12-18 % Cr, low Ni, low carbon (C 0.12) and sometimes molybdenum (Mo). The ferritic stainless steel types possess the same metallurgical structure as mild steel; however, due to the low carbon content, the ferrites are not hardenable. Consequently, the ferrites are relatively soft, but due to a shorter elongation, they are less adapted to cold deformation than the soft austenites. All ferritic stainless steel types are strongly magnetic, and the stabilized types (such as 4512, 4509 and 4521) are weldable.



*Ferritic stainless steels are very useful for manufacturing thin-walled specimens without too much welding or bending. This Syrian made kitchen utensil has been made of 4016 (AISI 430), a very common steel within catering and a perfect example that it is actually possible to perform deep-drawing in ferritic stainless steel.*

The lowest alloyed types (i.e. 4003) possess a relatively poor corrosion resistance, in particular in strong acids, whereas the higher alloyed types, such as 4509 and 4521, equal the well-known 4301 and 4401 with respect to pitting corrosion and, to a certain extent, crevice corrosion. Further-more, the resistance to wards stress corrosion cracking is much better than the parallel austenites (Chapter 4 + 5).

Due to the low nickel content, the ferritic stainless steel types are relatively cheap compared to their austenitic parallel alloys. For that reason, the global consumption of ferritic stainless steel types is steeply increasing, in particular for purposes where one needs a bright, magnetic surface, such as fridge doors or door handles, but does not need the huge elongation of the austenites.

In addition, the ferritic stainless steel types possess great advantages when dealing with "hot equipment". Under such conditions, the risk of SCC may be substantial. Furthermore, it may be advantageous that the thermal conductivity of the ferritic types is better than for the austenites, and the thermal elongation corresponds to that of mild steel – approximately 2/3 of that of the austenites.

## Chapter 1: What is Stainless Steel?

### Duplex Stainless Steel

Two-phase mixed structure containing approximately 55 % ferrite and 45 % austenite. Cr is generally high (22-26 %), Ni 1-7 %, frequently Mo and low C. With regard to pitting corrosion, crevice corrosion, general corrosion and, in particular, SCC, the corrosion resistance is normally high.

Mechanically, the duplex steel types are magnetic and possess a significantly higher yield stress than both the austenitics and the ferrites. From a mechanical point of view, the duplex steel types are particularly useful for large constructions. If so, one can reduce the thickness of the steel and thereby the cost of the material and the result is more corrosion resistant steel at a lower price.

The drawback of the duplex steel types is the increased costs of the manufacturing along with increased difficulties during welding. The risk of formation of intermetallic phases during heat treatment (such as welding) is substantial, and the risk increases with increasing content of Cr and Mo.

For duplex steel, the thermal extension coefficient and heat transfer coefficient are somewhat in between the values of the ferritic and austenitic steel types. This means better heat transfer and less thermal elongation as compared to the austenitic stainless steel types.

### Precipitation hardening Stainless Steel (PH)

Two-phase martensitic-austenitic stainless steel alloy typically contains 15-17 % Cr, 4-8 % Ni, low Mo and up to 5 % copper (Cu). At elevated temperatures, precipitation hardening takes place due to the segregation of mainly copper containing phases.

The most common (= least uncommon!) PH alloys are the 15-5 PH and the 17-4 PH. Being strong and hard, they are sometimes used for chains and golf clubs, however, they are still not that common in Scandinavia.



*A rare example of the use of the precipitation hardening 17-4-PH alloy (EN 1.4542). Both the face and the body of this high-quality golf club have been made of the alloy.*

### Chromium, Cr

The main alloying element in all types of stainless steel, and normally present in between 10 and 25 % (by weight). The invisible passive film of the steel mainly consists of chromium oxides, and in general, the corrosion resistance in most types of media (in particular towards pitting and crevice corrosion) increases with increasing Cr content. The formation of the passive layer is at its best during aerobic (oxygenated) conditions. Ferrite stabilizing element, and mechanically, the yield strength increases with increasing Cr, and so does the heat resistance and the resistance towards high-temperature scaling.

### Molybdenum, Mo

Added to the steel from 0.8 to 6.2 %. Even better than Cr in order to form a protective passive layer and even small amounts of Mo improve the corrosion resistance significantly, in particular in acid, anaerobic environments. Works positively against all types of corrosion. Like Cr, Mo is a ferrite stabilizing element which increases the mechanical strength of the steel.

### Nickel, Ni

In austenitic steel types present from 8 to 25 %, in duplex 4-7 %, and less than 2 % in ferritic and martensitic types. Ni stabilizes the ductile austenitic phase and thereby works as "softener", greatly enhancing the elongation of the steel, in particular at low temperatures. In austenites, increased amounts of Cr and Mo are normally compensated by a similar increase in Ni – just to keep the steel austenitic. Ni increases the resistance towards general corrosion and stress corrosion cracking (SCC), and slows down the corrosion velocity once the pitting or crevice corrosion has been initiated. Expensive metal with the nasty habit of creating fluctuating alloy surcharge.

### Carbon, C

Harmful element which, apart from the martensites, should be kept as low as possible. Normal limits are < 0.08 % or 0.07 for most types; < 0.03 % for low carbon types. For martensites, C is usually kept in the range of 0.12-1.2 %; the higher C, the harder the steel after hardening. During heat treatment at temperatures in between 500 and 850 °C (i.e. welding), C binds Cr (= sensitization) which may lead to intergranular corrosion. This is the main reason why most steel types are made as low-carbon (such as EN 1.4306, 4307, 4404 and 4435). C is a very strong austenite stabilizer, and low content of carbon must be compensated by an increase in Ni in order to keep the austenite structure. This is particularly evident in the case of 4435.

### Nitrogen, N

Present up to 0.5 %. Useful element which enhances the passivity reaction, even in very small amounts. In practice, however, it is very hard to add N to the molten metal. Frequently used in high-end austenites and duplex steel types. N is the only austenite stabilizer which increases the Pitting Resistance Equivalent (PREN) of the steel (factor 16).

### Silicon, Si

Normally added as an unwanted pollution from the ceramic melting pots at the steel works. Ferrite stabilizer and normally present in a concentration less than 1.0 %. In the normal range, Si has no big effect on the corrosion resistance of the steel, but is useful in high-temperature austenites, such as 4828 and 4841.

## Chapter 2: The Alloying Elements of Stainless Steel

### Manganese, Mn

Like Si, Mn is normally present as a pollution element in the steel. Concentration level normally < 2 %. In the "AISI 200" series (i.e. 4372), however, Mn is used as a cheap nickel substitute Mn and may reach 7.5 %. Improves the hot rolling properties of the steel and increases the mechanical strength slightly. Mn is an austenite stabilizer with no big effect on the corrosion resistance of the steel apart from binding sulphur as highly harmful manganese sulfides (MnS).

### Sulphur, S

Unwanted pollution and extremely harmful to the corrosion resistance. Normally, S is kept lower than 0.015 % (0.030 for rods). However, fine machining steel qualities may contain 0.15-0.35 % (i.e. 4305 = AISI 303). S forms manganese sulfides which tend to make the steel short-chipped and thus reduce tool wear during milling. Consequently, fine machining types are much better than normal austenitic steel types as regards most types of machining. The downside is that i.e. 4305 is significantly less corrosion resistant than the normal 4301, and sulphur alloyed steel types are unsuitable for welding as well as pickling.

### Phosphorous, P

Like S, an unwanted pollution. However, slightly less damaging to the corrosion resistance. The limit of most standards is < 0.045 %. In most cases, however, the content is much lower.

### Copper, Cu

0-2 %. Increases the corrosion resistance in acid, anaerobic environments (i.e. sulfuric acid) by increasing the effect of the cathodic hydrogen evolution, thereby making the acid more oxidizing (= anodic protection). I.e. 904L (4539) contains 1.2-2.0 % Cu and is particularly adapted for handling sulfuric acid. Cu increases the mechanical strength moderately.

### Titanium / Niobium, Ti / Nb

Important elements and usually present up to 0.80 %. Both Ti and Nb bind the potentially harmful C and thereby prevent sensitization and intergranular corrosion. The effect of adding Ti and Nb corresponds to the use of low-carbon steel, and 4541 and 4571 can usually be substituted by 4306/07 and 4404 – and vice versa. It is usually a question of tradition with the Germans preferring the Ti stabilized steel types while most others prefer low-carbon. Mechanically, Ti and Nb alloyed steel types are marginally stronger than the corresponding low-carbon steel while the Ti steels are harder to polish and may give yellowish welds in combination with nitrogen containing gases. In ferritic steel types (i.e. 4509, 4521, 4526), Ti and/or Nb stabilize the steel and prevent grain growth, thus making the steel weldable without damaging the ability to be polished / electro polished.

Below, a number of common *Damstahl* stainless steels are listed together with their most common use. All types are listed according to the new EN standards, which almost (but not 100 %) correspond with the old W.Nr. system. The requirements of the AISI numbers are rarely identical with those of the parallel EN numbers, so instead, they should be regarded as the *closest standard*. Consequently, the translation should therefore be regarded as approximate, not absolute.

### Ferritic Stainless Steel:

#### EN 1.4003 / AISI 410

The simplest stainless steel, containing approx. 11 % Cr and the rest iron (Fe). Due to the absence of Mo and Ni, 4003 is a cheap alloy possessing a relatively poor corrosion resistance. Possesses a fine mechanical strength and may be forged as well as welded and can be used for a number of applications where mild carbon steel is inadequate, i.e. cars and buses, or where galvanized steel is used indoors. For improved weldability, the Ti stabilized parallel is EN 1.4512.

#### EN 1.4016 / AISI 430

16 % Cr steel possessing good mechanical strength and a superior corrosion resistance compared to the 4003. With regard to pitting corrosion above/below water, 4016 is close to but still slightly inferior to the austenitic 4301. 4016 possesses a good heat resistance and may be used up to 800 °C. However, welding is tricky, and a post-treatment is recommended in order to avoid brittle intermetallic phases along the welds. Widely used as sheets and coils for catering purposes. 4016 may, however, also replace galvanized steel for indoor purposes.

#### EN 1.4113 / AISI 434

Molybdenum containing (1 %), ferritic steel possessing a good corrosion resistance to chloride containing media; roughly in between the 4301 and 4401 classes. Due to the absence of stabilizing elements (Ti, Nb), the 4113 cannot be welded and should be used as coils or sheets.

#### EN 1.4509 / AISI 441

Ti-Nb stabilized, ferritic, 17½ % Cr steel, corresponding to a slightly upgraded 4016 (AISI 430), with improved properties. Due to its good corrosion resistance, weldability and relatively low and very stable price, 4509 is one of the most interesting and useful steels on the market and may be expected to replace 4301 in many major applications such as catering, building construction and heat exchangers. Theory as well as practice have shown 4509 to equal 4301 with regard to pitting corrosion (Chapter 4 + 5), and for hot parts, the ferrites are generally superior to the austenites due to their improved resistance towards SCC. Furthermore, 4509 has got a great potential as a substitute for galvanized steel. However, like all ferrites, it is only available as thin sheets or pipes. For all ferritic stainless steel types, care must be taken to ensure that the right welding process, filler metal and parameters are chosen.

#### EN 1.4510 / AISI 439 (430Ti)

With 15.5 % Cr, the 4510 corresponds to a Ti stabilized 4016 (no Nb). As 4509, the 4510 is weldable, but it is slightly less corrosion resistant than 4509 and harder to get. This combination is bound to make the 4510 a rare bird.

## Chapter 3: Applications of Common Stainless Steel Alloys

### EN 1.4512 / AISI 409

Containing only 11 % Cr, the 4512 is the lowest alloyed Ti-Nb-stabilized (and thereby weldable) ferritic stainless steel. Due to the low Cr, 4512 possesses a comparatively low corrosion resistance; however, it is weldable and inexpensive and may replace galvanized steel for certain indoor applications. Due to their excellent resistance against SCC, the ferrites are particularly useful for warm parts, in particular made of sheets.

### EN 1.4521 / AISI 444

Along with the 4509, the "acid resistant ferrite" 4521 is the most interesting and useful ferritic alloy. Stabilized with Ti and Nb, and apart from a high mechanical strength, 4521 possesses an excellent corrosion resistance due to 17.0-20.0 % Cr and 1.80-2.50 % Mo. Theory as well as practice have shown that as regards resistance towards pitting corrosion, 4521 is at least equal to that of "acid resistant" 4404 (AISI 316L) and superior to 4301 in chloride containing environments. Like all the other ferrites, 4521 is superior to its austenitic counterparts with regard to SCC resistance (Chapter 4 + 5) and therefore very useful at higher temperatures (60+ °C). In short, 4521 is useful for applications where 4401, 4404 or 4571 are normally used. The main drawbacks are potential difficulties in welding and the reduced availability; mostly thin sheets and pipes.

### EN 1.4526 / (AISI 436)

Nb stabilized steel containing around 17 % Cr and 1.25 % Mo, performing somewhere in between 4301 and 4404 with regard to pitting corrosion. Excellent corrosion resistance against chloride containing environments and industrial atmosphere and, along with the other ferrites, not prone to SCC. This makes 4526 ideal for warm or hot parts where the conventional austenites (4301 and 4404 classes) will fail. Can be forged and shaped and, using the right parameters, be assembled using resistance welding.

### Martensitic Stainless Steel:

#### EN 1.4057 / AISI 431

Hardenable 15-17 % Cr steel, possessing, relative to the other martensitic steel types, a fairly good corrosion resistance. Widely used for making knives and, due to its high strength, axels. Most easily available as rods.



*The ideal combination in between hardness and formability. The blade of this Gense knife has been manufactured from the martensitic 4057, while the handle has been made of the softer, but more corrosion resistant 4301.*

#### EN 1.4104 / (AISI 430F)

Martensitic fine machining steel type containing up to 0.35 % S and even a small amount of Mo. Due to its high content of S, this steel type is very useful for machining. Sometimes used if one wants a magnetic fine machine steel grade.

### Austenitic Stainless Steel:

#### EN 1.4301 / AISI 304

The classical, stainless steel (18/8) quality and still the most important steel for manufacturing anything from kitchen sinks, forks and spoons and dairy and butchery equipment. Ductile, weldable and fairly corrosion resistant in most normal media. However, the resistance in chloride containing environments (in particular at elevated temperatures) is frequently inadequate. Due to chlorides, 4301 should not be used for outdoors purposes. It is better suited for indoors use. At temperatures above 60 °C (and sometimes even below), SCC is a significant risk (Chapter 4). Upgrading to the even more corrosion resistant 4404 ("acid resistant") will solve most corrosion problems; otherwise, even higher alloyed steel types must be considered.

#### EN 1.4305 / AISI 303

Sulphur alloyed 4301 possessing excellent properties for cutting, milling and so due to the formation of MnS (Chapter 2). Only available as rod or wire, and is not good for neither welding nor pickling. Compared to common 4301, the corrosion resistance of 4305 is inferior in almost any type of media. Consequently, 4305 should be used with care.

#### EN 1.4306 / AISI 304L

Low-carbon edition of 4301. C = 0,03 % due to the risk of sensitization and subsequent intergranular corrosion (Chapter 2 + 4). The theoretical disadvantage is a marginally lower mechanical strength. The nickel content of 4306 is quite high (10-12 %), and the steel is therefore slightly "over-austenitic" making it less prone to deformation hardening. This, in turn, makes the 4306 useful for stretch-forming. However, the increased nickel makes 4306 quite expensive and hard to get.

#### EN 1.4307 / AISI 304L

The standard low-carbon 4301. Identical to 4306; however, with less nickel (8-10,5 % Ni). 4307 is identical with 4301 with the sole exception that the upper limit of carbon is only 0.03 % instead of 0.07 %, which is preferable when welding, in particular when welding thick goods (Chapter 2 + 4). Due to the lower Ni, 4307 is cheaper and "less austenitic" than 4306 (10-12 %), and traces of ferrite or deformation martensite may cause some magnetism, in particular after machining.

#### EN 1.4310 / AISI 301 / 302

"18/8 classic". An older edition of the standard 4301 recognizable by comparatively high carbon content. This increases the mechanical strength of the steel. However, the drawback is a significant increase in the risk of sensitization and intergranular corrosion. Sometimes used when high-temperature tensile stress is an issue.

#### EN 1.4401 / AISI 316

The standard "acid resistant" steel type. Mechanically much like the "kid brother" 4301; however, due to its Mo content (2.0-2.5 %), its corrosion resistance is significantly better in almost every single environment, regardless if the risk of corrosion is pitting, crevice corrosion or SCC (Chapter 4). Due to the frequently poor performance of 4301, the 4401 ought to replace 4301 as standard material. However, because of the high and volatile prices of molybdenum and in particular nickel, the 4401 class is often expensive.

#### EN 1.4404 / AISI 316L

The low-carbon edition of 4401, and the standard material for most of the pharmaceutical industry world-wide. 4404 is the most common stainless steel for "critical" parts where the common 4301 or 4306/7 just are not good enough. 4404 is Damstahl's best sold acid resistant steel type and available in almost any shape and condition including a large array of fittings.

## Chapter 3: Applications of Common Stainless Steel Alloys

### EN 1.4418 / -

Comparatively low-alloyed, acid resistant steel, mostly available as rods or bars. The content of only 1 % Mo and 4-6 % Ni makes the steel two-phased and mechanically strong, and frequently, it is used for hydraulic equipment; sometimes even plated with hard-chromium. Very popular for Norwegian offshore use.

### EN 1.4432 / AISI 316L

Developed by the Finnish pulp and paper industry, this 2.5 % Mo steel resembles the 4435 a lot. However, the Cr content is marginally lower, and so is Ni. Due to the 2.5 % Mo, 4432 is slightly more corrosion resistant than the normal 4404 without adding too much to the price. The downside is lower availability.

### EN 1.4435 / AISI 316L

The low-carbon edition of 4436 and thereby a high-alloy 4404.

Like 4432 and 4436, the extra 0.5 % Mo gives a higher corrosion resistance; however, the main drawback is the high alloy costs due to Mo and Ni. Consequently, 4435 is the most expensive and the most corrosion resistant standard alloy and, for economical reasons, the steel is frequently hard to get.

### EN 1.4436 / AISI 316

High-alloyed, acid resistant steel, containing 2.5-3.0 % Mo as compared to 2.0-2.5 for normal 4401 or 4404. The extra Mo improves the corrosion resistance, whereas the drawback is the higher price, partly because of the increase in Mo and partly because of the extra Ni required to maintain the austenite phase.

### EN 1.4539 / "904L"

Containing 20 % Cr, 25 Ni and 4.5 Mo, the 4539 is very corrosion resistant, austenitic steel. Originally developed to handle general corrosion in strong sulfuric acid, which explains the high Ni content and the 1.2 % Cu. "Over-austenitic" alloy possessing excellent corrosion resistance in almost any environment, but due to the high Ni content, 4539 is very expensive. Please note that the designation "904L" is not an AISI standard, but rather an antique Swedish factory name.

### EN 1.4541 / AISI 321

Titanium stabilized 4301. Ti binds the carbon (Chapter 2+4), and the steel is therefore less prone than 4301 towards sensitization and intergranular corrosion. This makes 4541 better than 4301 for welding, in particular in the case of thick specimens. With regard to corrosion and weldability, 4541 corresponds closely to 4307 and is traditionally used widely, in particular in Germany. Theoretically, 4541 is slightly stronger (mechanically) than 4301, but may produce yellow welds when nitrogen containing purge gas is used (i.e. formier gas) and is harder to polish properly. EN 1.4550 (AISI 347) is the niobium alloyed 18/8 possessing almost the same properties as the 4541.

### EN 1.4571 / (AISI 316Ti)

Titanium stabilized 4301 and thus the acid resistant equivalent to 4541 and the most widely used stainless steel type in the German industry. As above, the use of titanium alloyed austenites is mostly based on conservatism, and like 4307 vs. 4541, there are rarely any problems by changing from 4404 to 4571 – and vice versa. The marginal differences in between 4571 and 4404 are the same as between 4541 and 4307 (see EN 1.4541 above).



*Due to their high elongation (> 45 %), the austenitic steels are very ductile and perfect for any kind of mechanical deformation, such as deep-drawing. These flanges are made of EN 1.4404.*

### Heat Resistant Austenitic Steel:

#### EN 1.4828 / AISI 309

Lowest alloyed high-temperature stainless steel, resembling the standard 4301 a lot, apart from the fact that the 4828 contains in between 1.5 and 2.5 % silicon (Si) to improve the resistance towards scaling.

#### EN 1.4841 / AISI 314

Very high-alloyed stainless steel containing 24-26 % Cr and 19-22 % Ni. Compared to the 4828 above, the 4841 possesses improved mechanical properties as well as corrosion and scaling properties. The main disadvantage is the high Ni content making the alloy expensive and economically unstable.

### Duplex Steel:

#### EN 1.4460 / AISI 329

The original, "classical" duplex steel and the only one classified in the AISI system. At 25-28 % Cr, 1.30-2.0 % Mo and 4.5-6.5 % Ni, the 4460 contains more than 50 % ferrite (the rest being austenite), causing the steel to possess excellent hardness and mechanical strength. Only available as rods and frequently used for high-performance axels.

#### EN 1.4462 / "2205"

At 22 % Cr, 5 % Ni and 3 % Mo, the 4462 is the most widely used duplex stainless steel. A high mechanical strength combined with excellent corrosion resistance makes the 4462 very useful as construction steel. Superior to the "acid resistant" 4401 group with respect to any type of corrosion in almost any environment, in particular SCC. The main drawbacks are the limited availability and the increased manufacturing expenses, including cold deformation and welding.

### Precipitation Hardening Steel:

#### EN 1.4542 / –

Rare steel from a rare group. Containing 14-17 % Cr, 4542 normally possesses a corrosion resistance somewhere in between the hardenable martensites and the austenitic 4301. The 3 % Cu makes the steel hardenable through heating, although the possible hardness is lower than that of the martensites. A typical application is high-quality golf irons (!), such as Callaway Big Bertha or Ping G10.

## Chapter 4: Corrosion of Stainless Steel

With regard to corrosion, stainless steel is a very smart group of metals. The excellent corrosion resistance combined with an affordable price has made stainless steel the most frequently used group of metals within critical sectors such as the food and pharmaceutical industries as well as the chemical industry.

The excellent corrosion resistance of stainless steel is caused by a very thin layer of oxides in particular chromium and iron oxides, and despite a thickness of only a few nanometres, this oxide layer is so strong that it effectively isolates the steel from the environment. Should the oxide layer suffer from a breakdown, it is quickly regenerated, and the corrosion protection is re-established.

Unfortunately, this ideal scenario does not always take place; the oxide layer may be damaged without re-passivating, and the sad result may be serious corrosion. Once the corrosion has started, rapid penetration may occur causing the stainless steel to be a very short-lived construction material. The difference in between the two extremes is sometimes very small: If re-passivation takes place, corrosion is prevented and, theoretically, the steel may last forever. If not, severe corrosion may take place, and the life-span of the equipment may be very, very short.

The types of corrosion occurring on stainless steel are as follows:

### General Corrosion

As mentioned above, general corrosion takes place at extreme pH values, i.e. in very strong acids or, less common, in strong alkalines. Typical media are sulphuric acid, phosphoric acid and so on, and apart from the type of media and the strength, corrosion velocity is highly dependant on the temperature and the presence of impurities, in particular chloride. As a rule, the corrosion increases with increasing temperature and increasing chloride concentration.

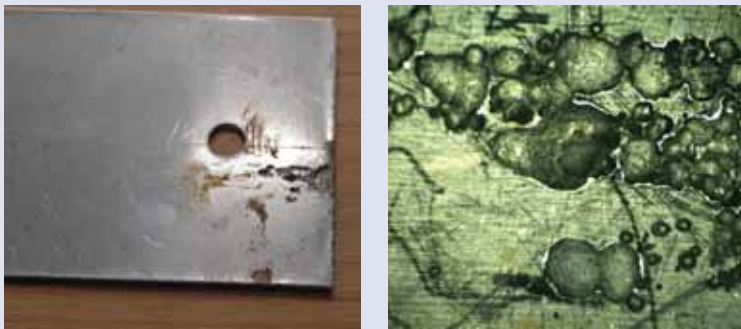
The most useful elements in the steel are nickel and molybdenum. In general, low-alloyed ferritic and, in particular, martensitic steels should not be used in strong acids and alkalines.



*4301 stainless steel bolt suffering from severe general corrosion after having spent a number of months in a nitric acid-hydrofluoric acid pickle bath. Please note that the loss of metal is quite uniform and quite large while no penetration has occurred yet.*

### Pitting and Crevice Corrosion

Pitting corrosion (Lochfraß-Korrosion, punktfrätning, grubetæring) is a type of corrosion caused by a local breakdown of the protective oxide layer. Unlike the ideal situation, repassivation does not occur, and severe corrosion will take place. Pitting corrosion is the perfect example of the edge-like nature of stainless steel. Either repassivation occurs, and the steel lasts forever, or corrosion takes place, and penetration may occur rapidly.



*Stainless steel (4301) specimen after a few days of exposure in a saltwater (NaCl) solution doped with hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). While 99 % of the steel remain unharmed, some of the pits (the arrows) have caused penetration. The microscopic photo to the right shows a magnification of the framed section.*

Crevice corrosion (CC, Spaltkorrosion, *spaltekorrosion*) reminds a lot of pitting corrosion; however, CC takes place in crevices, pores and narrow geometries with poor exchange of media – or none at all. Such places, all transport is controlled entirely by diffusion, and compared to the "free surfaces", the risk of corrosion in crevices is always higher than the risk of pitting corrosion.

An old "rule-of-thumb" says that the risk of CC is substantial at a temperature 20-25 °C below that of pitting corrosion (*i.e. the critical pitting temperature, CPT*). If the steel is close to its corrosion limit, the equipment should be designed so that no crevices are present. If this is not possible, more corrosion resistant steel must be chosen.

The risk of pitting corrosion as well as crevice corrosion increases with

- Increasing chloride content
- Increasing temperature
- The presence of oxidants and
- Low pH (acid conditions)

With regard to the alloying elements, an increased content of Cr, Mo and N all benefit the corrosion resistance while the effect of Ni is comparatively small. Non-metallic impurities, such as S and P, tend to lower the corrosion resistance severely.

Based on hundreds of practical experiments, the resistance of a stainless steel against pitting corrosion can be expressed as a Pitting Resistance Equivalent (PREN):

$$\text{PREN} = \% \text{ Cr} + 3.3 \times \% \text{ Mo} + 16 \times \% \text{ N}$$

## Chapter 4: Corrosion of Stainless Steel

By experience, two steel types with the same PREN will perform approximately equally well against pitting corrosion. Please note that in theory, it does not matter if we increase the PREN by adding 1 % Mo or 3.3 % Cr. The important thing is the PREN increase.

Normally, conditions are worst when the steel is immersed completely into the water whereas the problems above the water line usually limit themselves to superficial pitting corrosion. From a cosmetic point of view, such attacks may be very annoying, in particular in the case of very expensive equipment (such as a Danish opera house!). However, it rarely leads to equipment failure.

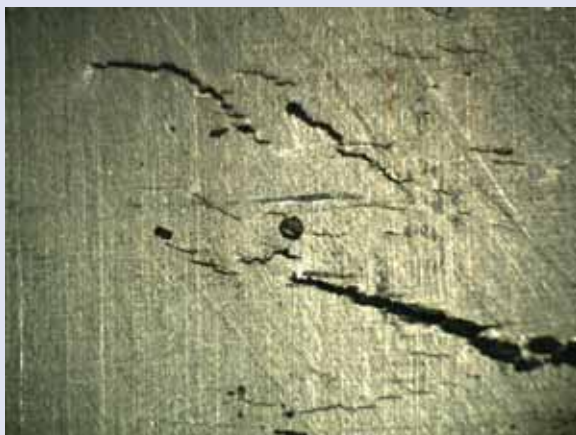
### Stress Corrosion Cracking

Stress corrosion cracking (SCC, Spannungsrißkorrosion, spændingskorrosion) is a type of corrosion giving rise to cracks. SCC is the most severe type of corrosion, and penetration may occur as a matter of days rather than months or years, even in thick steel plates. The name itself indicates that the corrosion takes place in regions of the steel where tensile stress is present. Such tensile stress is common and may occur as a result of any kind of mechanical process including welding and grinding.

The risk of SCC increases with

- Increasing chloride content,
- Increasing temperature,
- Low pH (acid conditions), and
- Evaporation

In particular the temperature is important, and SCC is more dependent on the temperature than any other type of corrosion.



**Left:** SCC cracks in a milk tank (4301). The longest crack is about 15 mm long, and the corrosion has been caused by high-temperature disinfection.

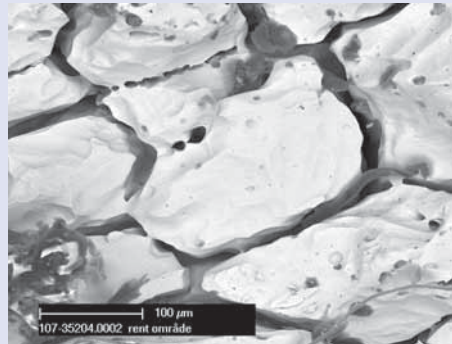
**Right:** Micro section of SCC cracks through a distillation unit. Sheet and pipe section are both made of 4301, the temperature has been 60–70 °C, and the conditions have severely worsened because of the "pocket" in the centre thus being able to trap chloride containing water. After a while, some of the water has evaporated, and the chloride concentration will increase.

SCC is a type of corrosion which almost selectively attacks the lowest grades of austenitic steels, such as the 4301 group, and normally, 4301 will be in danger at temperatures above 60–70 °C. In practice, though, 4301 may suffer from SCC at even lower temperatures, even at room temperature. Due to its content of Mo and Ni, the 4401 group is somewhat more resistant, and the temperature limit is usually around 100–110 °C. However, even this limit cannot be regarded as "safe". SCC in 4401 steel at 30–40 °C has been observed.

Ferritic and duplex steels are significantly less sensitive to SCC than the austenitic steels. Consequently, if SCC is the critical type of corrosion, it is no bad idea to replace the pipes and sheets of 4301 or 4404 by 4509 or 4521, respectively.

### Intergranular Corrosion

Intergranular corrosion (IG, interkristalline Korrosion, interkristallinsk korrosion) is a type of corrosion which is caused by the formation of chromium carbides in the grain boundaries of the steel (Chapter 2). Heating the steel to a temperature in the range of 500–850 °C, carbon is binding the useful chromium causing a weakening of the zones adjacent to the grain boundaries. In popular, this corresponds to dissolving the cement in between the bricks of a house.



*Micro section showing a nice example of intergranular corrosion in a bolt made of 4307. The cause of the sensitization is not the C from the steel itself, but rather the use of oil. A subsequent heating process has released the carbon, which in turn has diffused into the steel. Thereafter, the Cr has been bound as carbides, and a subsequent pickling process caused the sensitization to turn into IG.*

The risk of IG increases rapidly with the carbon content of the steel, and this risk is the main reason why one should always choose low-carbon steel (i.e. 1.4306, 4307, 4404 or 4435) or titanium stabilized types (4541, 4571) as compared to normal types (4301, 4401). The thicker the steel (= increased heating time), the more important it is to use low-carbon steel.

Due to the increased effort of the steel works in order to remove the carbon, IG is a rare bird these days.

## Chapter 4: Corrosion of Stainless Steel

### Time

For all types of corrosion, time is a very important factor, and generally, long-time exposure to a corrosive media is always worse than a short-term dip. Frequently, one can get away with exposing the steel to a much too corrosive environment provided that the contact time is very short, a fact which is utilized in i.e. the dairy business where disinfectants are frequently too corrosive to the common 4301 steel. As long as the cleaning is done in a matter of minutes, it works. On the other hand, remaining pools of disinfectant may cause severe corrosion.

This effect is even more obvious when considering the conditions above water. There, the environment is governed by splashes of water and salts, and provided that the construction is made in such a way that the water is drained off quickly, the stainless steel may last forever. If salt-containing pools or drops are allowed, the risk of corrosion may include cosmetically superficial pitting corrosion to SCC at elevated temperature.

All corrosion data above are based on long-term exposure. If the exposure time can be kept short, the steel may last much better than predicted by the books.

## Chapter 5: Ferritic, Stainless Steel

A few years ago, the nickel-free, ferritic, stainless steel was regarded as a bit of a joke. A poor corrosion resistance combined with poor weldability and poor mechanical properties was not enough to compensate for the low price, and ferritic, stainless steels were only considered useful for making very simple, not-critical parts, such as cheap tea spoons.

However, the unpredictable fluctuations of the nickel price during the last few years have changed this pattern markedly. From 2006 to the middle of 2007, the nickel price increased from 15,000 to 55,000 \$/ton, and shortly thereafter, it dropped steeply to 30-35,000. In December 2008, the price plummeted to 10,000 \$/ton and in the time of writing (August 2009), the price has recovered to 20,000 \$/ton. Due to its (sometimes) very high price, nickel is the price determining element in normal, austenitic stainless steel, and most of the alloy surcharge for an EN 1.4301 steel (= AISI 304) happens to be nickel. For higher alloyed steel types, this pattern is even more evident. In short, nickel is a pricey and economically unstable element, and a lot could be gained if nickel was by-passed as alloying element. What if one could maintain the corrosion resistance without the nickel?

Fortunately, that scenario is not entirely science-fiction. In most cases, the corrosion resistance depends on molybdenum (Mo) or chromium (Cr), while the main purpose of nickel (Ni) in stainless steel is to stabilize the ductile austenitic phase. Ni owes its presence to mechanical reasons rather than the corrosion resistance (Chapter 2), and by cutting down the Ni content, one gets a stainless steel possessing great corrosion resistance at a much lower cost. In short, that is the "secret" of the ferritic stainless steels: High Cr, perhaps Mo and little or none Ni.

The table below shows the alloy composition of the most common ferritic steel types compared to the common austenitic ones. Please note that the Ni content of the five ferrites is close to zero, while the austenites contain at least 8 % Ni.

EN 1.-	Struktur	% C	% Cr	% N	% Mo	Others	AISI	SS
4003	Ferrit	≤ 0,08	10,5-12,5	0,30-1,00	-	N ≤ 0,030	410S	-
4016	Ferrit	≤ 0,03	16,0-18,0	-	-	-	430	2320
4509	Ferrit	≤ 0,030	17,5-18,5	-	-	Ti 0,10-0,60; Nb 3xC+0,30 - 1,00	441	-
4512	Ferrit	≤ 0,03	10,5-12,5	-	-	Ti 6x(C+N) - 0,65	409	-
4521	Ferrit	≤ 0,025	17,0-20,0	-	1,80-2,50	N ≤ 0,030; Ti 4(C+N)+0,15 - 0,80	444	2326
4301	Austenit	≤ 0,07	17,5-19,5	8,00-10,5	-	N ≤ 0,11	304	2333
4306	Austenit	≤ 0,030	18,0-20,0	10,0-12,0	-	N ≤ 0,11	304L	2352
4307	Austenit	≤ 0,030	17,5-19,5	8,00-10,5	-	N ≤ 0,11	304L	-
4404	Austenit	≤ 0,07	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	N ≤ 0,11	316	2347
4404	Austenit	≤ 0,030	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	N ≤ 0,11	316L	2348

Because of the attractive ratio in between corrosion resistance and price, the consumption of ferritic, stainless steels has almost exploded. In 2006, 27 % of the world-wide consumption of stainless steel was ferritic alloys, but in 2010, it is estimated that the percentage may reach as high as 47. In particular the car factories are major consumers of ferritic stainless steel, and as Scandinavia possesses a comparatively small car industry, the 2006 and 2010 numbers for Scandinavia are "only" 15 and 25 %, respectively. This increase is due to household appliances, catering and so.

## Chapter 5: Ferritic, Stainless Steel

### Pitting Corrosion

In most media, local corrosion resistance is dependent on the contents of Cr and Mo, and while the ferrites of the past usually contained around 12 % Cr and no Mo at all, the ferrites of today are much higher alloyed and the corrosion resistance correspondingly higher. As a result, the ferrites of today are fully capable of competing with the traditional austenites (both "normal" stainless and "acid resistant") as regards corrosion resistance.

With respect to pitting corrosion, one of the most destructive types of corrosion for stainless steel, the corrosion resistance, is determined by the *Pitting Resistance Equivalent, the PREN* (Chapter 4).

Empirically, two stainless steel grades with equal PREN numbers possess the same resistance towards *initiation* of pitting corrosion, and, using the table above, 4301 (AISI 304) has a PREN of 17.5. The ferritic 4509 has exactly the same PREN which means that the two types 4301 and 4509 can be expected to perform equally well towards pitting corrosion. In October–November 2008, this was confirmed by experiments conducted at the Technical University of Denmark (DTU).

Similarly, the ferritic 4521 (PREN 22.9) can be expected to perform equal to the austenitic 4404 (AISI 316L, PREN 23.1), and, not surprisingly, this was also confirmed by the Technical University of Denmark (DTU). Actually, the pitting potential of the acid resistant ferrite, 4521, proved to be significantly higher than that of the parallel austenite, 4404. Consequently, for both groups of steel (4301 / 4404), it is possible to substitute the traditional austenite with the parallel ferrite and maintain the resistance towards pitting corrosion.

The above considerations apply for the initiation of pitting corrosion. Should the corrosion, against all precautions, start, Ni is a beneficial element, and corrosion tends to propagate faster in a Ni-free, ferritic steel than an austenitic steel type. However, this is just an additional argument for choosing stainless steel with care. Quite simply, one has to choose stainless steel where the corrosion will never initiate. Just choose steel with a sufficiently high PREN.

### Stress Corrosion Cracking

*Stress Corrosion Cracking* (SCC) is a type of corrosion giving rise to cracks due to a combination of mechanical stress and exposure to certain corrosive media, and it is normally regarded as the most destructive type of corrosion. SCC specifically attacks the austenitic steel types, and in particular the 4301 and 4401/04 groups are vulnerable, particularly in chloride containing media.

As a guideline, SCC is a risk for 4301 at temperatures above only 50–60 °C while the "acid resistant" 4401 class lasts until 100–110 °C (Chapter 4). This actually makes the austenitic stainless steel inadequate for a number of technical appliances ranging from reactors and distillation columns to heat exchangers, evaporators and drying equipment.

### General Corrosion

General corrosion is a type of corrosion which takes place in either very strong acids or very strong alkalines. In these media, the austenites are normally slightly more resistant than the ferritic alternatives so for handling extreme pH media it is safer to stick to the traditional steel types.

It should be mentioned that the different types of passive, stainless steel normally can be connected with no risk of galvanic corrosion provided that both types are sufficiently corrosion resistant. Normally, there is no corrosion problems connected with putting i.e. 4301 and 4509 together in the same media.

### Mechanical Properties

Mechanically, the differences in between the austenitic and ferritic types are more evident. Measured by HRC, Rp 0.2 or Rm, most ferrites equal the austenitic steel types. However, ferritics possess slightly higher yield strength (Rp0.2) and slightly lower tensile strength (Rm). As a rule, the mechanical properties of stainless ferrites are comparable to high strength carbon steels.

A major difference in between the ferrites and the austenites is the elongation, i.e. the possible deformation until breakage. For the austenitic 4301 or 4401 groups, the minimum elongation is around 45 % meaning that these steel types may be stretched and deformed very much before they break.

In contrast, the ferritic types possess a minimum elongation of 18-20 % which means that they are much less useful in the case of mechanical deformation such as pure stretch forming. On the contrary, ferritics are more suitable for deep drawing, such as complex exhaust systems. As regards cold forming, the ferrites are comparable with carbon steels, and it is not necessary to use more powerful machines in comparison with cold forming of the austenitic steels.

Notably, alloys like 4016 are widely used in i.e. England and Italy for catering purposes. However, do not expect to be able to make a very complicated double kitchen sink from a ferritic stainless steel. In such a case, the traditional 4301 is better.

Another notable difference is the mechanical properties at extreme temperatures, i.e. notch toughness (AV) and creep strength, respectively, although Nb stabilized ferritics deform less than austenitics in response to long term stresses. Unlike the austenites, the ferrites may become brittle at very low temperatures, and they do not maintain their excellent tensile stress at very high temperatures (typically 7-800 °C and above). In addition, long-term exposure to temperatures in between 400 and 550 °C may give rise to "475°-brittleness", an "illness" which may also attack the duplex stainless steels in the same temperature range.

In short, the ferritic steels are less useful in extreme temperatures than the austenites; however, ferritics are more suited for cyclic high temperature applications while austenitics are preferably used in isothermal applications. In any case, each and every situation should be evaluated separately.

### Magnetism, Thermal Elongation and Wear

Magnetically, the ferritic stainless steels resemble mild steel. All ferritic stainless steels are strongly magnetic while the nickel containing austenites are either non-magnetic or, in the case of cold working, slightly magnetic.

Also with respect to thermal properties, the ferritic stainless steels are closer to the carbon steels than the austenites. The thermal elongation of the ferrites is about 30-35 % lower than that of the austenitic types thereby reducing the risk of deformation during welding or subsequent operation. This is particularly important if the equipment is to be made from both stainless steel and mild steel as the thermal tension in between the mild steel and the austenitic steel is larger than in between the mild steel and the ferrites.

With regard to wear, stainless steel against stainless steel has a nasty habit of adhesive wear. This risk may be reduced by choosing two different types of stainless steel (i.e. with two different grain structures). A ferrite against an austenite is a better wear combination than austenite against austenite, although still inferior to well-known combinations as, say, bronze against stainless steel.

## Chapter 5: Ferritic, Stainless Steel

### Welding of Ferritic Stainless Steel

In contrast to previous teachings, it is perfectly possible to weld ferritic stainless steels, although they are less foolproof than the austenites. The lack of Ni increases the risk of grain growth and the formation of unwanted phases as a result of the heating. Such effects may cause brittleness and reduced corrosion resistance, and therefore, one has to be more careful when welding the ferrites as compared with the austenites, in particular with regard to the heat input. The thicker the steel, the more important it is to keep the heat input low in order to avoid unwanted side effects.

This said, the present-day ferritic steels are much easier to weld than the past generations of steel. This is due to the fact that the higher alloyed ferrites are "stabilized" by adding titanium (Ti) and/or niobium (Nb), both of which stabilize against grain growth during welding. It is essential to employ stabilizers in sufficient quantities, e.g. Ti and/or Nb, both strong carbide formers and blocking grain growth. Thereby, chromium carbides are unable to form during the thermal cycles of welding.

Unstabilized ferritic grades, such as 4016, can therefore be susceptible to intergranular corrosion in the HAZ due to chromium carbide formation. For this reason, the non-stabilized types, such as 4003 and 4016, are not recommended for welding without a subsequent heat treatment.

4509, 4521 and 4526 and the low-alloyed 4512 (10.5–12.5 Cr, 0 Mo) can be welded (TIG or MIG) by using filler metal type 4430 (20 Cr, 2.5–3.0 Mo) or similar types. In the case of 4512 and 4509,

Up to 1-1½ mm thickness, welding can be done with no filler metal at all. No particular problems should occur when welding ferrites (4509, 4521) and austenites (4301, 4401 groups) together. Recommended filler metal for the 4301/4509 is 309L (22–24 Cr, 12–15 Ni, 0 Mo) whereas the molybdenum alloyed 4430 is preferred when welding the 4404/4521.

An important difference in between the ferrites and the austenites is the use of purge gas. For TIG, welding of ferritic stainless steel, argon (Ar) or argon-helium (< 20 % He) is recommended while *Formier gas* (N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>) should not be used due to the risk of grain growth and brittleness. For MIG welding, Ar + 2 % CO<sub>2</sub> is recommended; higher content of CO<sub>2</sub> may give rise to carbide formation (sensitization).



Welded sample of "acid resistant" ferritic 4521. Thickness: 2 mm; method: TIG; filler metal: AISI 316LSi; current: 90 A; and purge gas: pure Ar.

### Chemical Surface Treatment

In contrast to the information given by the literature in the last millennium (before 2000!), ferritic stainless steels can be subject to a chemical surface treatment. The higher alloyed ones, such as 4509, 4521 and 4526, can be pickled, passivated and even electro polished, although it is recommended to be more careful than with the austenitic types. The reason for this extra care is the fact that ferrites are generally more sensitive towards very strong acids than the parallel austenites.

When performing a *pickling* process, one should take care that the ferrites are etched rather quickly when exposed to strong acids, and one should make sure that a relatively mild pickle is used. This is just one of a number of reasons why the heat tinting should be kept at a low level during the welding of ferritic steel types.

*Electro polishing* of ferritic stainless steels is possible as well. However, in these extreme acids (50 to 70 % sulfuric and phosphoric acids at temperatures around 60 °C), the ferrites are more sensitive than the austenites, and it is hard to obtain the same mirror-bright surface. If a mirror-like surface is required, the austenites are better.

*Passivation* may be carried out with a pure nitric acid (Chapter 7). The lowest alloyed ferrites, such as 4003 and 4512, can neither be pickled nor electro polished, and passivation should only be done with a di-chromate inhibited nitric acid.

### Food Appliances and Nickel Problems

Without any problems, ferritic stainless steel may be used in most applications where the austenitic steels are, at present, the state of the art. This includes the food industry, and the ferritic 4016 is widely used for catering purposes in England and Italy, and the higher alloyed 4509, 4521 and 4526 may easily be used for more demanding purposes within the same business.

A particular advantage with the ferritic steel types is the absence of nickel and with a Ni content of zero, the risk of Ni leaking into the media is equally zero. In contrast, the 4301 and 4404 contain 8 and 10 % Ni, respectively which (mostly by corrosion) may be leaked into the media. At present, there are no rules and regulations with regard to the use of nickel free steel types in the food industry. However, should this ever be the case, it does not hurt to be ahead of time.

## Chapter 5: Ferritic, Stainless Steel

### Supply, Dimensions and Prices

The most important ferritic stainless steels are the 4509, the "acid resistant" 4521 and the very popular 4016. They are all available as sheets (various surfaces) and pipes; however, in all cases, the thickness hardly ever exceeds 3 mm, apart from hot-rolled sheets. In any case, the supply time for any ferritic stainless steel may be longer than for the similar austenites, and despite the increasing production and demand, it will take a few years until the supply of the ferrites exceeds that of the austenites.

The prices depend on the steel type, the dimensions, and, of course, the fluctuations in the alloy surcharge. In particular, this is dependent on the nickel content, for which reason the economical advantage of using the ferrites more or less follows the development in the nickel prices. The higher the nickel price, the larger the economical advantage by switching to ferrites.

In July 2008, this difference was 25 %. However, the subsequent nickel drop has reduced this advantage. Still, the price of the nickel-free ferrites is markedly more stable than for the austenites, and in case of an exploding nickel price (once again!), the price difference is going to be much bigger.

Similar advantages are obtained for the acid resistant ferrite 4521 compared to the austenitic 4404.

### Possible Applications

The ferrites are less ductile than the austenites (making cold forming a bit more complicated), and the welding process is somewhat more sensitive than that of the traditional austenites. In addition, the reduced supply is bound to have a negative effect, but the ferrites are nevertheless extremely useful. With regard to manufacturing and corrosion, a list of possible pros and cons are, among others, given below:

Pros	Cons
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparable local corrosion resistance (PREN4509 = PREN4301)</li> <li>• Excellent resistance towards SSC; much better than the austenites</li> <li>• Good corrosion resistance towards general and intergranular corrosion</li> <li>• Pickling, passivation and electro polishing possible</li> <li>• No risk of Ni leakage to food</li> <li>• Low thermal expansion</li> <li>• High thermal conductivity</li> <li>• Less prone to spring-back during cold-forming</li> <li>• Magnetic (sometimes an advantage)</li> <li>• Lower and less volatile price</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Due to risk of crevice corrosion, more attention for design is needed</li> <li>• Welding parameters are more critical</li> <li>• Low notch toughness for thicknesses above 3 mm</li> <li>• Lower elongation = less suitable for pure stretch-forming</li> <li>• Reduced toughness at very low (cryogenic) temperatures</li> <li>• Brittleness at long-term exposure to temperatures around 475 °C</li> <li>• Magnetic (sometimes a disadvantage)</li> <li>• Lower availability, in particular thick dimensions; better planning required</li> </ul>

Consequently, the "prime targets" of ferritic stainless are:

- Simple equipment with easy bending, stretching and welding
- Thin goods, mainly sheets and coils
- Simple manufacturing
- Large steel costs (= great savings)

A major consumer of stainless ferrites is the car industry of Europe and USA and also within building and construction, industry, mailboxes, signboards, household appliances, white goods and catering there is an expanding market for the corrosion resistant and inexpensive stainless ferrites.

In general, in particular the weldable alloys, 4509 and 4521 are expected to possess a great future as they - with respect to pitting corrosion - are quite close to the 4301 and 4401 groups, respectively. In these applications, where pitting corrosion is the limitation, it is frequently possible to switch from austenite to ferrite with no loss of corrosion resistance.

In addition, galvanized carbon steel has become so expensive that it is worth considering substituting plain galvanized steel with ferritic stainless steel. Here, the weldable 4509 and the cheaper 4512 (only 11 % Cr) are particularly relevant indoor while the mechanically stronger and more corrosion resistant 4521 is preferable for outdoor purposes.

Above water (in cold conditions), superficial pitting corrosion is the major problem, and in such cases, 4301 can frequently be replaced by the ferritic 4509 - and the 4401/4 by the 4521. Such replacements are not uncommon in the catering and kitchen industry; however, there is still plenty of room for such substitutions. The 4509 is perfect indoor, and the 4521 is bound to be an inexpensive standard steel for outdoor purposes where the 4404 is too expensive, and where the 4301 is not good enough - despite the fact that lots of contractors use it almost anywhere.

When SCC is the problem, the advantage of using ferrites is magnified. At temperatures above 60 °C (for the 4301; about 100 °C for the 4404 class), extreme care should be taken when using the austenites, and for exhaust pipes, baking ovens or heat exchangers, the ferrites are a much safer choice. By switching from austenites to ferritic stainless steel, one gets a more corrosion resistant material at a lower price.

Not a bad combination!

## Chapter 6: The Manufacturing of Stainless Steel and how it affects the Corrosion Resistance

No matter how the stainless steel is used, a certain degree of manufacturing is required. This may include cutting, bending, welding or grinding; however, no matter what we do, the corrosion resistance of the steel is affected.

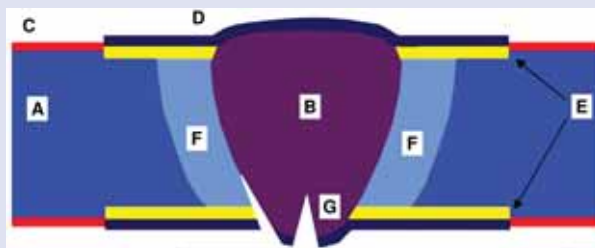
When the stainless steel leaves the factory, it is "perfect". From this moment, its corrosion resistance is at its best, and the vast majority of manufacturing processes affect the resistance in a negative way. Most processes will tend to weaken the corrosion resistance, and, consequently, all manufacturing should be performed in such a way that the negative effect is as small as possible. If this is not possible, the manufacturing should be followed by a chemical surface treatment (Chapter 7).

### Welding

One of the most severe processes is welding. Apart from introducing a second phase (the filler metal), the steel is subject to a very powerful heat treatment, which may affect the corrosion resistance in a number of different ways. All negative, of course.

The risk of corrosion connected to the weld itself is often reduced by choosing a filler metal with a higher content of Cr and Mo than the base metal. Still, any crevice caused by inadequate binding, pores or so, and suddenly, one has to cope with the risk of crevice corrosion (Chapter 4).

A rule of the thumb states that CC occurs at a temperature 20–25 °C below the critical pitting temperature (CPT). To cope with this, crevices should be completely avoided below the water line (= intensified control), or a better steel with a higher PREN should be chosen. Thereby, a larger safety margin is induced allowing a few more "defects".



Schematic drawing showing the various effects on a weld:

- A: Base metal
- B: Weld / filler metal
- C: Natural, protective oxide film
- D: Heat tinting
- E: Chrome poor layer (underneath the heat tinting)
- F: Heat Affected Zone (HAZ)
- G: Pores and other crevices

Heating the steel to a temperature in between 500 and 850 °C, an inevitable phenomenon close to the welding zone, implies a risk of formation of harmful chromium carbides. This does not happen in the weld itself, but rather in the Heat Affected Zone (HAZ), close by. Normally, this problem is greatest when welding thick steel plates, and in practice, one can cope with it by choosing low-carbon steel (4306, 4307 or 4404), or titanium stabilized steel (4541 or 4571, Chapter 4).

A related phenomenon is the formation of harmful intermetallic phases such as the "sigma" (Cr-Fe) or the "ksi" phase (Cr-Mo). This problem is particularly big when welding high-alloyed "super duplex" steels (i.e. 4410, duplex 2507 and Zeron 100) and the high-end ferritic steel types (i.e. 4509, 4526 and 4521).

At least just as harmful is the bluish or yellowish heat tinting which is formed on the steel surface during welding. These discolorations are caused by a warm oxidation of the steel surface and consist of thick oxides of mainly chromium and iron. If left untreated, these layers imply a significant loss of corrosion resistance, and to cope with the problem, either their formation should be entirely prevented (by using extreme amounts of purge gas) or they should be removed afterwards. In most cases, the latter is the more economical, and in practice, it is feasible to accept a certain level of bluish discoloring and later remove the layer by pickling (Chapter 7) or a combination in between grinding and a subsequent pickling or passivation.

Removing the heat tinting by a glass blasting is less desirable as the heat tinting and the de-chromed layers will be mashed into the surface rather than being removed. Prior to the glass blasting, a pickling will do the job.

Finally, any welding process implies the formation of tensile stress which will increase the risk of stress corrosion cracking. As removal of the stress is not feasible, this problem should be taken care of in the design phase by choosing a steel type possessing a sufficient resistance towards SCC. Fighting SCC by hoping to reduce the level of tensile stress is not recommended

### Cutting, Sawing and Others

Due to the risk of heat tinting, the most dangerous methods are the hot ones. A "hot classic" is the angular cutter, which, apart from producing a rough and uneven surface, gives rise to a spray of hot particles. These have a nasty tendency to stick to stainless steel surfaces, and the result is heat tinted crevices, a very sad combination implying a severe loss of corrosion resistance. The easy way to cope with the problem is to remove the spray particles *carefully* with i.e. a screw driver and perform a subsequent pickling.

Even the cold cutting processes may affect the corrosion resistance in a negative way. The center of the steel normally contains a larger concentration of harmful inclusions and segregations than the surface, and thus the centre of even thin sheets is less corrosion resistant than the surface.

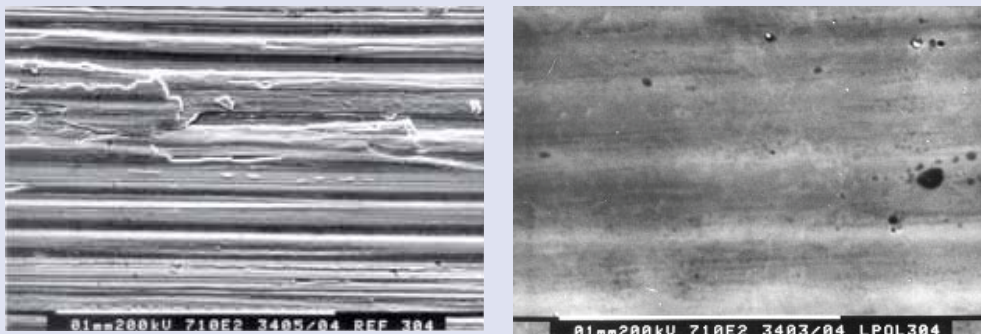
This inevitable effect originates from the making of the steel at the steel works. When the steel solidifies, it takes place from the outside and inwards pushing the insoluble impurities towards the centre of the slab. Hot and cold rolling the slab from a thickness of 200 mms to, say, less than 1 still maintains the impurities in the center, and cutting the steel exposes these impurities and creates a less corrosion resistant surface. A subsequent chemical treatment (such as a pickling) will minimize the problem (Chapter 7).

## Chapter 6: The Manufacturing of Stainless Steel and how it affects the Corrosion Resistance

### Brushing, Blasting, Grinding etc.

Any mechanical treatment of stainless steel affects the surface roughness and thereby the corrosion resistance of the steel. As a general rule, the corrosion resistance *decreases* with *increasing surface roughness*, and a very rough surface (say, sandblasted) performs markedly worse in a corrosion testing than the normal, smooth 2b.

The reason for this is double: At first, a rough surface is much better than a smooth one at "collecting" dirt and corrosive salts, thus forming "local elements". Secondly, a rough grinding will tend to expose a larger concentration of impurities from the steel itself. Such impurities, in particular sulfides, may act as points of attack for pitting corrosion, and thereby lower the corrosion resistance.



Two stainless steel plates, both EN 1.4301 (AISI 304). The left one has been grinded while the right one has been electro polished (Chapter 8). It is not hard to imagine which surface is the most effective collecting salts and moisture. The white line in the bottom of each photo is 100  $\mu\text{m}$ . Both photos courtesy of Technical University of Denmark (DTU).

In addition, a rough grinding will tend to increase the level of tensile stress in the surface of the steel, increasing the risk of stress corrosion cracking. In contrast, a fine blasting (shot peening or glass blasting – *not* sand blasting) may increase the level of compressive stress and thus increase the resistance against SCC.

From a corrosion point of view, it is normally an advantage not to perform any kind of mechanical surface treatment at all! The smooth and pickled 2B surface of the cold-rolled sheets possesses its maximum corrosion resistance and no matter how much we grind, it just gets worse. As above, a proper chemical surface treatment (Chapter 7) will reduce the damage of the steel.

### Handling and Transport

A particular risk when dealing with stainless steel is iron contamination originating from using the same tools and equipment for handling mild steel along with stainless steel. Using the same trucks, the same fork lifts or the same machinery may transfer minor amounts of mild steel or rust onto the stainless steel. Apart from looking ugly, the contaminations may cause corrosion of the stainless steel itself.



*A nasty example of carbon steel particle having been mashed into the stainless steel surface during cold forming. The iron particle must have been very hard as it has been pressed into the stainless steel, and even though a pickling will remove the iron contamination, the holes remain.*

As discussed later in Chapter 7, the iron contaminations may be removed chemically; however, preventing the whole thing from happening is at least as effective. In particular, all tools, trucks and lifts used for stainless steel should only be used for stainless steel – not mild steel.

Even if the tools are separated, another risk is the transfer of metal dust from the grinding of mild steel onto the stainless steel further down the alley. This can only be prevented by keeping the production of mild steel and stainless steel separated completely, preferably in two separate buildings. If this can not be arranged, a chemical post-treatment is mandatory.

## Chapter 7: Chemical Surface Treatment of Stainless Steel

Any manufacturing or handling of stainless steel implies the potential risk of weakening the corrosion resistance. Should this weakening be larger than the built-in safety margin for the steel as compared to the corrosivity of the environment, one has to reestablish the original corrosion resistance of the steel. In most cases, the cheapest and safest way to do this is by performing a chemical surface treatment.



*Bluish heat tinting around welds in a 4301 stainless steel tank. If kept untreated, the risk of pitting corrosion in the bluish zone is significant, and therefore, the heat tinting must be removed. The easiest way to do this is a pickling.*

### Pickling

By far the most important chemical treatment, the pickling consists of an aqueous solution containing in between 10 and 20 % nitric acid (HNO<sub>3</sub>) and between 1 and 8 % hydrofluoric acid (HF). High-alloy stainless steel types require an aggressive pickle containing a high concentration of HF, while the "normal" 4301 and 4401 grade steels should be pickled in a milder acid with a lower content of HF. Instead of HF, some pickles contain hydrochloric acid (HCl) as "activator"; however, using such aqua regia pickles implies a serious risk of pitting corrosion during the pickling process. HCl-based pickles are not recommended!

At room temperature, the pickling time may be anything from 30 minutes to several hours depending on the pickle itself as well as the darkness of the heat tinting to be removed (the darker, the longer time required) and the concentration of metal contaminations in the bath.

After pickling, all contaminations and inclusions in the steel surface have been dissolved along with the heat tinting and the critical de-chromed layer underneath. After the pickling, all the weak spots have been removed efficiently, and (after repassivation) the steel has reestablished its excellent passive layer and thereby its original corrosion resistance.

The main drawback with the pickling process is the fact that it is a powerful etching of the steel. Apart from losing a few microns of thickness (affecting fine tolerances), the surface roughness will usually increase, in particular for very smooth specimens; an effect which may be unwanted in the dairy and medical industry. Here, the surface roughness should be kept low in order to make life difficult for micro organisms, and frequently, a limit of 0.6 µm for Ra is used as the upper limit.



*Pickled weld on a 4404 specimen. Please note that the specimen appears slightly mat – almost like after a glass blasting. This is because of the increased surface roughness due to the etching of the steel.*

In addition, even small variations in the surface roughness may affect the visual appearance of the specimen; however, this is mainly a cosmetic problem.

Applying the pickle can be done in two ways. The easiest one is to simply immerse the specimen into the pickling bath. However, is this not possible, the pickle can be applied as a paste. In this case, one has to use a pickle in which a "thickener" has been added, so that the product resembles a paste. Thereby, one can "paint" the pickle onto selected parts of the specimens.

Note that the lowest alloyed ferritic types (such as 4003 or 4512) are suitable for pickling, and neither are the sulphur alloyed fine machining steel types (such as 4305) or any of the martensitic ones. Higher alloyed ferritics (4509, 4521) may be pickled, but require a milder pickle than the austenites. In Denmark, using hydrofluoric acid pickles require a special permit which can be obtained at a police station.

fluoric acid pickles require a special permit which can be obtained

at a police station.

### Passivation

The purpose of a passivation is to strengthen the natural protective oxide film of the steel, and in addition, non-metallic inclusions are largely dissolved. Normally, the bath consists of pure 18-25 % nitric acid (HNO<sub>3</sub>), and typically, the process time is about one hour. As above, sulphur alloyed steels and low-alloyed ferritics need special treatment, i.e. *di-dichromate inhibited nitric acid*.



Left: Steel-Tech "Pickle Gel 122", a nitric acid + hydrofluoric acid based paste, useful for nor-mal stainless steel. Applied by using a special brush.  
Right: Using pickling paste on a weld on the inside of a 4436 steel pipe.

A significant advantage of the passivation is the fact that the surface roughness is not affected (measurably) by the process. A passivation is therefore an excellent treatment after a grinding or glass blasting. A major disadvantage is the lack of effect on the heat tinting. To remove these and the de-chromed layer underneath, a pickling is required – or a gentle grinding followed by a passivation.

### Decontamination

Literally, decontamination means de-poisoning, and that is exactly what is happening. It is a semi- advanced dish-washing where all impurities are removed while the stainless steel is hardly affected at all; neither heat tinting nor the natural passive layer, and therefore decontamination does not affect the surface roughness. In addition, decontamination does not affect most rubber and plastic types, all of which make the process very useful in i.e. the medical industry and other super-critical equipment where etching of the steel itself or damage of the gaskets are unacceptable. Many polymers do not like nitric acid or other strongly acidic oxidants.

Decontamination is typically performed in a solution of 2-10 % of a weak acid such as phosphoric acid, nitric acid, citric acid, formic acid, oxalic acid or so. The temperature can be anything from 20 to 90 °C, and the process time may exceed many hours if the impurities are very sticky.

Iron contamination (Chapter 6) is a particular problem, but frequently, one can get away with de-contamination as compared to a pickling. *Rust* (iron oxides and hydroxides) is generally slowly soluble in nitric acid, but much easier to cope with in a hot mixture of citric acid and phosphoric acid. *Metallic iron*, on the other hand, is easier soluble in nitric acid.

## Chapter 7: Chemical Surface Treatment of Stainless Steel

### Electro Polishing

Electro polishing is the only surface treatment process using an external current source. Typically, the bath is a strong mixture of sulphuric acid and phosphoric acid, the temperature is above 50 °C, and using a rectifier, the specimen is connected to the anodic pole. As cathodes, stainless steel is normally used.

During the process, the steel is slowly dissolved and, as the etching primarily takes place from the tops of the micro-roughness, the process minimizes the difference in between the top and the bottom of the surface profile. This "leveling" process reduces the surface roughness, and the surface becomes gradually brighter (SEM photo in Chapter 6).

Apart from producing a very bright surface, the corrosion resistance of an electro polished stainless steel is better than any other surface (of the same type of steel, of course!). This is linked to the low surface roughness making it increasingly difficult to form harmful local environments. Above the waterline, the main benefit is the inability of salts and water to stick to the bright surface causing an electro polished 4301 to perform almost as well as a 4401, 2b.

In theory, electro polishing is able to remove heat tinting. However, this may not always be the case. If heat tinting is the problem, a pickling should be performed prior to the electro polishing.

The drawback of electro polishing is mainly the price. It is a complicated and expensive process partly due to the equipment and partly due to the trouble mounting the cathodes and performing the process. Consequently, electro polishing is a process which is most widely used within critical appliances such as the medical business where the ultra-low surface roughness is essential for hygienic reasons.

### Chemical Surface Treatment, Overview:

	Bath	Process Time	Anløbninger	Cr-oxidier	Ruher
Pickling	10-20 % HNO <sub>3</sub> + 1-6 % HF	1-12 hrs.	Removed	Removed	Increase
Passivation	18-25 % HNO <sub>3</sub>	30-60 min.	No effect	Strengthened	No effect
Decontamination	2-10 % "semi-weak acids"	1-48 hrs.	No effect	No effect	No effect
Electro Polishing	60-70 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	10-15 min.	Some effect	(Removed)	Decrease

### TIG and laser

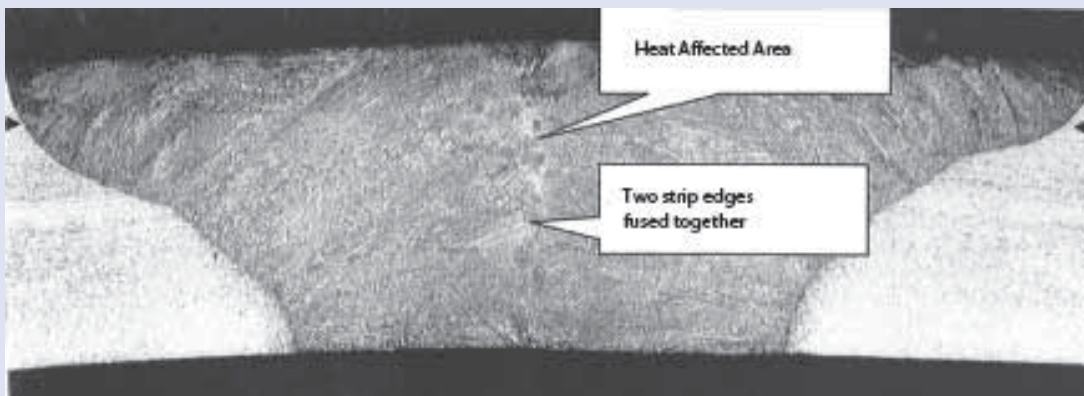
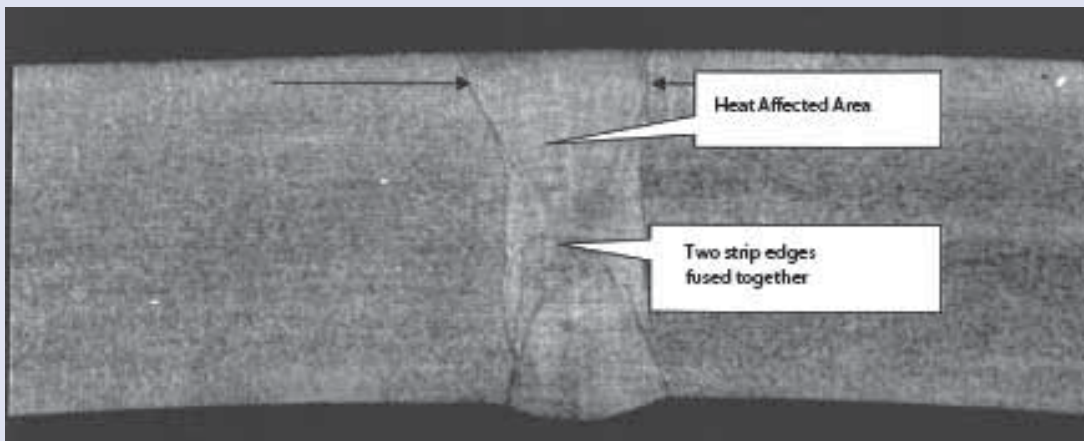
At our plant, in-line welding is carried out with a completely automatic LASER and TIG (Tungsten Inert Gas) method, depending on tube wall thickness according to the commonly used production norms.

Welding is carried out after cold forming by fusing the two strip edges thus limiting the thermally altered area and protecting the inner area with an appropriate shielding gas.

LASER and TIG welding methods give high reliability of the weld area making the product suitable for any kind of application.

See picture n° 1 : Laser welding – heat affected area of around 1mm (x50)

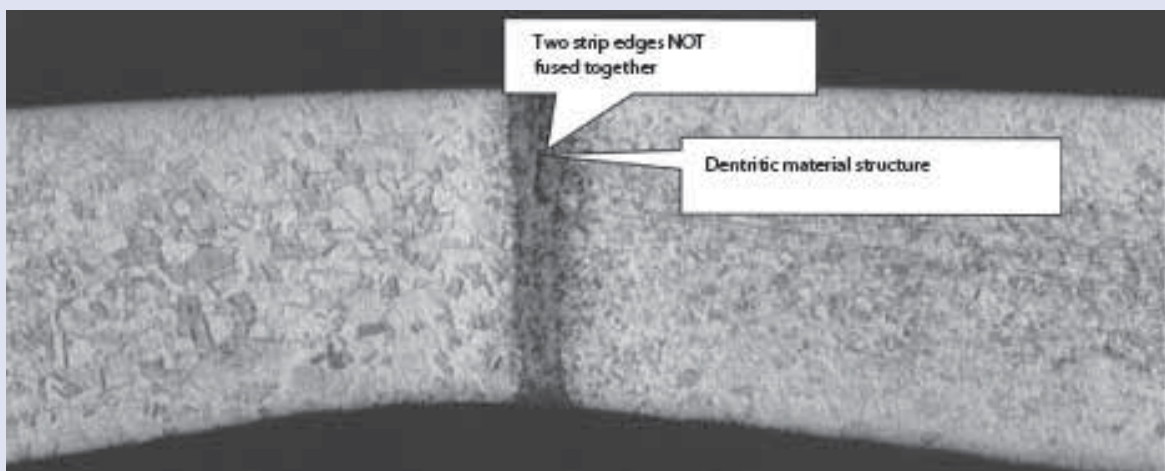
See picture n° 2 : TIG welding – heat affected area of around 4,5 mm(x50)



## Chapter 8: Welding methods

### H.F. high frequency

Welding method is carried out for the production of tubes having structural purposes as well as for the production of car exhaust-systems. For these applications, the HF method is preferred because of its advantages in terms of cost effective productivity. On the contrary, the small weld seam obtained with High Frequency (see picture n° 3 - x50), cannot always grant the optimum in terms of workability, withstanding of pressure and corrosion resistance due to the lack of fusion of strip edge and the oxide formation on the weld edges.



### Bright annealing

Bright annealing is carried out in a furnace full of Hydrogen (H<sub>2</sub>) at temperatures ranging between 1040° C and 1100° C and is followed by a rapid cooling. The Hydrogen is NOT an oxidising agent and therefore no surface oxidation is created and pickling is no longer required after the bright annealing.

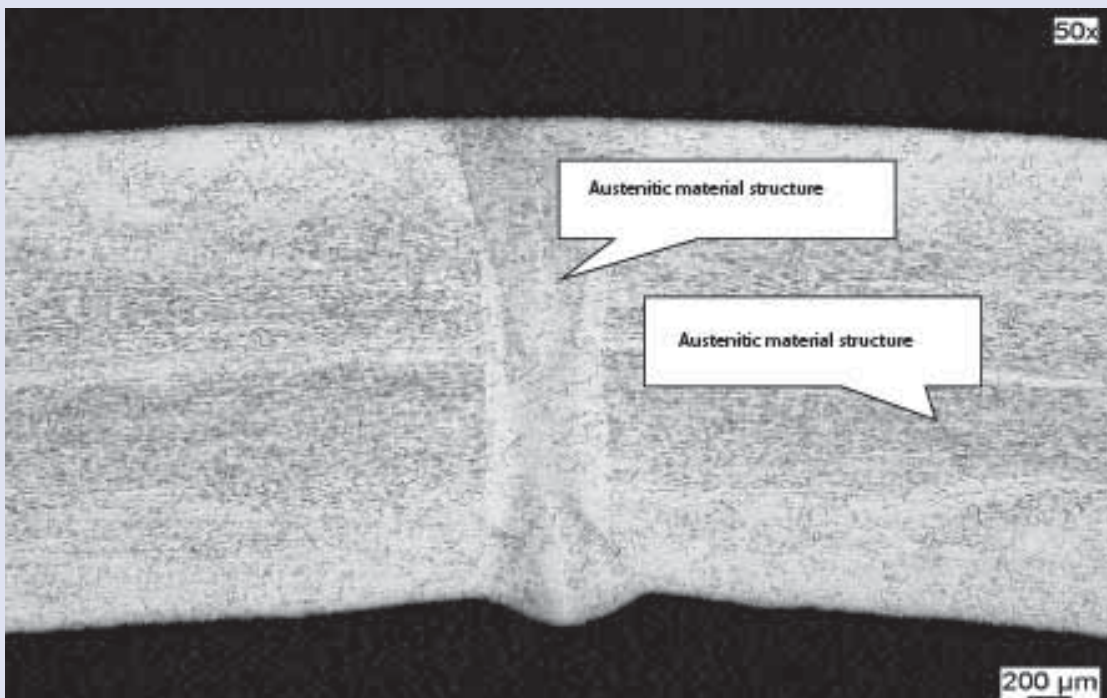
The main advantage of this system, besides a bright and even surface that eases further processing of the tubes, is the improved corrosion resistance of the material.

Such treatment, carried out at the final stage of the production process, ensures the complete solution of the possible carbides precipitated at the grain border, thus obtaining an austenitic matrix free of defects. This makes it possible to avoid the dangerous phenomena of intergranular corrosion.

The austenitic structure obtained through off-line bright annealing, is homogeneous with regular grain size (dimension varies from 6 to 8 ASTM); the consequence is an improvement of stainless steel tensile properties, in particular traction and elongation, with an increase of plasticity and a decrease of residual stress.

This is a material characteristic very well appreciated by all end users who are making further manipulations on tubes such as bending and forming.

See picture n° 4- x50 where the dentritic zone material has been totally replaced by the austenitic material



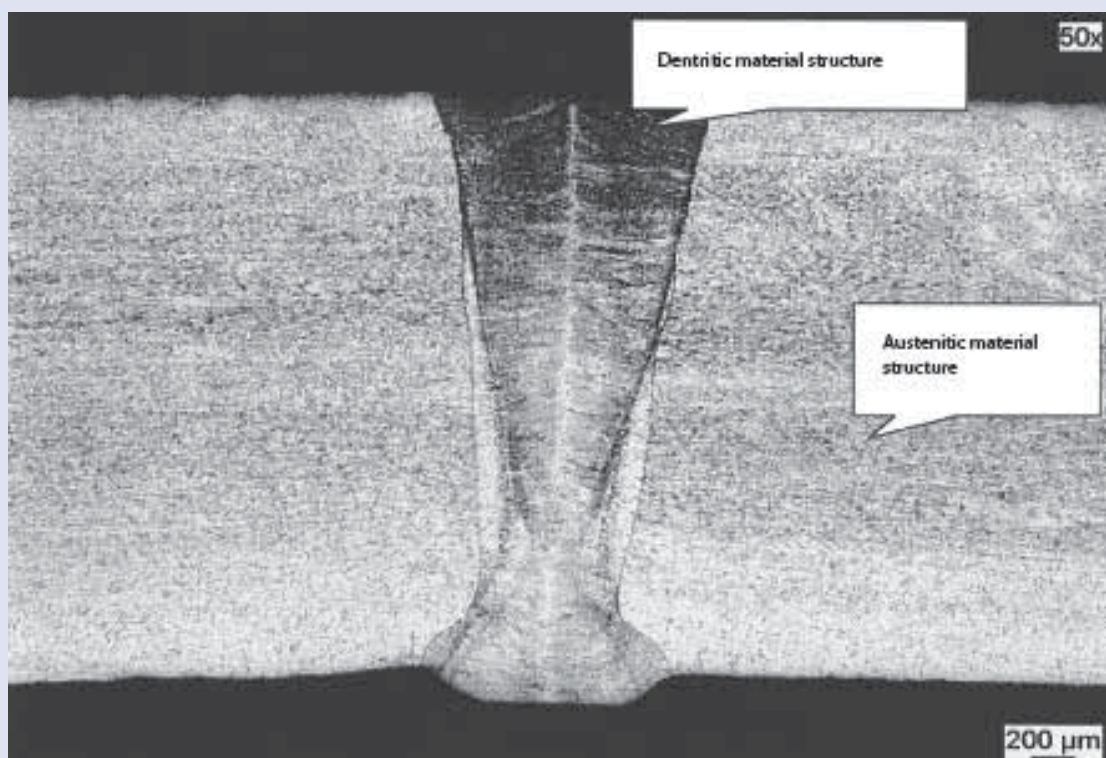
## Chapter 8: Welding methods

### Tubes not annealed - pickled

Welded tubes can be supplied in not annealed condition. This product undergoes the same production process with the exception of the heat treatment. The tubes are instead submitted to a pickling chemical treatment. The pickling bath is composed of Sulphuric and Fluoridric acids.

This process can eliminate, both on the outside and inside surface, and on the ends, any trace of ferrous contamination and also any possible oxides which may be on the metal surface as a result of mechanical working (welding rolls, abrasive belts, cutting equipment) and welding.

See picture n°5 – x50 not annealed tube



### Brushed tubes

On the marketplace brushed tubes are available. The brushing is made on the external surface only, to avoid the chemical treatment of pickling.

These products, however, have a lower corrosion resistance than pickled tubes if submitted to the same environmental attack. This is due both to the deposits on the metal surface contaminated during the production process and to the greater surface roughness which can easily retain oxides and traces of ferrous contamination. The abrasive belts in itself can leave material that could originate corrosion.

Brushed tubes, because of their finishing, need a more frequent periodical maintenance compared to pickled tubes.

It must be underlined that brushing is exclusively external and therefore cannot remove any contamination existing on the inside surface and at the ends cut by shears made of steel based materials.

### Eddy Current test

Welded tubes produced by Iltta Inox, after being calibrated, are submitted to an Eddy Current test with circumferential coils with differential windings.

Such non-destructive control is carried out by creating a Magnetic Field around the tube and detecting any interruption caused by leaks or holes.

Chapter 9: Table showing the most frequently used stainless steel grades and their chemical composition

EN	STRUCTURE	C %	Cr %	Ni %	Mo %	Si ≤ %	Mn ≤ %	S ≤ %	P ≤ %	Other remarks	AISI (UNS)	SS
1.4003	Ferrite	≤ 0,03	10,5-12,5	0,30-1,00	-	1,00	1,50	0,015	0,040	N ≤ 0,030	410S	-
1.4016		≤ 0,08	16,0-18,0	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	-	430	2320
1.4509		≤ 0,030	17,5-18,5	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	Ti 0,10-0,60; Nb 3xC+0,30-1,00	441 UNS 43932	-
1.4510		≤ 0,05	16,0-18,0	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	Ti 4x(C+N)+0,15-0,80	430Ti	-
1.4512		≤ 0,03	10,5-12,5	-	-	1,00	1,00	0,015	0,040	Ti 6x(C+N)-0,65	409	-
1.4521		≤ 0,025	17,0-20,0	-	1,80-2,50	-	1,00	1,00	0,015	0,040	N ≤ 0,030; Ti 4(C+N)+0,15-0,80	444
1.4021	Martensit	0,16-0,25	12,0-14,0	-	-	1,00	1,50	0,030	0,040	-	420	2303
1.4057		0,12-0,22	15,0-17,0	1,50-2,50	-	1,00	1,50	0,015	0,040	-	431	2321
1.4104		0,10-0,17	15,5-17,5	-	0,20-0,60	1,00	1,50	0,15-0,35	0,040	-	(430F)	2383
1.4301	Austenit	≤ 0,07	17,5-19,5	8,00-10,5	-	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	304	2333
1.4305		≤ 0,10	17,0-19,0	8,00-10,0	-	1,00	2,00	0,15-0,35	0,045	Cu ≤ 1,00; N ≤ 0,11	303	2346
1.4306		≤ 0,030	18,0-20,0	10,0-12,0	-	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	304L	2352
1.4307		≤ 0,030	17,5-19,5	8,00-10,5	-	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	304L	-
1.4310		0,05-0,15	16,0-19,0	6,00-9,5	≤ 0,80	2,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	302	2331
1.4541		≤ 0,08	17,0-19,0	9,00-12,0	-	1,00	2,00	0,015	0,045	Ti (5xC)-0,70	321	2337
1.4401		≤ 0,07	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316	2347
1.4404		≤ 0,030	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316L	2348
1.4418		≤ 0,06	15,0-17,0	4,00-6,00	0,80-1,50	0,70	1,50	0,015	0,040	N 0,020	-	2387
1.4432		≤ 0,030	16,5-18,5	10,5-13,0	2,50-3,00	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316L	2353
1.4435	≤ 0,030	17,0-19,0	12,5-15,0	2,50-3,00	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316L	2353	
1.4436	≤ 0,07	16,5-18,5	10,5-13,0	2,50-3,00	1,00	2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	316	2343	
1.4539	≤ 0,020	19,0-21,0	24,0-26,0	4,00-5,00	0,70	2,00	0,015	0,030	N ≤ 0,15; Cu 1,20-2,00	"904L" *	2562	
1.4571	≤ 0,08	16,5-18,5	10,5-13,5	2,00-2,50	1,00	2,00	0,015	0,045	Ti (5xC)-0,70	"316Ti" *	2350	
1.4828	Austenit (heat-resisting)	≤ 0,20	19,0-21,0	11,0-13,0	-	1,50-2,50	≤ 2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	309	-
1.4841		≤ 0,20	24,0-26,0	19,0-22,0	-	1,50-2,50	≤ 2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	314	-
1.4845		≤ 0,10	24,0-26,0	19,0-22,0	-	≤ 1,50	≤ 2,00	0,015	0,045	N ≤ 0,11	-	-
1.4460		≤ 0,05	25,0-28,0	4,50-6,50	1,30-2,00	1,00	2,00	0,015	0,035	N 0,05-0,20	329	2324
1.4462	Duplex	≤ 0,030	21,0-23,0	4,50-6,50	2,50-3,50	1,00	2,00	0,015	0,035	N 0,10-0,22	-	2377

Please note that the present EN standards do not correspond exactly to the old material number names. The columns with "AISI", "UNS" and "SS" indicate the immediate parallel standard. In particular the AISI system does not correspond exactly to EN. Consequently, the AISI and SS specifications are to be considered as approximate.

Chapter 9: Table showing the most frequently used stainless steel grades and their mechanical qualities

EN	HB 30 Hardness (HRC)	R <sub>p0.2</sub> (≥ N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>p1.0</sub> (≥ N/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> Ultimate strength (≥N/mm <sup>2</sup> )	A <sub>5</sub> Elongation (L <sub>0</sub> = 5 d <sub>0</sub> ) (≥ %)	Z Area reduc- tion (≥ %)	AV Impact value (≥ J)	Density (kg/dm <sup>3</sup> )	Heat capacity (J/g·K)	Heat conduction (W/K·m)	Terminal expansion coefficient 20-100°C (10 <sup>-6</sup> /°C)	Electric resistance (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	Ela- sity module (kN/ mm <sup>2</sup> )
1.4003	≤ 200	260	-	450-600	20	-	-	7.7	0.43	25	10,4	0.60	220
1.4016	≤ 200	240	-	400-630	20	60	-	7.7	0.46	25	10,0	0.60	220
1.4509	≤ 200	200	-	420-620	18	-	-	7.7	0.46	25	10,0	0.60	220
1.4510	≤ 185	270	-	450-600	20	60	-	7.7	0.46	25	10,0	0.60	220
1.4512	≤ 180	220	-	390-560	20	-	70	7.7	0.46	25	10,5	0.60	220
1.4521	≤ 200	320	-	450-650	20	-	-	7.7	0.43	23	10,4	0.80	220
1.4021	≤ 230	500	-	700-850	12	50	20	7.7	0.46	30	10,5	0.60	215
1.4057	≤ 295	600	-	800-950	14 / 12	45	25 / 20	7.7	0.46	25	10,0	0.70	215
1.4104	≤ 220	300	-	500	12/10	50	0	7.7	0.46	25	10,0	0.70	215
1.4301	≤ 215	190	225	500-700	45 / 35 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.73	200
1.4305	≤ 230	190	225	500-750	35	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.73	200
1.4306	≤ 215	180	215	460-680	45 / 35 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.73	200
1.4307	≤ 215	175	210	500-700	45 / 35 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.73	200
1.4310	≤ 230	195	230	500-750	40	50	-	7.9	0.50	15	16,0	0.73	200
1.4541	≤ 215	190	225	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	50	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.73	200
1.4401	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.75	200
1.4404	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.75	200
1.4418													
1.4432													
1.4435	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.75	200
1.4436	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	60	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,0	0.75	200
1.4539	≤ 230	230	260	530-730	40 / 30 <sup>1)</sup>	-	100 / 60 <sup>1)</sup>	8,0	0.45	12	15,8	1,00	195
1.4571	≤ 215	200	235	500-700	40 / 30 <sup>1)</sup>	50	100 / 60 <sup>1)</sup>	7.9	0.50	15	16,5	0.75	200
1.4828	≤ 223		60 <sup>2)</sup>	500-750	30								
1.4841	≤ 223		60 <sup>2)</sup>	550-750	30								
1.4845	≤ 192		60 <sup>2)</sup>	500-700	35								
1.4460	≤ 260	450	-	620-880	20	-	85	7.8	0.50	15	13,0	0.80	200
1.4462	≤ 270	450	-	650-880	25	-	100	7.8	0.50	15	13,0	0.80	200

1): Cross measuring

2): At 600°C. All other data for Rp 1.0 are measured at room temperature

\*) Neither "316Ti" nor "904L" exists in the AISI system. However, both designations are often used in practice.



**Damstahl Tooling**<sup>®</sup>  
innovative solutions

# SHAVIV

Håndafgratningsværktøjer - Den Perfekte Finish!



**SHAVIV** har i over 40 år været betragtet som det førende mærke inden for professionel hånd afgratningsværktøjer til metal- og plastindustrien.

**SHAVIV** er meget innovative og har introduceret enkle og effektive værktøjer til afgratning af metaller, plastik, keramik og en række andre materialer.

Brugervenligt håndtag "MANGO II" - Fleksibelt og nemt at anvende. Nemt og hurtigt at finde det rette afgratningsværktøj til opgaven.

[www.tooling.dk](http://www.tooling.dk)

Damstahl Tooling a/s - Danmarksvej 28 - DK-8660 Skanderborg - Tel: +45 8794 4100 - [tooling@damstahl.com](mailto:tooling@damstahl.com)