



Damstahl
stainless steel solutions

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold
– muligheder og begrænsninger

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

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 udsving) 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, og i skrivende stund (juli 08) 20-21.000 \$/ton. Grundet sin høje pris er nikkel det prissættende legeringselement i almindeligt rustfrit stål, og langt hovedparten af legeringstillægget for et 4301-stål (= AISI 304) udgøres af netop nikkel. Nikkel er kort sagt stærkt fordyrende for det rustfrie stål og dertil prismæssigt ustabil. Meget ville derfor være vundet, hvis man kunne droppe det dyre nikkel 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 nikkel (Ni) især er tilsat for at stabilisere austenitfasen. 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 angiver legeringssammensætningen for en serie almindeligt rustfrit stål. Bemærk, at nikkelinholdet for alle de ferritiske stålkvaliteter (de øverste fem) er meget lavt, mens de austenitiske (de nederste fem) indeholder mindst 8,00 %.

EN 1.-	Struktur	% C	% Cr	% Ni	% Mo	Andet	AISI (UNS)	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	(UNS 43932)	-
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	-
4401	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 verdenstonnagen 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 lavtlegere, rustfrit stål, men også inden for husholdning, catering og andre kritiske komponenter er der et stort marked for netop ferritisk, rustfrit stål.

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

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):

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

Bemærk, at kvælstof (N) som regel kun medtages for duplekse og højtlegerede austenitter, samt at mikroelementer som S, P og lign. af og til kan optræde i formlen med et stort negativt tal som indikation af deres skadelige effekt på korrosionsbestandigheden.

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, og tilsvarende ligger det ferritiske 4521 (PREN 22,9) på linje med det austenitiske 4404 (AISI 316L, PREN 23,1). Ud fra deres PREN-værdier kan man derfor erstatte meget af verdens 4301 med ferritisk 4509 eller sågar det syrefast 4404 med 4521. I begge tilfælde med en gedigen besparelse til følge, idet det dyre nikkel slet ikke spiller nogen rolle i PREN-ligningen ovenfor.

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 og generel korrosion

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. 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.

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

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 til 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. Der bør derfor (normalt) 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.



Trods en kortere brudforlængelse end de austenitiske stål-kvaliteter kan de ferritiske stål-kvaliteter glimrende anvendes til f.eks. dybtrækning. Denne syrisk fremstillede kande er af 4016 (AISI 430), et meget anvendt materiale i catering.

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

Med hensyn til koldbearbejdning kan ferritisk, rustfrit stål i høj grad sammenlignes med kulstofstål, og det er et fint plus, at man kan anvende mindre maskinkraft 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 ferrititter 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 sprødhed 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 godstykelse.

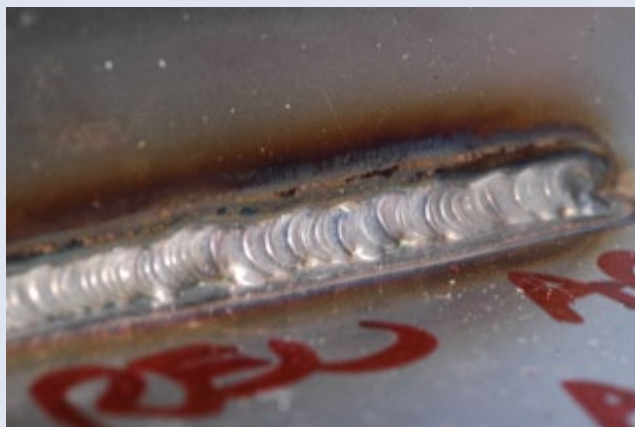
Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

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 interkrystallinsk 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.

Både 4509, 4521 og 4526 samt det lavtlegerede 4512 (10,5-12,5 Cr) kan svejses ved brug af tilsatsmateriale af typen 4430 eller lignende (20 Cr, 2,5-3,0 Mo). 4512 og 4509 kan endvidere svejses 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. Anbefalet tråd er 309L (22-24 Cr, 12-15 Ni, 0 Mo).



Makrofoto af svejsesøm i ferritisk 4521. Godstykkelse: 2 mm, svejsemetode: TIG, tilsats: AISI 316LSi, strøm: 90 A og beskyttelsesgas: ren Ar.

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 (N₂+H₂) *ikke* må anvendes pga. risikoen for kornvækst og efterfølgende sprødhed pga. N og/eller H. Til MIG anbefales Ar + 2 % CO₂. Højere CO₂ kan give karbiddannelser (sensibilisering).

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

Kemisk efterbehandling

Både 4509, 4521 og 4526 kan bejdses og elektroteres, om end det anbefales at være mere forsigtig ved de ferritiske end ved de austenitiske ståltyper. Dette gælder især ved bejdsningen, idet ferritisk stål normalt ætzes kraftigere i bejdsesyren end austenitisk. Ved en bejdsning skal der derfor anvendes en relativt mild salpetersyre-flussyre-baseret bejdse, hvorfor man bør tilstræbe svage anløbninger ved svejsning af ferritiske stål kvaliteter.

En passivering udføres bedst med en ren salpetersyre. Bemærk dog, at de lavest legerede ferritter som 4003 og 4512 ikke kan bejdses og ej heller elektroteres. 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 slet 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 nikkelfri 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, kvaliteterne 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.

Meget afhængig af udviklingen i råvarepriser og dermed legeringstillægget kan man som udgangspunkt regne med, at 4509 som plade (pr. juli 08) koster små 25 % mindre end en tilsvarende, austenitisk 4301, og at 4016 er endnu nogle procent billigere. Den syrefaste ferrit, 4521, er som plade en anelse dyrere end 4301, hvilket gør den markant billigere end den syrefast austenit (4404).

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

Fordele, ulemper og mulige anvendelser

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

Fordele	Ulemper
Glimrende bestandighed mod grubetæring (PREN4509 = PREN4301)	Grundet risikoen for spaltekorrosion skal man være mere opmærksom på design
Fremragende bestandighed mod SPK, langt bedre end for austenitisk stål	Svejsparametrene mere kritiske
God bestandighed mod generel og interkrystallinsk korrosion	Lav slagsejhed ved godstykkelser > 3 mm
Bejdsning, passivering og elektroplering mulig	Lavere brudforlængelse = mindre egnet til strækformgivning
Ingen risiko for Ni-afgivelse til fødevarer	Lavere slagsejhed ved meget lave (kryogene) temperaturer
Lav termisk udvidelse	Sprødhed ved langtids-eksponering ved temperaturer omkring 475 °C
God varmeledningsevne	Magnetisk (kan være en ulempe)
Mindre tendens til tilbagefjedring ved koldbearbejdning	Færre dimensioner og mindre varelager (især i tykke dimensioner) kræver bedre planlægning
Magnetisk (kan være en fordel)	

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, rustfri stål kvaliteter. De højtlegerede ferritter vil utvivlsomt erstatte store dele af markedet for 4301- og 4401-klasserne, og det billige 4512 kan sagtens tænkes at konkurrere med galvaniseret stål.

Ferritisk, rustfrit stål

Korrosionsforhold og mekaniske forhold – muligheder og begrænsninger

Især de svejsbare legeringer, 4509 og 4521, forventes at have en stor fremtid, idet de med hensyn til grubetæring og til dels spaltekorrosion ligger tæt op ad de konventionelle hhv. "rustfri" (4301-gruppen) og "syrefaste" (4401-gruppen) legeringer. De steder, hvor grubetæring er den levetidsbegrænsende korrosionsform, kan man derfor skifte fra austenitisk til ferritisk, rustfrit stål uden at give køb på korrosionsbestandigheden.

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 og 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, *bageovne* eller *varmevekslere*. Her er ferritisk stål austenitisk stål korrosionsmæssigt overlegen, og ved at skifte til ferritter opnås netop en *øget korrosionsbestandighed* og en *lavere pris*. Ikke nogen ringe kombination!