



Præsenteret ved Vintermødet 2006, Dansk Metallurgisk Selskab, Sorø, 4-6. januar 2006

## **Overfladefinish og korrosionsbestandighed af rustfrit stål**

Torben S. Nielsen, Troels Mathiesen, Jan Elkjær Frantsen  
FORCE Technology  
Park Alle 345  
2605 Brøndby

John Kold, Anne R. Boye-Moeller  
Teknologisk Institut  
Holbergsvej 10  
6000 Kolding

## **ABSTRACT**

The pitting resistance of pickled, ground and electropolished surfaces of EN 1.4404 tubes has been tested using cyclic polarization for determination of the pitting potential and ASTM G150 for determination of CPT. The materials were tested in chloride-containing solutions with 0,05 to 5,0% Cl<sup>-</sup>. Crevice corrosion was avoided using a flushed port cell with a specially cast gasket. Ground finish having low surface roughness shows no improvement over the coarse pickled finish, while electropolished finish provides considerably higher resistance but at the same time scattered results. The two testing techniques give almost identical CPTs that show only little dependence on chloride concentration. The variation in pitting resistance has been correlated to the surface morphology of the different surface conditions.

## **ABSTRAKT**

Bestandigheden mod grubetæring hos EN 1.4404 rustfrie rør med bejdsede, slebne og elektropolerede overflader er undersøgt med cyklisk polarisation for bestemmelse af pittingpotential og med ASTM G 150-metoden for bestemmelse af kritisk pitting temperatur. Prøvningerne blev udført i kloridopløsninger med 0,05 til 5,0% Cl<sup>-</sup>, i en celle med gennemskyttet pakning, så man undgår spaltekorrosion. Resultaterne viser at en sleben overflade med lav ruhed ikke giver bedre korrosionsbestandighed end en bejdsset overflade med større ruhed, mens den værks-elektropolerede overflade giver betydeligt større bestandighed mod grubetæring, dog samtidig med betydeligt større spredning. Cyklisk polarisation ved flere temperaturer og ASTM G 150-metoden giver næsten identiske værdier for den kritiske pittingtemperatur, og vi finder at denne kun varierer ganske lidt med kloridindholdet. Forskellen i de tre overfladetyperes bestandighed mod grubetæring diskuteres i forhold til detaljer i topografien hos overfladerne.

## **INDLEDNING**

Når man specificerer udstyr til levnedsmiddel- og farmaceutisk industri er det lige så vigtigt at specificere den korrekte overfladekvalitet, som det er at vælge et materiale med tilstrækkelig korrosionsbestandighed til det påtænkte driftsmiljø. Overfladetilstanden har direkte indflydelse på udstyrets hygiejniske egenskaber og på muligheden for at rengøre det. Samtidig påvirker overfladetilstanden korrosionsbestandigheden i et vist omfang, således at man i visse tilfælde kan opfylde en kravspecifikation ved at specificere en høj standard for overfladefinish i stedet for at specificere et højere legeret materiale. Med dette grundsynspunkt har det været hovedformålet med denne undersøgelse at skaffe en kvantitativ sammenhæng mellem overfladefinish og korrosionsbestandighed for den mest almindeligt brugte type af rustfrit stål i levnedsmiddel- og farmaceutisk industri, EN 1.4404 (som er ækvivalent med AISI 316L). I disse brancher er grubetæring og spaltekorrosion de hyppigst optrædende former for korrosion, fordi udstyret

udsættes for kloridholdige miljøer, såvel under normal produktion som i forbindelse med rengøring.

Der findes massevis af artikler om sammenhæng mellem korrosionsbestandighed og mekaniske eller kemiske overfladebehandlinger. Desværre er disse sammenhænge undersøgt med meget varierende testmetoder, bl.a. fordi metoderne ikke er snævert standardiserede. Derfor er det umuligt at få en både bred og sammenhængende dokumentation for de forskellige mulige overfladebehandlings betydning. Ericsson et al har offentliggjort pittingpotential data for AISI 316 som understreger betydningen af bejdsning efter slibning for at forbedre bestandigheden [1]. Moayed et al har påvist, at den kritiske pittingtemperatur (engelsk: Critical Pitting Temperature, CPT) af 904L forbedres med stigende finhed af slibning [2]. Resultater fra eksponeringstest i jernklorid (ASTM G48) viser en tilsvarende tendens [3]. Den gunstige virkning af mindre ruhed er yderligere vist ved kvantitativ måling af hastigheden af initiering af metastabil pitting og ved måling af elektrokemisk støj [4,5,6]. En fundamentalt anderledes tilgang har været at beskrive sammenhængen mellem sammensætningen af passivlaget (f.eks. i form af Cr/Fe forholdet) og slibning eller kemiske overfladebehandlinger [7,8].

Bredt sammenfattet er det en udbredt opfattelse, at en elektrolyseret overflade giver en bedre bestandighed end en bejdsset, mens mekanisk slebne, eller mekanisk polerede overflader lander i den mindst bestandige gruppe. Det antages almindeligvis, at denne rangordning har en sammenhæng med mængden af blotlagte indeslutninger og ruheden af overfladen.

Ligeledes findes en stor mængde data for rustfrie ståls bestandighed mod atmosfærisk korrosion [9,10,11]. I almindelighed finder man den samme rangorden som beskrevet ovenfor for fuldt neddykkede forhold. Imidlertid får andre parametre en større betydning under atmosfæriske forhold, så som vædning/vandskyende egenskaber og overfladens evne til at samle og fastholde smuds.

Vores fremgangsmåde har været at karakterisere bestandigheden mod grubetæring ved hjælp af test metoder, som i forvejen er velkendte og i et vist omfang standardiserede, nemlig cyklisk polarisation og måling af CPT ifølge ASTM G 150.

Ved cyklisk polarisation bestemmes i første række et pittingpotential, som gælder for netop de aktuelle kloridindhold og temperatur. Når der gennemføres prøvning i et bredt område af temperatur kan man også udlede CPT. Under denne temperatur, med det givne kloridindhold, kan der ikke ske grubetæring; ved meget høje potentialer sker i stedet transpassiv generel korrosion eller iltudvikling. Denne metode blev oprindeligt indført af Brigham et al [12,13]. Metoden kræver adskillige enkelttest, men den giver yderligere et godt overblik over stålets bestandighed og begrænsninger. Brigham's metode danner også grundlaget for ASTM G 150 standardmetoden, som giver en mere direkte måling af CPT, med et betydeligt reduceret antal prøvninger [14], til

gængæld får man ingen information om stålets bestandighed ved relativt lave oxidationspotentialer, som ofte optræder i praksis.

## EXPERIMENTEL FREMGANGSMÅDE

Vi har testet materialer leveret i form af rør med tre kommercielle overflader: Bejdsset, slebet og elektropoleret. Materialerne er leveret i henhold til EN 10088 type 1.4404 og DIN 11850, BC. Ruhed og kemisk sammensætning ses i tabel 1 og 2.

**TABEL 1.**

Egenskaber af de prøvede materialer. Alt er leveret som langsvejste rør i henhold til EN 10088 type 1.4404, DIN 11850, BC med dimension: 63,3x1,6 mm, ODxWT.

Materiale	Produktionsvej	Ra, $\mu\text{m}^a$	Rz, $\mu\text{m}^a$
A. Bejdsset	Koldvalset, udglødet, bejdsset	0,48	4,6
B. Slebet	Koldvalset, udglødet, bejdsset, slebet	0,19	1,7
C. Elektropoleret	Koldvalset, udglødet, bejdsset, elektropoleret	0,12	1,0

a. Gennemsnitlig ruhed (Ra) og middel profildybde (Rz), gennemsnit af 4 målinger på langs af rørene.

**TABEL 2.**

Kemisk sammensætning (vægt-%) og PRE af materialerne.

Materiale	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Ti	%N	PRE <sup>a</sup>
A. Bejdsset	0,024	0,38	1,40	0,040	0,005	17,2	10,7	2,13	0,007	0,035	24,8
B. Slebet	0,014	0,50	1,85	0,036	0,012	16,8	10,9	2,15	0,009	0,022	24,2
C. Elektropoleret	0,021	0,60	0,94	0,032	0,006	18,1	11,6	2,21	0,009	0,036	26,0

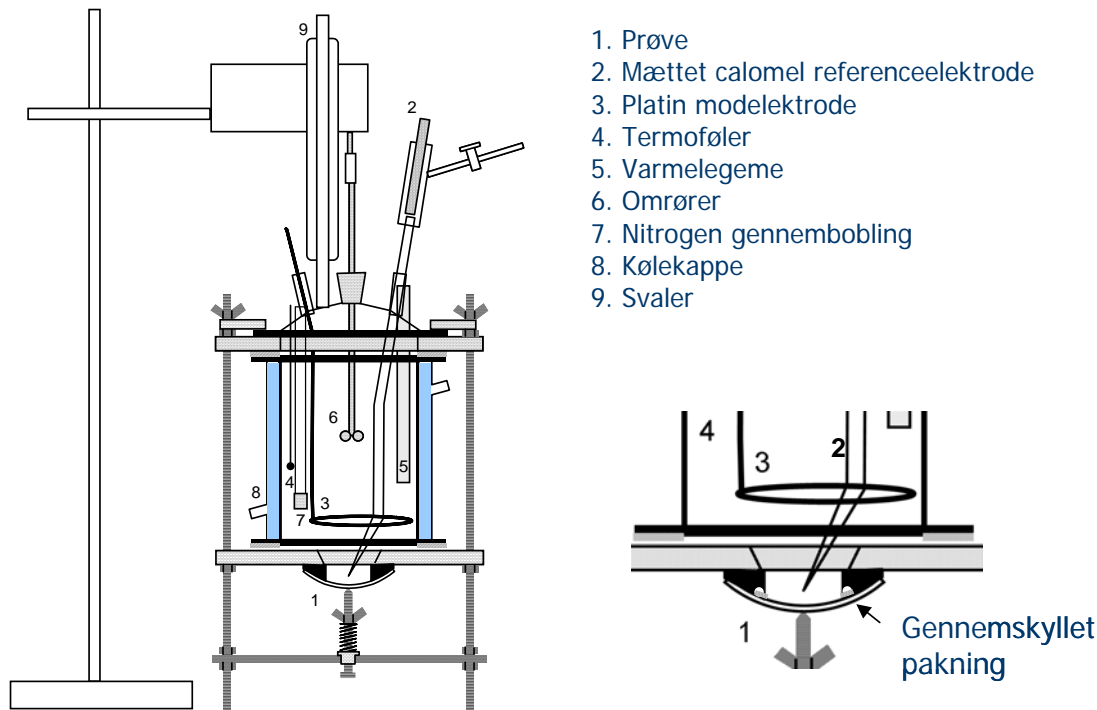
a. Pitting Resistance Equivalent,  $PRE = Cr + 3,3 Mo + 16 N$

Den kritiske pittingtemperatur (CPT) blev målt på to forskellige måder:

- Ved at udføre serier af cykliske polarisationer, hver enkelt ved fast temperatur, men hver serie dækker et bredt temperaturområde.
- Ved brug af ASTM G 150 metoden.

Prøvestykkerne (krum buelængde 60 mm x 60 mm lange) blev udskåret af rør med OD 63,3 mm, så langsvejsningen ikke kom med. Rengøring før forsøg bestod i behandling i 2% NaOH og derefter i 2% HNO<sub>3</sub> for at simulere almindelig CIP (Cleaning In Place, rengøring af et anlæg uden at adskille rørsystemer m.v.). For at undgå spaltekorrosion udførtes alle test i en celle med

gennemskyllet pakning, med en specielt udformet pakning, se figur 1. Det eksponerede areal var  $5 \text{ cm}^2$ .



FIGUR 1 – Skematisk tegning af testopstillingen. Der benyttes en specielt støbt siliconepakning til den gennemskyllede pakning.

Cyklisk polarisation blev kørt fra prøvestykkets naturlige korrosionspotential i den oxiderende retning, med en hastighed på  $10 \text{ mV/min}$ , indtil enten en strøm på  $1 \text{ mA/cm}^2$  overskrides, eller potentialet når op på  $+1000 \text{ mV SCE}$ . Derefter køres tilbage med en hastighed på  $20 \text{ mV/min}$ . Før polarisering blev prøvestykket konditioneret ved  $-200 \text{ mV SCE}$  i 5 minutter. Disse forsøg blev udført i natriumkloridopløsninger som dækker området fra  $0,05\%$  til  $5,0\% \text{ Cl}^-$  og ved temperaturer fra  $5$  til  $95^\circ\text{C}$ . Temperaturerne blev valgt med henblik på at opnå en pålidelig bestemmelse af CPT. Dette indebærer en gradvis tilnærmelse af prøvningstemperaturen til målet, og dette medfører at prøvningstemperaturerne ikke fordeler sig jævnt over det interval, som dækkes.

ASTM G150 metoden er formentlig den eneste elektrokemiske metode, som er så vidtgående standardiseret at man umiddelbart kan sammenligne resultater fra forskellige laboratorier. Derfor blev det besluttet at tage denne metode med i dette projekt. Metoden er oprindeligt udviklet med henblik på at rangordne forskellige typer af rustfrie stål, fra 1.4404 op til "6 Moly"-typerne. Derfor benyttes en høj kloridkoncentration ( $1 \text{ M NaCl}$ ) og et højt potential. Dette gør det muligt at opnå grubetæring i et bredt udvalg af forskellige legeringer inden for temperaturintervallet  $0$  til  $100^\circ\text{C}$ . Prøven polariseres til et fast potential på  $+700 \text{ mV SCE}$  i en opløsning af  $1 \text{ M NaCl}$ .

Temperaturen hæves fra 0°C med 1°C/minut indtil strømmen overskrider 1 mA/cm<sup>2</sup>, eller temperaturen når 95°C.

Alle testopløsninger blev fremstillet af demineraliseret vand og NaCl. pH var nær neutral (7 til 8), der var ikke tilsat nogen buffer. Forsøgene blev gennemført med gennembobling med kvælstof.

## RESULTATER

### Cyklisk Polarisation

Bejdsede rør (A) blev testet ved syv forskellige kloridniveauer. Eftersom en hel dekades forskel i kloridniveau kun gav en relativt beskedne ændring i de målte pittingpotentialer og afledte CPT værdier, blev testmatricen reduceret til tre kloridniveauer for slebne (B) og elektropolerede (C) rør. Den fuldstændige testmatrix og de målte pittingpotentialer findes i tabel 3 til 5.

Figur 2 viser eksempler på polarisationskurver. Pittingpotentialet aflæses ved 10 µA/cm<sup>2</sup>, men kurverne indeholder også information om passivstrøm, repassiveringspotential og den ladningsmængde, som kan tilskrives grubetæring. Ved temperaturer, som er under eller nær ved CPT er der ofte ikke nogen klar overgang fra passiv til aktiv tilstand, og i så fald aflæses et "pittingpotential" på +1000 mV SCE. I tvivlstilfælde anser vi en ladningsmængde på mere end 100 mC/cm<sup>2</sup> for at indikere, at der er sket grubetæring. Når grubetæring indikeres ved at strømgrænsen overskrides observeres en ladningsmængde i området fra 600 til 38.000 mC/cm<sup>2</sup>, med stigende værdier forbundet med stigende prøvningstemperatur.

Teknikken med en gennemskyllet pakning virker for det meste udmærket til at undgå spaltekorrosion. Som regel kan der efter prøvning observeres gruber inden for det eksponerede område, men ikke i spalten. Hvis der optræder gruber i spalten kasseres de pågældende resultater. Dette sikrer en rimelig reproducerbarhed. Figur 3 viser et eksempel på et prøvestykke efter test.

Antallet af gruber i et prøvestykke efter prøvning varierer indenfor testmatricen. For materiale A (bejdsset) og B (slebet) stiger antallet af gruber fra blot nogen få ved temperaturer nær CPT til 30-50 gruber ved højere temperatur. De elektropolerede rør udmærker sig ved generelt kun at initiere en enkelt eller nogen få gruber.

**TABEL 3.**

Pittingpotentialer bestemt ved cyklisk polarisation. Bejdset rør. Alle resultater i mV (SCE).

T, °C	Kloridkoncentration, mg/l						
	500	1,000	2,000	5,000	10,000	20,000	50,000
5							923
7,5							1000
10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	774, 718
12,5				882			698, 583
15	980			837	618, 623	714	
17,5	1000			542			
20	622	569	549	542	429	439	446
30	516	398	416	365	289	196	184
40	448	381	355	294	202	174	
50	395	378	297	259	186	166	
60	318	312		259			70
70		294					
80	284	255		183			2
95	252			133			-39

**TABEL 4.**

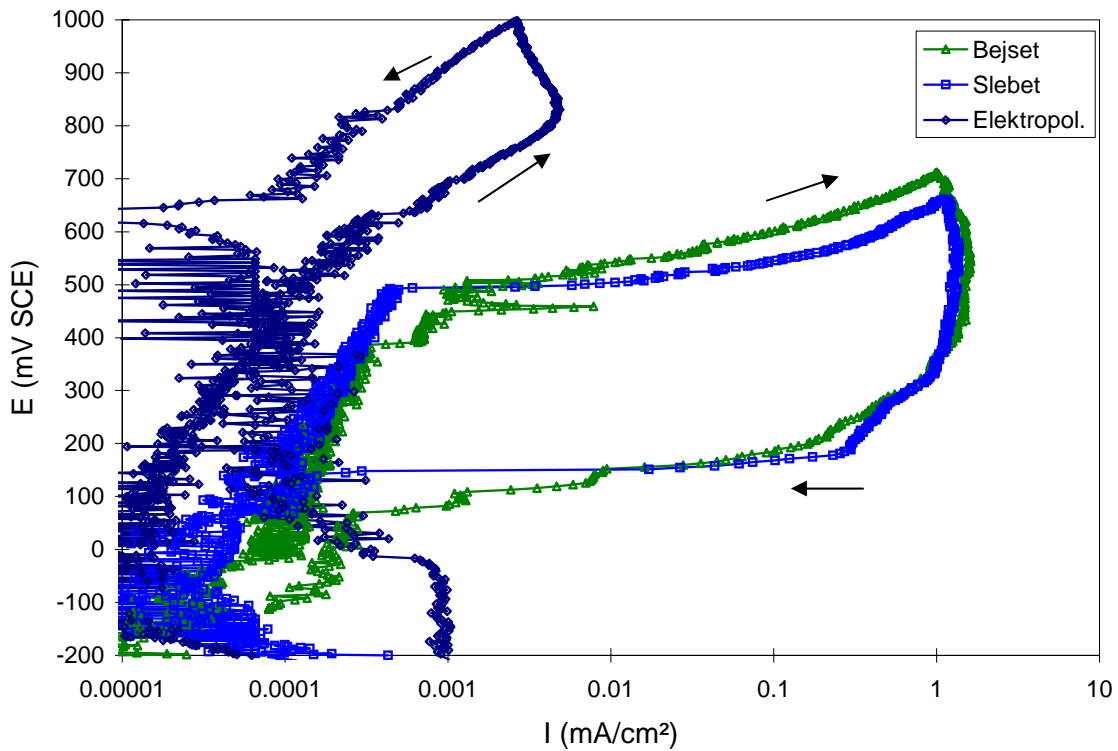
Pittingpotentialer af slebet rør målt ved cyklisk polarisation.

T, °C	Kloridkonc., mg/l		
	500	5,000	50,000
5	1000	911	896
7,5	1000	737	872
10	855	734, 675	516
15	789		
20	668	504	381
40	593	318	164
60	539	246	153
80	383	148	12
95	282	148	-44

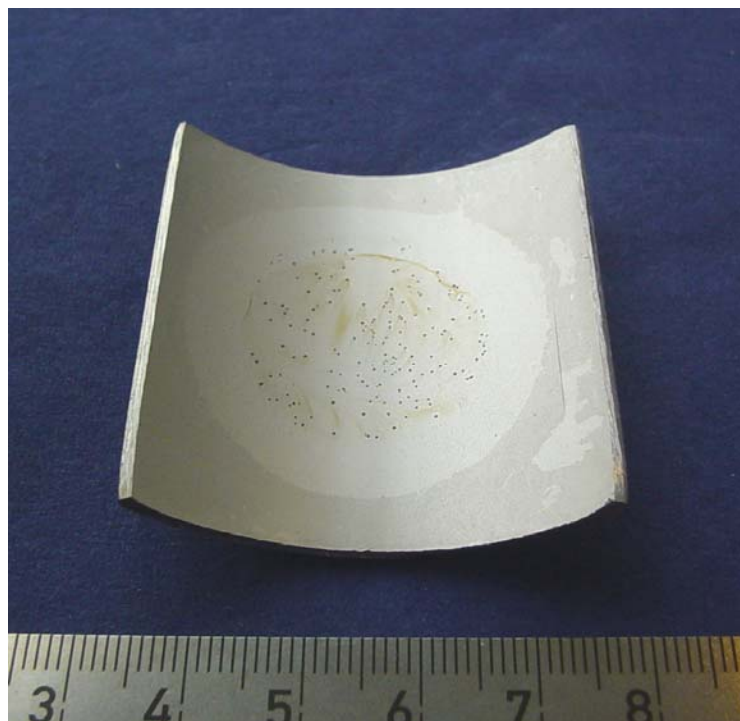
**TABEL 5.**

Pittingpotentialer af elektropoleret rør målt ved cyklisk polarisation.

T, °C	Kloridkonc., mg/l		
	500	5,000	50,000
10	1000	1000	1000
20	1000	1000	1000
40	1000	1000	1000
50		666, 545	896
60	1000	944	509
70	729		
80	525	345, 928	260
95	885	406	133



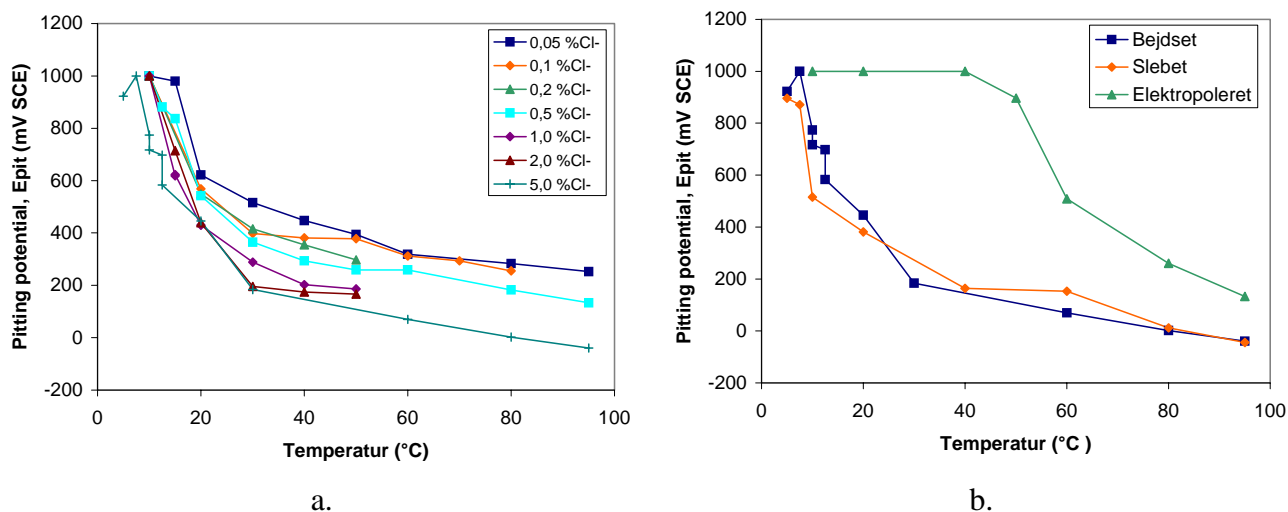
FIGUR 2 – Eksempler på polarisationskurver for de tre overfladetyper ved 20°C i 0,5% Cl<sup>-</sup>.



FIGUR 3 – Prøvestykke efter test. Gruberne findes inden for det åbent eksponerede areal med diameter 26 mm. Der er ingen tegn på spaltekorrosion under den gennemsyldede pakning.



Figur 4a viser den overordnede sammenhæng mellem pittingpotential og temperatur for det bejdsede rør (A). Der bemærkes en skarp stigning i pittingpotential ved lave temperaturer, hvor CPT aflæses. Ved højere temperaturer falder pittingpotential mere moderat med stigende temperatur og bliver inden for et bånd på 250 mV for kloridniveauer fra 0,05% til 5,0%; dette er underkastet en nærmere statistisk analyse.



FIGUR 4 – Pittingpotential aflæst fra polarisationskurverne vs. temperatur. a) Bejdsset materiale, alle kloridniveauer. b) Sammenligning af de tre overfladetyper i 5,0% kloridopløsning.

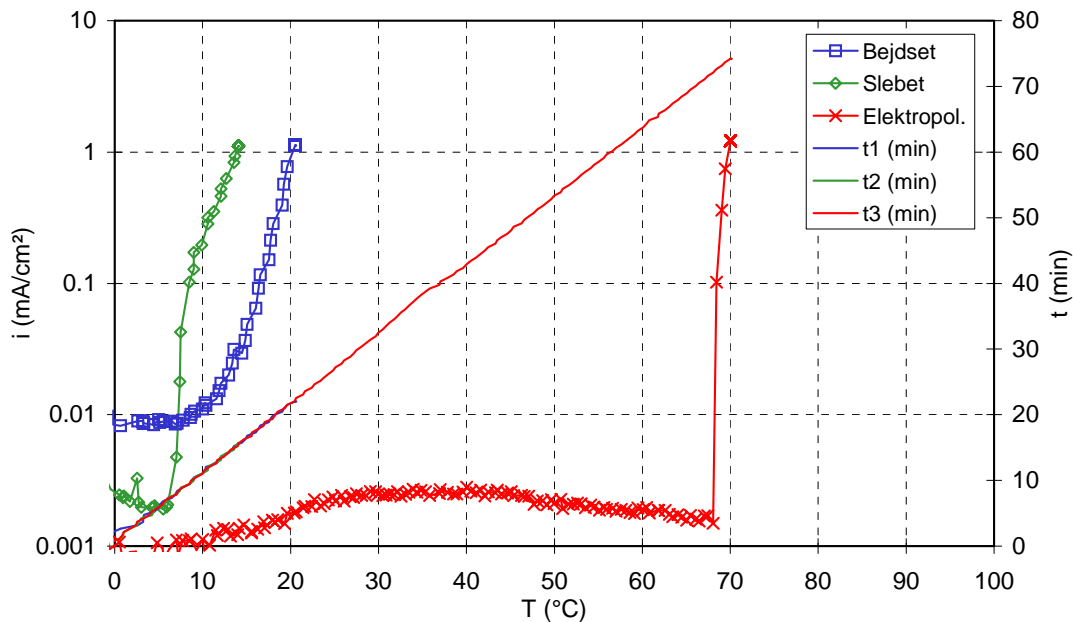
Når man sammenligner de forskellige overfladebehandlinger fremstår den elektropolerede med langt højere pittingpotentialer end den bejdsede og den slebne, om end der bemærkes en betydelig spredning ved både 0,05% og 5,0%. Den bejdsede og den slebne overflade har nogenlunde sammenlignelige pittingpotentialer. Se figur 4b.

## ASTM G150

Standardens forskrift for testbetingelser medfører tidligt gennembrud i 1.4404-typen, og det gør det undertiden svært at aflæse en klar CPT, se figur 5. Det er dog umiddelbart tydeligt både fra denne figur og fra tabel 6, at de værks-elektropolerede rør har betydeligt højere CPT end de bejdsede eller slebne.

Eftersom alle tre overfladetyper er kommercielt leverede stammer de pågældende rør fra forskellige charge numre. Dermed er der mindre forskelle i disse rørs analyse, og i dette tilfælde indikeres en større grundlæggende bestandighed af de elektropolerede rør. Denne forskel søges beskrevet ved "Pitting Resistance Equivalent"-tallet, som er angivet i tabel 6. For at vurdere denne effekt blev prøver fra alle tre rørleverancer (om-) elektropoleret hos en kommerciel elektropolerer. På denne vis søges effekten af den oprindelige overfladebehandling nulstillet, så den rendyrkede legeringseffekt kan undersøges med endnu en serie G150 test. Det fremgår af

tabel 6 og figur 6 at tillægs-elektropoleringen nedsætter CPT for det oprindeligt elektroplerede rør til et niveau, som er på linie med det som det bejdsede og det slebne rør oprindeligt havde, mens hverken det bejdsede eller det slebne rør opnår nogen forbedring ved denne elektropolering.

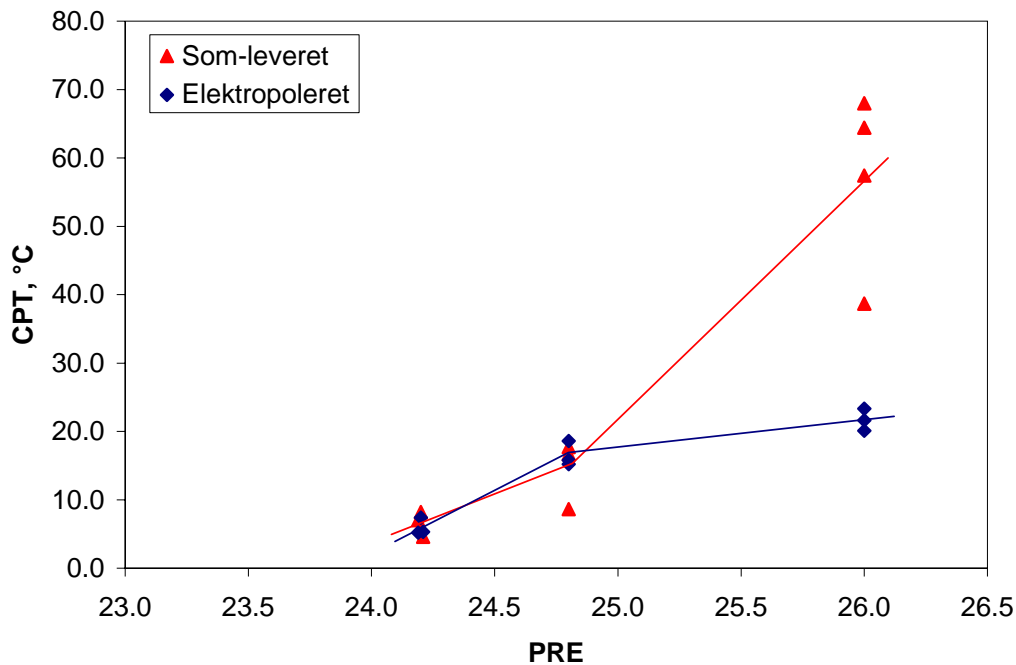


FIGUR 5 – Eksempler på CPT-kurver som de opnås ved ASTM G150 metoden.

**TABEL 6.**  
Kritisk Pittingtemperatur målt ved ASTM G150.

Materiale	PRE <sup>a</sup>	CPT, °C	
		Som leveret	Kommerciel elektropolering
A. Bejdsset	24,8	8,6	18,6
		17,7	15,2
		16,7	15,8
B. Slebet	24,2	7,0	5,2
		4,6	5,3
		8,2	7,4
C. Elektropoleret	26,0	68,0	23,3
		64,4	20,1
		57,4	21,6
		(38,7)	

a. Pitting Resistance Equivalent,  $PRE = Cr + 3,3 Mo + 16 N$

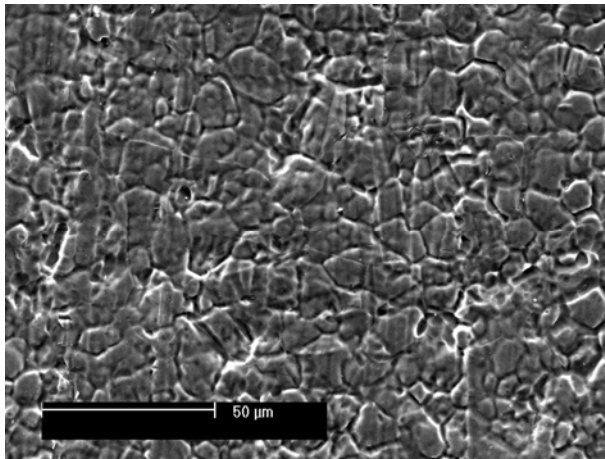


FIGUR 6 – Sammenhæng mellem CPT og Pitting Resistance Equivalent (PRE) af rørene som leveret og (om-) elektroperet.

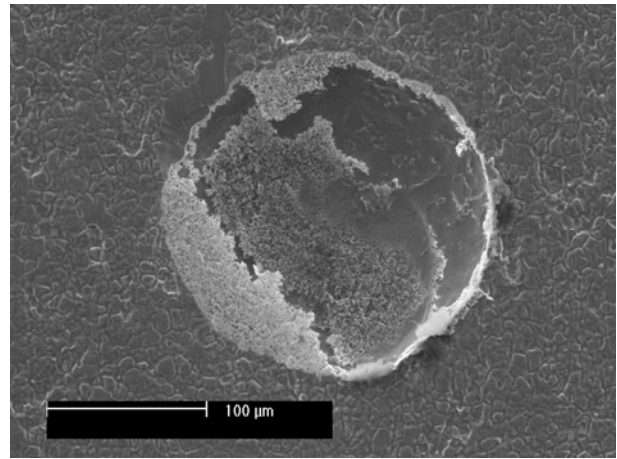
### Topografi af Overflader og Gruber

For at sammenholde pitting-resultaterne med overfladernes topografi har vi undersøgt såvel ikke-eksponerede som eksponerede prøvestykker i Scanning Elektron Mikroskop (SEM). Overfladerne som de blev modtaget fra rørværket ses i figur 7a-7c. Det bejdsede materiale (figur 7a) viser de sædvanlige grøfter langs korngrænser og spredte åbne gruber fra inklusioner, som gik ud til overfladen. Det slebne materiale viser den sædvanlige udtværing med en masse overlappinger og muligheder for at danne lukkede korrosionsceller. Den elektroperede overflade (figur 7c) er helt flad og glat ved denne forstørrelse, med blot en antydning af korn- og tvillinggrænser og med nogen åbne fordybninger. Disse fordybninger var formentlig inklusioner, som gik ud til overfladen, men som nu er fjernet og hvor hulkanterne er yderligere afrundede.

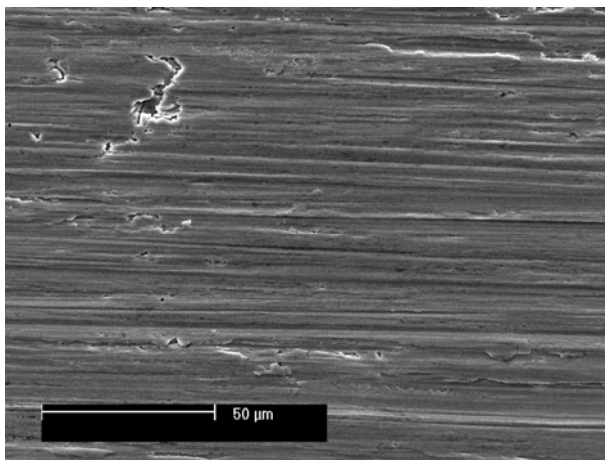
Karakteren af grubeinitiering kan bedst observeres på prøvestykkerne fra G150-prøvning, fordi denne test afbrydes, lige så snart strømstyrken indikerer væsentlig korrosion. Prøvestykker, som har været udsat for en hel cyklisk polarisation har trukket en meget større ladningsmængde, og dermed har grubene i almindelighed udviklet sig til den velkendte halvkugleform. De tre overfladetyper viser markant forskellig topografi ved grube-initiering, se figur 7d til f.



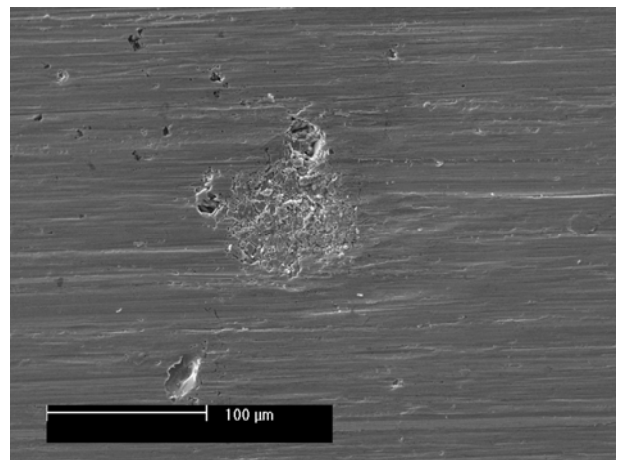
a) Bejdset



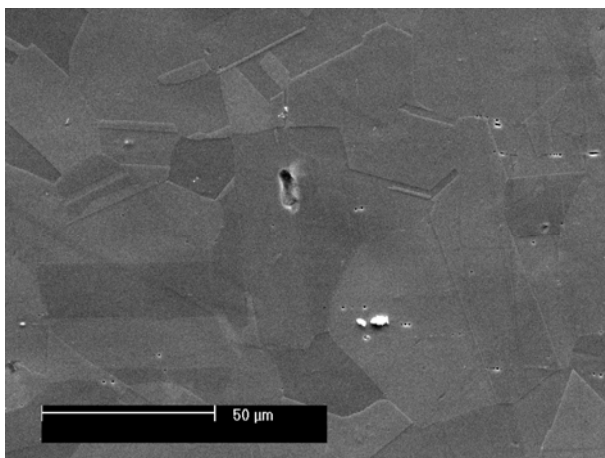
d) Grube i bejdset overflade



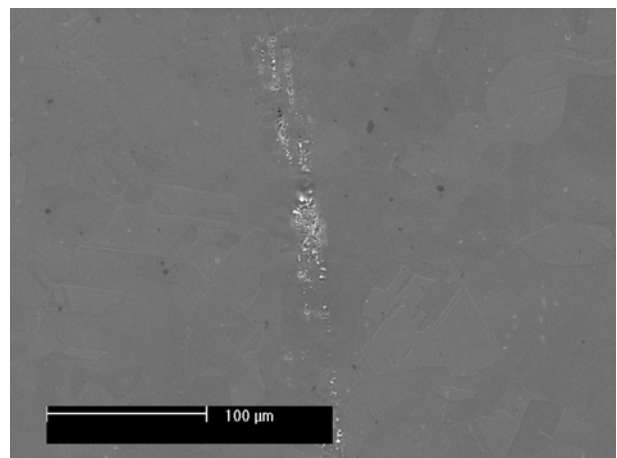
b) Slebet



e) Grube i slebet overflade



c) Elektropoleret



f) Grube i elektropoleret overflade

FIGUR 7 – SEM billeder af røroverflader som leveret (a til c) og efter ASTM G150 test (d-e).

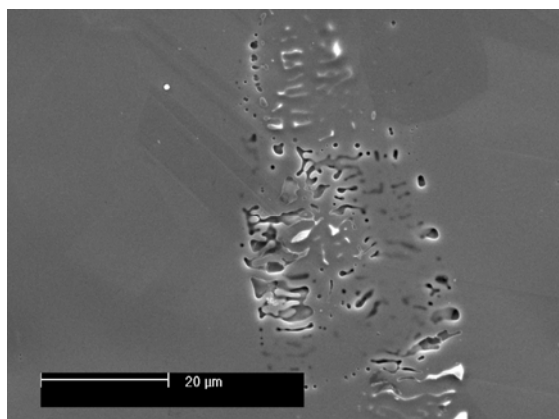
Den bejdsede overflade (figur 7d) udvikler et antal halvkugleformede gruber. Den slebne overflade (figur 7e) udvikler adskillige steder, hvor man kan begynde at se kornstrukturen af det udeformede materiale dybere under overfladen; dybden af angrebet i initierings-fasen er ganske beskeden. Den værks-elektropolerede overflade (figur 7f) udvikler et mønster, som ser ud til at svare til udvalgte inklusionspartikler; der findes kun en enkelt eller højst nogen få sådanne steder på hele det prøvede overfladeareal (5 cm<sup>2</sup>).

Fordi bestandigheden af det værks-elektropolerede rør var så bemærkelsesværdigt meget bedre end både det bejdsede og det slebne, fik vi som nævnt (om-) elektropoleret et antal prøvestykker. Elektropolerings-entreprenøren benytter et bad af fosforsyre-svovlsyre typen; procedure, strømstyrke og behandlingstid er baseret på operatørens erfaringer. Acceptkriteriet er blot, at der opnås en spejlende overflade, og hvis det ikke lykkes i første omgang, så får de pågældende stykker straks en tur til. Det gav ikke nogen væsentlig forbedring for de bejdsede og de slebne prøvestykker, mens det i høj grad nedsatte bestandigheden af de værks-elektropolerede stykker, se tabel 6 og figur 6.

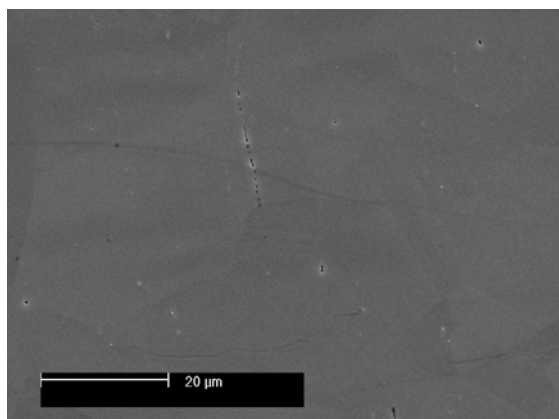
De oprindeligt bejdsede prøvestykker (figur 8a) viser efter elektropolering den samme type af bort-ætsede inklusioner, som oprindeligt blev observeret i de værks-elektropolerede prøvestykker efter korrosionsprøvning, blot i meget større antal.

De oprindeligt slebne prøvestykker (figur 8b) viser nu en helt anden type af bort-ætsede inklusioner, meget mere snævre og dybe. De lidt mørkere pletter som ses på SEM-billedet ved siden af ætse-hullerne indikerer, at der findes partikler med et stort indhold af lettere grundstoffer inden for de første få µm under overfladen.

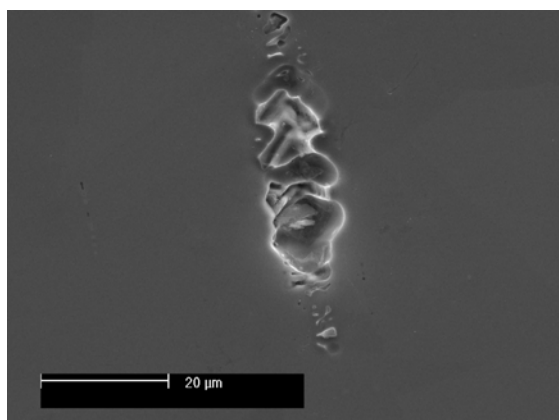
De værks-elektropolerede prøvestykker viser efter om-elektropolering (figur 8c) et antal bort-ætsede inklusioner, meget lig hvad der blev observeret efter G150-prøvning af denne overfladetype, men nu i større antal.



a) Bejdet og derefter elektropoleret rør



b) Slebet og derefter elektropoleret rør



c) Værks-elektropoleret og om-elektropoleret rør

FIGUR 8 – SEM billeder af overflader efter kommerciel (om-) elektropolering.

## DISKUSSION

ASTM G150 metoden blev oprindeligt udviklet for at kunne rangordne forskellige legeringer. Selve konceptet, at under en vis temperatur forekommer grubetæring simpelthen ikke, har imidlertid en betydelig ingeniørmæssig tiltrækning. Selv om ASTM G150 specificerer prøvning i 1 molær NaCl, så kan selve prøvningsmetoden uden videre anvendes også på andre miljøer. Vi forventede, at denne CPT så ville afhænge af dette miljøes sammensætning, f.eks., kloridindholdet. Vi finder imidlertid at denne afhængighed er bemærkelsesværdigt lille, som det fremgår af figur 4 og tabel 7. I området af kloridkoncentrationer fra 0,05% til 5% falder alle CPT-værdierne i et bånd, som er mindre end 10°C bredt. Beliggenheden af dette bånd afhænger i øvrigt af legeringssammensætning og overfladetype.

De to forskellige metoder, dels cyklisk polarisation ved et antal temperaturer, dels ASTM G150, giver stort set de samme værdier for CPT.

**TABEL 7.**  
Sammenligning af målte kritisk pittingtemperatur (CPT, °C) ved enten polarisationskurver eller ASTM G150.

CPT °C	Polarisationskurver Cl <sup>-</sup> , mg/l			ASTM G150 Cl <sup>-</sup> , mg/l
	500	5,000	50,000	
Materiale				35,500
A. Bejdset	17	14	9	14 ± 5
B. Slebet	14	9	6	7 ± 2
C. Elektropoleret	65	45	45	57 ± 13

Fra et ingeniørmæssigt synspunkt er CPT-værdierne for legeringer af 1.4404-typen desværre så lave, at økonomiske forhold dikterer brug af denne legering også ved temperaturer over CPT. Det betyder, at barske kombinationer af oxidationsevne, kloridindhold og temperatur vil forårsage grubetæring. For at vurdere disse begrænsninger har diagrammer som vor figur 4a fundet udbredt anvendelse.

Når temperaturen er et stykke over CPT forekommer stregerne i figur 4a at være rette nok til at man kan forsøge en lineær model. Det er blevet foreslået, at  $E_{pit}$  afhænger lineært af  $\log[Cl^-]$ . Vi vover ikke at påstå, at sådan en simpel, lineær og additiv model repræsenterer nogen fundamental naturlov, men for ingeniørmæssige anvendelser kan sådan en matematisk formulering være nyttig. Lineær regression på datasættene fra de bejdsede (A) og de slebne (B) overflader giver så følgende:

For bejdset materiale A:

$$E_{\text{pit}} = 456 (\pm 21) - 4,6 (\pm 0,4) \times \text{Temp} - 159 (\pm 13) \times \log[\text{Cl}^-] ; R^2 = 0,91 \quad (1)$$

For slebet materiale B:

$$E_{\text{pit}} = 543 (\pm 29) - 5,0 (\pm 0,4) \times \text{Temp} - 180 (\pm 14) \times \log[\text{Cl}^-] ; R^2 = 0,96 \quad (2)$$

$E_{\text{pit}}$  er i mV (SCE), Temp i °C,  $[\text{Cl}^-]$  i g/L. ( $\pm XX$ ) angiver een standardafvigelse

$R^2$  værdierne er ikke alt for overbevisende, men kendskab til størrelsen af standardafvigelserne tillader os at udtale os om den risiko man løber, når man sammenligner driftsbetingelser målt i et anlæg med vore laboratoriedata.

## KONKLUSIONER

Vi har anvendt to metoder til at bestemme bestandighed af 1.4404 rør mod grubetæring i neutrale kloridopløsninger: Cyklisk polarisation og ASTM G150.

Slebne overflader med lav ruhed er ikke bedre end betydeligt mere ru, bejdsede overflader, når man tager hensyn til små variationer i legeringernes sammensætning. I sammenligning er den værks-elektroplerede overflade meget bedre; dette tilskrives en meget kraftig nedsættelse af antallet af mulige initieringssteder.

Miljøets kloridkoncentration (inden for intervallet 0,05% til 5%) har kun en beskedne betydning for den potential-uafhængige CPT, og for 1.4404-typen er denne temperatur for lav til, at man i praksis kan lade sit materialevalg styre af den. Derfor bliver man nødt til at bruge pitting-potentialer i forbindelse med materialevalg.

Den samlede matrix af CPT og pittingpotential data gør det muligt at opstille en begrundet specifikation for overfladetyper i rustfrie stålrør for levnedsmiddel- og lægemiddelindustri.

--oOo--

Dette projekt udføres med støtte fra Industri- og Handelsstyrelsen. Forfatterne ønsker også at takke de deltagende virksomheder: Alfa Laval A/S, APV A/S, Arla Foods amba, Bryggerigruppen A/S, Chr. Hansen A/S, Danisco A/S, Danish Crown AmbA, Easyfood A/S, Grundfos A/S, Hammerum Stainless A/S, ISS Food Hygiejne A/S, KJ maskinfabrikken A/S, Niro A/S, O.P. Stål A/S, S.S. Rustfri A/S, Sandvik MT og SFK Meat Systems.



## REFERENCER

1. Ericsson, R.; Schön, L.; Wallén, B.  
Effect of some oxide removal treatments on the corrosion resistance of 316 stainless steel  
8th. Scandinavian Corrosion Congress. Proceedings, Vol. 1 pp. 321-329; 1978.
2. Moayed M.H.; Laycock N.J.1; Newman R.C.  
Dependence of the Critical Pitting Temperature on surface roughness  
Corrosion Science, Vol. 45, No. 6, June 2003, pp. 1203-1216(14).
3. Tuthill, A.H.; Avery, R.E.  
Specifying stainless steel surface treatment  
NIDI Technical Series No. 10068; 1992.
4. Yu Zuo, , Haitao Wang; Jinping Xiong  
The aspect ratio of surface grooves and metastable pitting of stainless steel  
Corrosion Science, Vol. 44, Issue 1, January 2002, Pages 25-35.
5. G.T. Burstein; P.C. Pistorius  
Surface Roughness and the Metastable Pitting of Stainless Steel in Chloride Solutions  
Corrosion, May 1995, pp. 380.
6. A. Burkert, K. Schilling; A. Heyn  
Einfluss der Schleifbehandlung auf das Korrosionsverhalten von Chrom-Nickel-Stählen  
Materials and Corrosion, Volume 55, Issue 10, Pages 787 – 793.
7. JC Tverberg  
Conditioning of stainless steel surfaces for better performance  
Stainless Steel World, April 1999, pp.36-41.
8. Lena Wegrelius; Birgitta Sjödén  
Passivation Treatment of Stainless Steel  
ACOM 4-2004, Outokumpu Stainless AB.
9. Karlsson, A.; Olsson, J.  
Atmospheric corrosion of stainless steel  
7th Scandinavian Corrosion Congress, Trondheim, pp. 71-86, 1975.
10. D. Wallinder; I. Odnevall Wallinder; C. Leygraf  
Influence of Surface Treatment of Type 304L Stainless Steel on Atmospheric Corrosion  
Resistance in Urban and Marine Environments  
Corrosion, vol. 59, nr. 3, pp. 220-228, 2003.
11. Houska, C.  
Stainless Steels in Architecture, Building and Construction  
Reference Book Series, No. 11024. Nickel Development Institute (NiDI), 2001.
12. Brigham, R.J.; Tozer, E.W.  
Effect of Alloying Additions on the Pitting Resistance of 18% Cr Austenitic Stainless  
Steel  
Corrosion, vol. 30, nr. 5, pp. 161-166; 1974.
13. R. J. Brigham, E. W. Tozer  
Temperature as Pitting Criterion  
Corrosion, 29, 1, (1973), p. 33; 1973.
14. Arnvig, P.-E.; Bisgård, A.D.  
Determining the Potential Independent Critical Pitting Temperature (CPT) by a  
Potentiostatic Method Using the AvestaPolarit Cell  
AvestaPolarit, ACOM, No.3:1; 1996.