

Detektering och storleksbestämning av slutna sprickor - Litteraturstudie

Tommy Zetterwall
Carl Johan Borgenstam

November 1993

SKI Rapport 94:1

Detektering och storleksbestämning av slutna sprickor – Litteraturstudie

Tommy Zetterwall
Carl Johan Borgenstam

AB Svensk Anläggningsprovning
Kemistvägen 21, 183 34 Täby

November 1993

SKI Projekt 92023
SA/FoU-Rapport 93/01

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Statens kärnkraftinspektion, SKI.
Slutsatser och åsikter som framförs i rapporten är författarens/författarnas
egna och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med SKIs.

DETEKTERING OCH STORLEKSBESTÄMNING AV SLUTNA SPRICKOR - LITTERATURSTUDIE

SAMMANFATTNING

AB Svensk Anläggningsprovning, SA, har på uppdrag av Statens Kärnkraftsinspektion, SKI, genomfört en litteraturundersökning för att kartlägga och sammanfatta de studier om slutna sprickors effekt vid oförstörande provning som finns publicerade i litteraturen. Med slutna spricka menas då sprickytorna är i kontakt med varandra, vanligen pga tryckspänningar över sprickan.

Undersökningen omfattar ofp-metoderna ultraljud, virvelström, magnetpulver och penetrant.

I studien behandlas effekten av sprickytornas morfologi, sprickans miljö, tryckspänningens storlek och provningsparametrar som sökarvinkel, frekvens och vågform vid ultraljudprovning.

Studien visar att de undersökta ofp-metoderna alla påverkas av sprickslutning. Risken för sprickslutning i olika delar av svenska kärnkraftreaktorer och hur stora effekterna kan bli vid oförstörande provning finns behandlat.

Det går inte att ge generella kvantitativa värden på effekten av sprickslutning. Det finns för många parametrar som påverkar resultatet. Varje provning måste bedömas individuellt baserat på de aktuella förhållandena.

INNEHÅLLFÖRTECKNING

1.	INLEDNING	2
2.	SLUTNA SPRICKOR	2
3.	ULTRALJUD	4
3.1	Detektering	4
3.1.1	Signalstyrkans beroende av sökarvinkel, frekvens och vågtyp	4
3.1.2	Signalstyrkans beroende av morfologin	10
3.1.3	Signalstyrkans beroende av miljön	14
3.1.4	Signalstyrkans beroende av defekttyp	16
3.1.5	Speciella effekter i svetsar	18
3.1.6	Effekt av värmebehandling	24
3.2	Storleksbestämning	25
3.2.1	Teoretiska modeller	25
3.2.2	Experimentella försök	28
4.	VIRVELSTRÖM	32
5.	MAGNETPULVER OCH PENETRANT	38
6.	SPRICKSLUTNING - SVENSKA KÄRNKRAFTANLÄGGNINGAR	39
7.	SLUTSATS OCH REKOMMENDATION	42
7.1	Ultraljud	43
7.2	Virvelström	44
7.3	Magnetpulver och Penetrant	44
7.4	Slutsatser om effekten av sprickslutning i svenska kärnkraftanläggningar	45
	REFERENSER	46

BILAGOR:

1. Sammanställning över de artiklar som ingår i studien

1. INLEDNING

AB Svensk Anläggningsprovning, SA, har på uppdrag av Statens Kärnkraftsinspektion, SKI, genomfört föreliggande litteraturstudie för att kartlägga och sammanfatta de studier om slutna sprickors effekt vid oförstörande provning, ofp, som finns publicerade i litteraturen.

Lokala inhomogeniteter såsom svetsdefekter och sprickor orsakar någon form av svarsavvikelse hos alla ofp-metoder. Om defekten eller sprickan är sluten kommer normalt intensiteten hos svarsavvikelsen att minska. Med sluten spricka menas här att sprickyterna är i kontakt med varandra. För att åstadkomma kontakt behövs normalt en tryckspänning över sprickan. Det kan vara en yttre pålagd tryckspänning eller en tryckegegenspänning. Tryckegegenspänningen kan finnas i materialet före sprickbildningen eller vara tillväxtinducerad. Vid utmattningstillväxt genereras plastisk deformation som alltid åstadkommer tryckspänningar åtminstone över lokala delar av sprickytan och därmed sprickslutning.

Sprickslutning har stort säkerhetsintresse eftersom man kan tänka sig fall då sprickan är öppen och tillväxer då anläggningen är i drift, men sluter sig och är svår att detektera och storleksbestämma då anläggningen avlastas och ställs av för inspektion genom oförstörande provning.

2. SLUTNA SPRICKOR

Minskningen av intensiteten hos svarsavvikelsen vid ofp pga sluten spricka beror av följande faktorer:

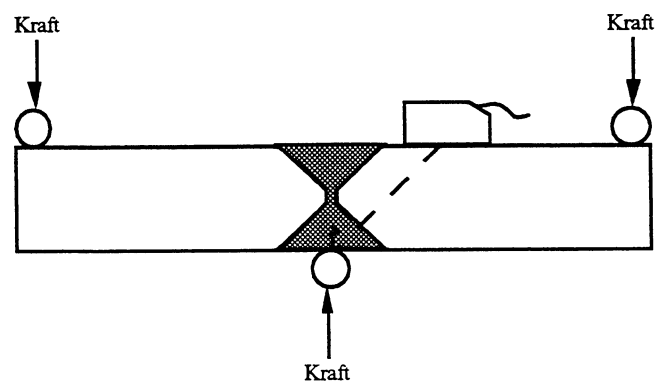
- Sprickyternas morfologi (ytstruktur)
- Sprickans miljö
- Tryckspänningens storlek
- Ofp-metod
- Provningsparametrar
- Materialegenskaper.

20 relevanta artiklar har återfunnits i litteraturen som innehåller studier av effekten av ovanstående faktorer. I bilaga 1 finns en sammanställning över dessa artiklar.

Sprickytans morfologi har stor betydelse för effekten av sprickslutning. Vid ojämna sprickytor tenderar den totala kontaktytan att bli mindre och effekten av sprickslutning blir därmed mindre. Vid normalt påkända utmattningssprickor erhålls vanligen en ganska jämn sprickyta som ger stor total kontaktyta och därmed stor effekt av sprickslutning. De flesta laboratorieundersökningar som medtagits i denna studie har utförts med utmattningssprickor.

Sprickans miljö påverkar också effekten av sprickslutning. Sprickor i icke-korrosiv miljö sluter sig normalt exaktare än sprickor i korrosiv miljö och ger därmed tydligare sprickslutningseffekt. Om korrosionsprodukter bildas i sprickan kan sprickan förbli öppen trots stora tryckspänningar. Mediet i sprickan påverkar också effekten av sprickslutning.

I de flesta undersökningar har trepunktsböjning använts för att åstadkoma tryckspänningar över sprickan, se figur 1. I några fall åstadkoms tryckspänning genom fyrapunktsböjning eller genom att pressa ihop två plåtar.



Figur 1. Modell över trepunktsböjning.

Undersökningarna omfattar ofp-metoderna ultraljud, virvelström, magnetpulver och penetrant. För ultraljud finns studier om både detektering och storleksbestämning.

Exempel på provningsparametrar som har studerats är sökarvinkel, frekvens och vågform vid ultraljudprovning.

Materialegenskaperna som t ex sträckgränsen är en viktig variabel men har i allmänhet inte redovisats i de studerade undersökningarna. Ett mjukare material ger en större kontaktyta mellan sprickytorna vid en viss tryckspänning än ett hårdare. De tillväxtinducerade tryckegegenspänningarna vid utmattning är i stort sett proportionella mot sträckgränsen varför tryckegegenspänningarna hos ett höghållfast material blir större än hos ett låghållfast. Vid utmattningstillväxt fås således två effekter som motverkar varandra och det är i detta fall inte självklart om effekten av sprickslutning blir störst i höghållfasta eller låghållfasta material.

3 ULTRALJUD

3.1 Detektering

3.1.1 *Signalstyrkans beroende av sökarvinkel, frekvens och vågtyp*

Experiment har utförts där amplitudminskning som funktion av sökarvinkel och frekvens vid olika tryckspänningar över utmattningssprickor har undersökts. Experiment utförda av Kapranos^[1] har skett på austenitiskt rostfria plåtar med svets. Tjocklek på testobjekten var 25 mm. Använda sökarvinklar var 45°, 60° och 70° med frekvenserna 2 och 4 MHz. Både longitudinellt ljud och transversellt ljud testades.

Använd teknik var puls-eko från motstående spricksida med de undersökta utmattningssprickorna placerade enligt följande:

Testobjekt S1:	En 6 mm djup ytgående spricka i centrum av svets
Testobjekt S2:	En 8 mm djup ytgående spricka i centrum av svets
Testobjekt S3:	En 2 mm djup ytgående spricka i HAZ

För testobjekt S1 har tryckspänningens storlek relaterats till amplituden, så att 100% bildskärmshöjd (BSH) sattes vid 0 MPa tryckspänning, och 65% BSH erhöles vid X MPa tryckspänning, vid avsökning med 2 MHz, transversalvågssökare enligt tabell 1:

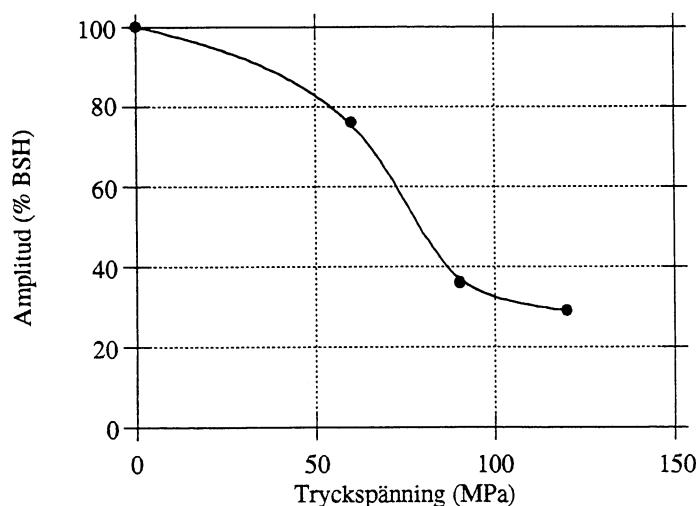
Sökarvinkel	Amplitud	Tryckspänning
45°	65%	48 MPa
60°	65%	77 MPa
70°	65%	60 MPa

Tabell 1. Resultatet från 2 MHz, transversalvågssökare på testobjekt S1.

Utmattningsprickan som var placerad i HAZ, värmepåverkade zonen, på testobjekt S3, gav följande resultat då en tryckkraft av 10kN belastade sprickan (ca 150 MPa), se tabell 2. I detta fall utfördes avsökningen igenom svetsgodset. Amplituden 100% BSH sattes även här vid 0 MPa tryckspänning.

Sökarvinkel	Tryckspänning	Amplitud
45°	150 MPa	37%
60°	150 MPa	25%
70°	150 MPa	21%

Tabell 2. Resultat från 2 MHz, longitudinalvågssökare på testobjekt S3.



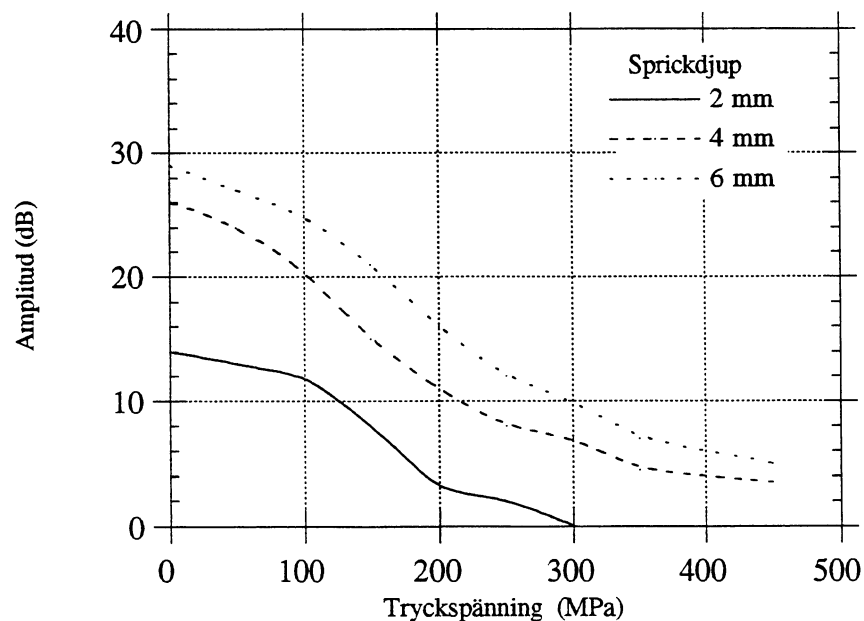
Figur 2. Amplituden som funktion av tryckspänningen för en 45°-longitudinell, 2 MHz sökare.

Figur 2 visar generellt signalsvaret för en longitudinalvågssökare på testobjekt S2, då en 45°, 2 MHz sökare används. Vid ca 100 MPa har amplituden mer än halverats.

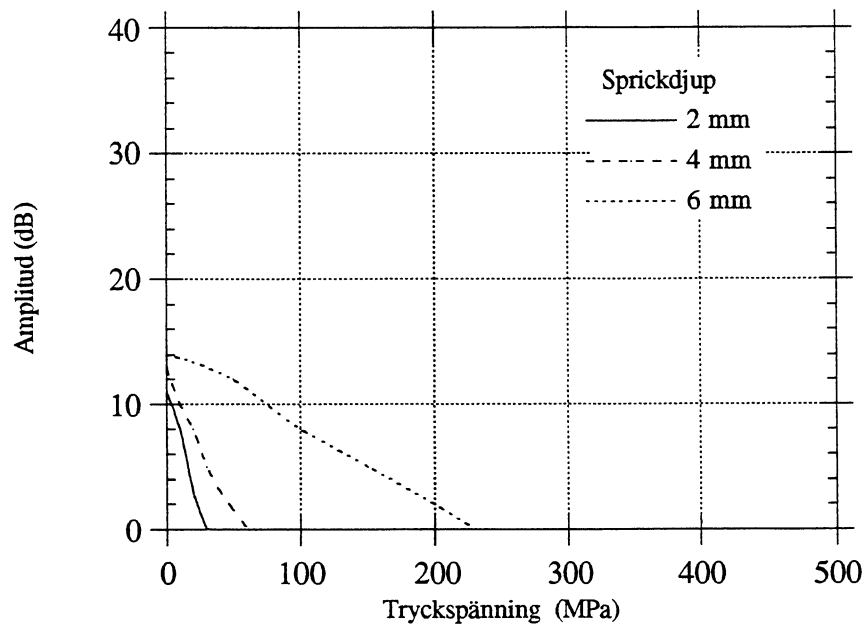
Generellt visar experimenten ^[1] att signalsvaret minskar vid ökad tryckspänning. Vid en tryckspänning av ca 100 MPa, erhålls en relativt kraftig minskning i signalsvar, ca 50% lägre amplitud. Detta gäller i stort sett för samtliga undersökta vinklar och frekvenser.

Försök har även utförts av Ibrahim et al.^[2] med puls-eko teknik från motstående spricksida för att visa påverkan av tryckspänning vid olika sökarvinklar samt olika sprickdjup.

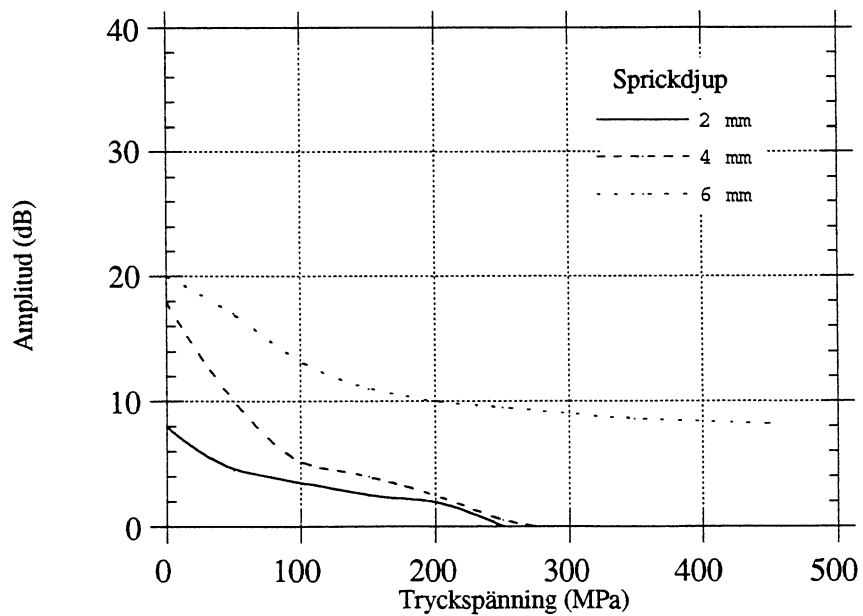
Resultaten presenteras i figurerna 3-5 och visar att bäst detekteringsförmåga erhålls med en 45°-sökare. I dessa fall har sökare med frekvensen 5 MHz använts.



Figur 3. Amplituden som funktion av tryckspänningen för 45°, 5 MHz sökare.



Figur 4. Amplituden som funktion av tryckspänningen för 60°, 5 MHz sökare.



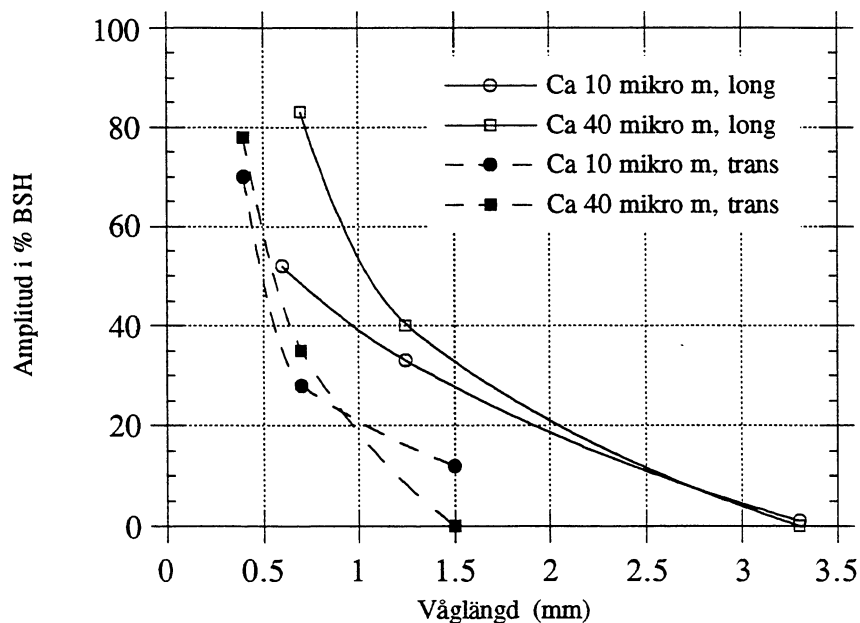
Figur 5. Amplituden som funktion av tryckspänningen för 70°, 5 MHz sökare.

Som förklaring till varför 45° sökaren ger det bästa signalsvaret anges i litteraturen att sprickytans struktur är som mest gynnsam för denna vinkel på ljudvågen. Denna vinkel ger också det bästa signalsvaret från en hörnreflektor vid avsökning från motstående sida.

Det svagare signalsvaret från 60°-sökaren har genom ett antal försök visats bero på vågomvandling då man genom stutsat ljud mot insidan får dubbel reflektion mot spricka och inneryta. Den direkta signalen från hörnet spricka/inneryta är svagare än den vågomvandlade signalen.

Ultraljudets frekvens har också betydelse såtillvida att kortare våglängd reflekteras bättre än större våglängd enligt Arakawa [15]. Transversellt ljud uppvisar ett kraftigare våglängdsberoende än longitudinellt ljud. Effekten av detta visas i figur 6.

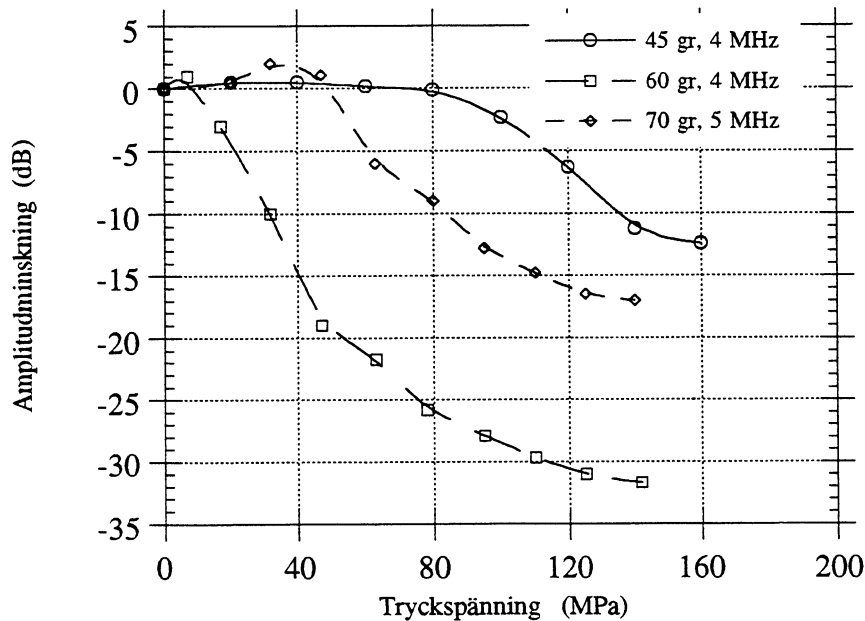
Här har två plåtar pressats mot varandra med ett konstant tryck av 196 MPa och reflektion uppmätts med 70° sökare både för transversellt och longitudinellt ljud.



Figur 6. Våglängdsberoendet för reflekterat transversellt och longitudinellt ljud vid olika ytfinhet.

Experiment med ultraljud har gjorts av Wooldridge et al. [5] som visar en svag ökning av signalsvaret från ett hörneko vid låga tryckspänningar.

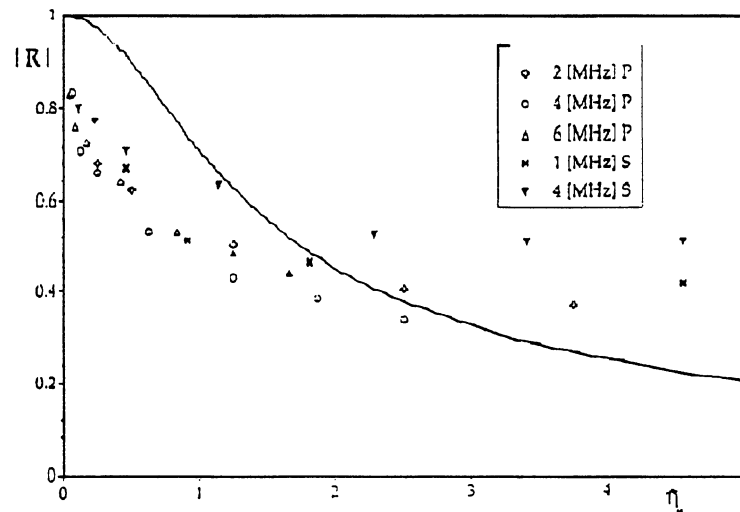
Detta beror på den komplexa variationen av reflektioner och vågomvandlingar som uppstår då kontakt uppstår mellan två sprickytor. Effekten kan ytterligare försvåras pga olikformig spänningsfördelning längs sprickytorna. Ett exempel på denna effekt visas i figur 7, där resultat från transversalvågssökare redovisas.



Figur 7. Amplitud som funktion av tryckspänningen med olika transversalvågssökare från en hörnreflektor.

Reflektion och transmission från två plåtar som pressas samman med varierande tryck har också beräknats av Boström et al.^[18]. Resultatet ifrån detta kan jämföras med experiment utförda av Wooldridge, där transmission och reflektion har uppmätts på två stålblock som pressats samman med känd kraft. De teoretiska förutsägelseerna överensstämmer kvalitativt med dessa mätningar, se figur 8.

Den avvikelse som finns, speciellt vid låga η -värden härrör enligt författaren ifrån diffus spridning i materialet som är försummad i de teoretiska modellerna. η är definierat som dimensionslöst tryck.

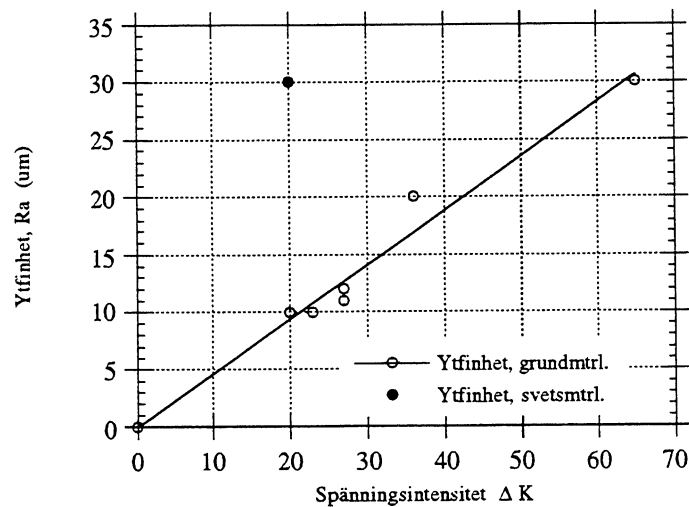


Figur 8. Jämförelse mellan teoretiska och experimentella reflektionsvärden för varierande tryckspänningar både avseende transversellt och longitudinellt ljud.

3.1.2 Signalstyrkans beroende av morfologin

Sprickytomans morfologi, ytstruktur, har belysts i ett flertal artiklar.

Undersökningar vid utmattning har gjorts av Wooldridge et al.^[5] avseende korrelationen mellan ytstrukturen hos sprickytona (R_a) och spänningsintensitetsfaktorns omfång (ΔK). Dessa undersökningar visar att variationer i K_1 under tillväxten av utmattningssprickor har ett direkt samband med sprickans ytstruktur. Vid större ΔK , ($K_{I\max} - K_{I\min}$), får sprickytan ett högre R_a värde. Figur 9 visar ett exempel på denna tendens för sprickor i både grundmaterial och i svets. Det är noterbart att det enda R_a -värdet för en utmattningsspricka i svetsmaterialet är betydligt högre än R_a -värdet för motsvarande spricka i grundmaterial.

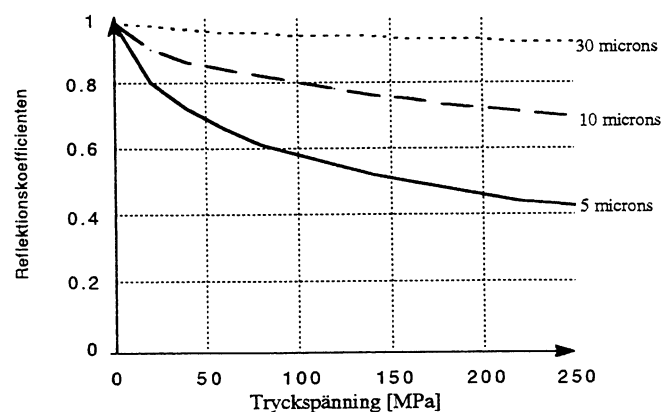


Figur 9. Spänningsintensitetsfaktorn ΔK som funktion av ytfinheten Ra för ett antal sprickor.

Temple ^[17] har bl a i sin rapport studerat hur ytstrukturen hos sprickytorna påverkar ultraljudsignalen.

Pålagd spänning på sprickytorna har varierat från 0 upp till 280 MPa och experimenten har utförts för olika värden på ytstruktur, 5, 10 och 30 μm .

I figur 10 visas reflektionskoefficienten som funktion av tryckspänningen för en 10 MHz longitudinalvågssökare vid 30° infall mot sprickytan.



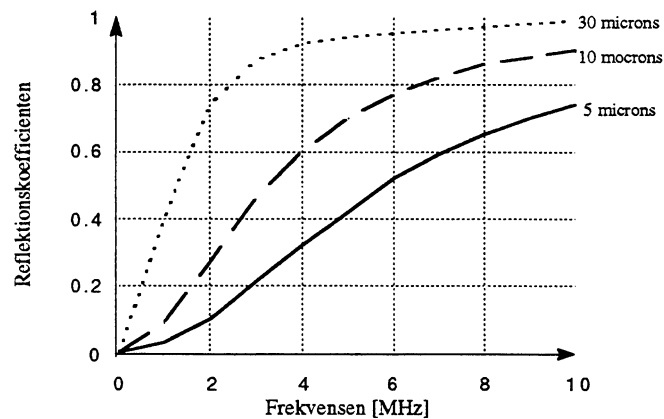
Figur 10. Reflektionskoefficienten för en 10 MHz longitudinalvågssökare vid 30° infall mot en sprickyta med olika ytfinhet.

I rapporten noteras att ökad tryckspänning på sprickytorna ger minskad reflektion och mera ljud transmitteras genom sprickorna. Detta innebär att ju större

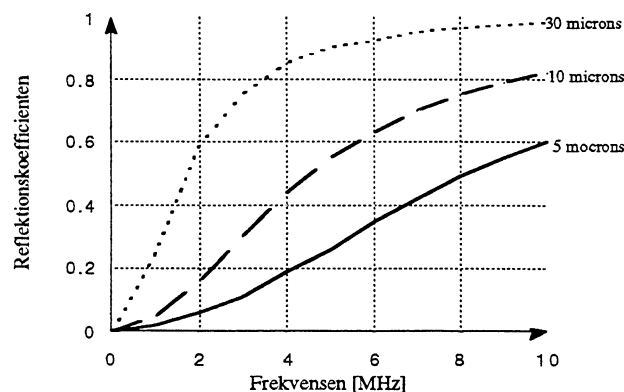
tryckspänning desto flera kontaktytor och desto större total kontaktyta erhålls vilket medför att mera ljud transmitteras.

Bättre ytfinhet transmitterar mer ljud än grövre ytfinhet för samma frekvens och pålagd last, då antalet kontaktpunkter och den totala kontaktytan ökar.

Ett annat sätt att presentera teoretiska resultat är att rita in variationen av reflektionskoefficienten som funktion av frekvensen. Detta har utförts för frekvenser upp till 10 MHz för normalt infall och för olika ytfinhetsvärden och resultatet visas i figurerna 11 och 12.



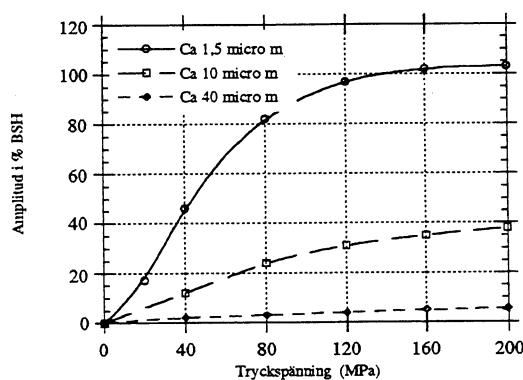
Figur 11. Reflektionskoefficienten som funktion av frekvensen för normalt infall mot sprickor med olika ytfinheter. Tryckspänningen över sprickorna var 60 MPa.



Figur 12. Reflektionskoefficienten som funktion av frekvensen för normalt infall mot sprickor med olika ytfinheter. Tryckspänningen över sprickorna var i detta fall 160 MPa.

Resultaten är presenterade för två värden av pålagd spänning, 60 MPa respektive 160 MPa. Frekvensen och ytfinheten har motverkande effekt. Samma reflektionskoefficient kan uppnås om frekvensen ökar då ytfinheten minskar. Resultaten för normalt infallande ljud överensstämmer med de teoretiska värden Haines, CEGB, presenterat och Wooldridge uppnått vid experimentella försök.

Experiment utförda av T. Arakawa [16] för att kontrollera ytfinhetens inverkan på signalsvaret från ultraljud har utretts på så sätt att maskinbearbetade metallytor, med olika ytfinhet, har pressats samman och sedan har det transmitterade ljudet uppmätts med en 0°-sökare med frekvensen 2 MHz, se figur 13. Transmitterat ljud ökar vid högre tryckspänning och bättre ytfinhet.



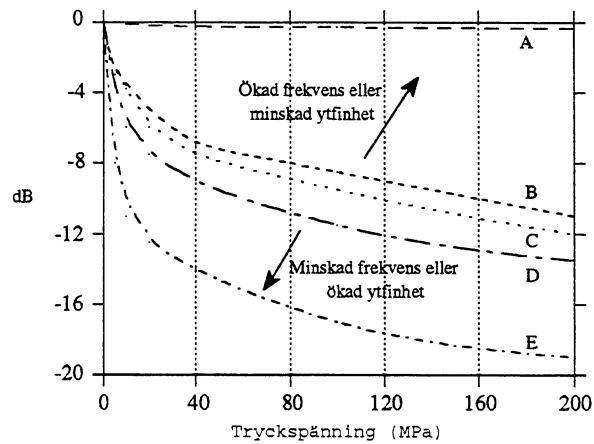
Figur 13. Transmitterat ljud vid olika ytfinheter och olika tryckspänningar enligt T. Arakawa.

En sammanställning av K Newton [9] ger en generell bild av hur tryckspänning påverkar amplituden vid ultraljudprovning, transversellt ljud och pulsekoteknik, se figur 14.

De olika plottade linjerna i figur 14 representerar följande:

- A: Spricka med ytfinhet [rms] 21 μm , 5 MHz sökare, 60°.
- B: Spricka med ytfinhet [rms] 1.8 μm , 5 Mhz sökare, 70°.
- C: Spricka med ytfinhet [rms] 1.8 μm , 5 Mhz sökare, 60°.
- D: Spricka med ytfinhet [rms] 1.8 μm , 5 Mhz sökare, 45°.
- E: Spricka med ytfinhet [rms] 1.8 μm , 2 Mhz sökare, 60°.

Samtliga kurvor representerar transversellt ljud, puls-eko teknik.



Figur 14. Generell bild över olika parametrars inflytande på signalsvaret från ultraljud vid olika tryckspänningar

Resultatet baserar sig på teoretiska modeller. Dessa visar att variationer av frekvens och ytstruktur kan orsaka kraftig sänkning av amplituden medan t ex ändring av vinkeln vid samma frekvens inte har lika stor inverkan på signalsvaret.

3.1.3 Signalstyrkans beroende av miljön.

För att undersöka inverkan av torra respektive våta sprickor har teoretiska beräkningar av reflektionskoefficienten utförts av Sessler^[7] enligt Raylieghs teori från 1877.

Den bygger på reflektionsintensiteten från en tunn film av ett media (media 2) som befinner sig mellan ett annat media (media 1). I detta fall oljefilm mellan två stålytor. Reflektionskoefficienten (R) följer ekvationen.

$$R = \frac{I_{\text{reflektion}}}{I_{\text{infallande}}} = \frac{\left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2}{\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 + 4 \cdot \cot^2\left(\frac{2\pi t}{\lambda_2}\right)} \quad (1)$$

I: Intensitet

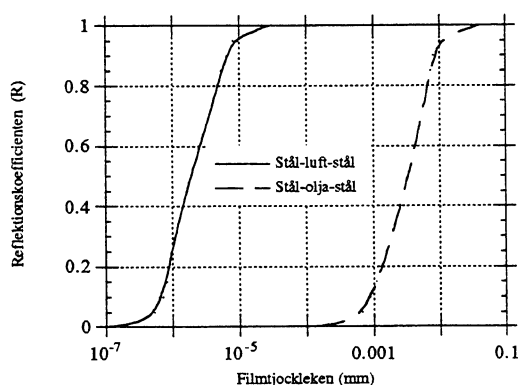
Z_1 : Akustiska impedansen i media 1, stål

Z_2 : Akustiska impedansen i media 2, olja eller luft

t: Tjockleken på filmen

λ_2 : Våglängden för ljudet i media 2

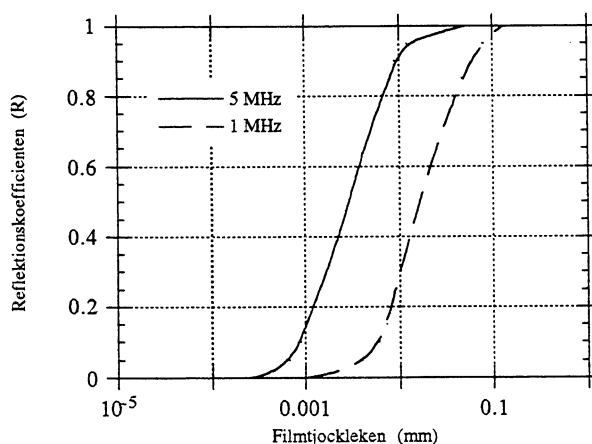
Om man antar att en spricka liknas vid en tunn film kan man beräkna en kritisk storlek på spricköppningen då ljudet reflekteras. I figur 15 visas brytpunkterna för reflekterbar spricköppning för luftfilm och en oljefilm med en 0°-sökare, 5 MHz.



Figur 15. Reflektionskoefficienten som funktion av filmtjockleken enligt ekvation (1).

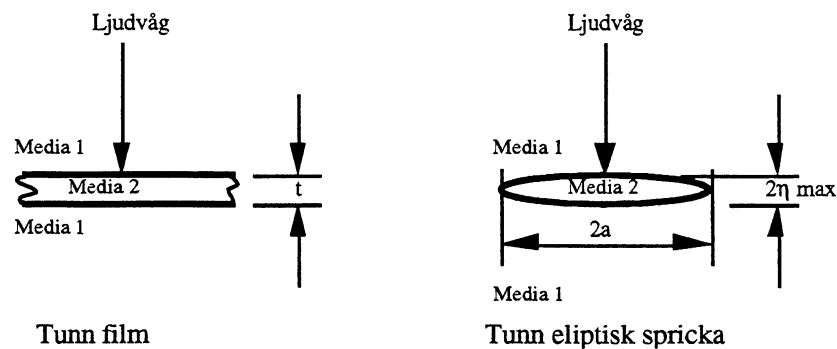
Resultatet visar att det är stor skillnad på en luftfylld och en vätskefylld spricka. Relationen mellan spricköppning och intensiteten av reflektionen beror på skillnaden i akustisk impedans vid sprickans gränssytor samt våglängden för ljudet i det media som finns i sprickan.

Det visar sig bl a i frekvensberoende för reflektionskoefficienten i förhållande till filmtjockleken, se figur 16.



Figur 16. Reflektionskoefficienten som funktion av oljefilmtjockleken för 1 och 5 MHz 0°-sökare.

En tunn film är inte direkt jämförbar med en spricka [7]. Vid analys av en tunn film är gränssytorna parallella med varandra. Hos en spricka varierar spricköppningen utefter sprickans längd, se figur 17.



Figur 17. Schematisk bild av film modell respektive spricka.

3.1.4 Signalstyrkans beroende av defekttyp

Studier av inneslutna defekter i objekt bestående av kolstålsplåt med en dubbel V-fogssvets har utförts på tre olika defekttyper av Denby et al[8], se tabell 4. För defekttyp 1 och 2 var plåttjockleken 70 mm och för defekttyp 3 var tjockleken 60 mm.

Objekten belastades axiellt och vinkelrät mot defekterna för att erhålla en likformig spänningsbild över defektområdet. Belastningen utfördes enligt en bestämd sekvens enligt tabell 3.

1. Tryck från 0 till 50 % av sträckgränsen följt av relaxation.
2. Tryck från 0 till 80 % av sträckgränsen följt av relaxation.
3. Drag från 0 till 40 % av sträckgränsen följt av relaxation.
4. Upprepning av punkt 3
5. Tryck från 0 till 90 % av sträckgränsen följt av relaxation.

Tabell 3. Olika lastcykler

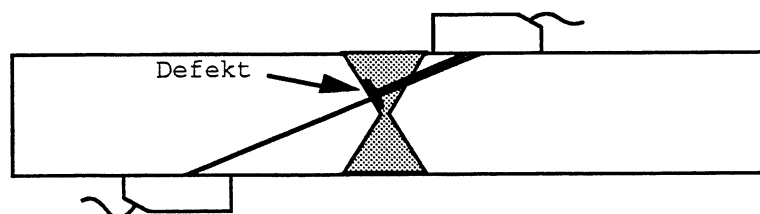
Defekt typ	Djup [mm] 1]	Höjd [mm] 2]	Max separation sprickytor mm
1.Bindfel	13.0	10.5	0.58
2.Stelnings spricka	25	6	0.50
3.Återvärm- ningssprickor under plätering	A	*	1.36
	B	*	1.22
	C	*	*
	D	*	0.94

Anm: 1) Minsta djup mätt ifrån överytan.
 2) Största höjd mätt i tjockleksriktningen
 * Data ej tillgängligt

Tabell 4. Data för defekter i experiment med inneslutna defekter.

Sökaren som används för detektering av defektyperna 1 och 2 var en 65° sökare, transversellt ljud både med pulsekoteknik och med transmissionsteknik, se figur 18.

För detektering av återvärmningssprickor under plätering enligt defekttyp 3, användes tvåkristallsökare 70°, longitudinellt ljud, puls-eko teknik med en frekvens av 2 MHz.



Figur 18. Sökararrangemang för transmissionsprovning av innesluten defekt.

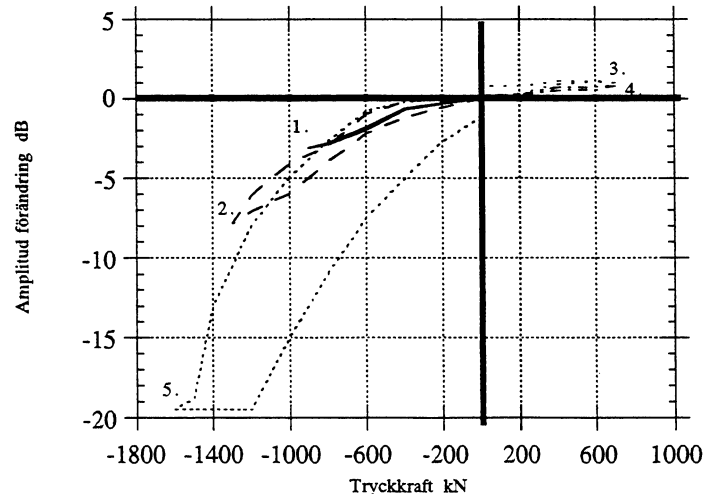
Slutsatsen av experimenten [8] visar klart att amplitudminskningen för puls-eko teknik är försumbar för inneslutna defekter av typ 1 och 2 även vid en tryckspänning på upp till 90 % av sträckgränsen. Som mest uppgår amplitudminskningen till ca 1 dB. Det beror på att separationen mellan sprickyterna är stor och att kontakt inte ens uppnås vid full tryckspänning.

Om man mäter transmitterat ljud enligt figur 18 erhålls däremot en amplitudökning på ca 7 dB vid en tryckspänning på 90% av sträckgränsen för defekttyp 1, dvs mera ljud transmitteras genom spricköppningen.

Resultatet från återvärmningssprickorna visar däremot samma tendens som för andra sprickor. Vid kraftiga tryckspänningar blir reduktionen av signalsvaret tydligt, se figur 19.

Numreringarna i figur 19 avser de olika lastcyklerna 1-5 som experimentet utfördes med enligt tabell 3.

Vid en tryckkraft som motsvarar 90% av sträckgränsen, 5 i figur 19, sjunker signalen med ca 20 dB, dvs den är endast 10 % av referensnivån.

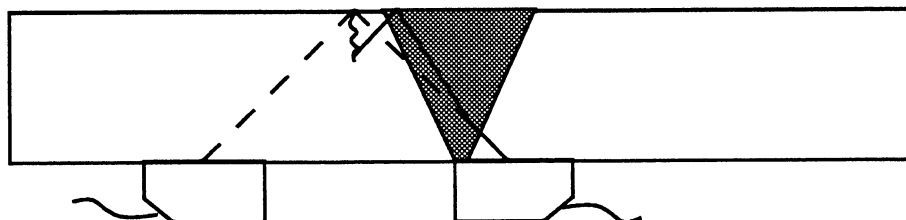


Figur 19. Amplitudförändring vid avsökning av återvärmningssprickor vid olika laster.

3.1.5 Speciella effekter i svetsar

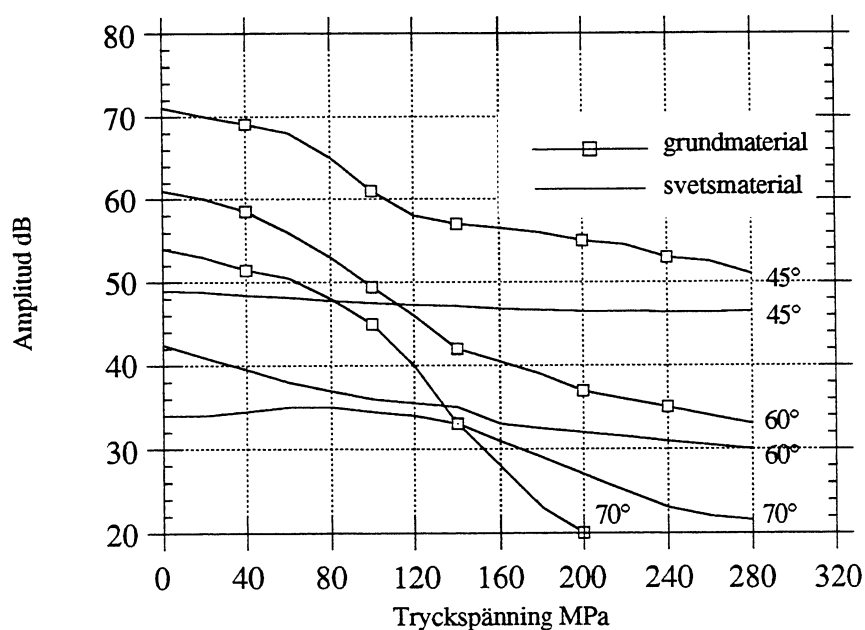
Figur 20 visar hur den faktiska ljudvägen, heldragen linje, och den teoretiska ljudvägen, streckad linje, genom en svets kan skilja p g a brytningsfenomen vid passage genom olika materialstrukturer. Figuren visar olika avsökningsriktningar för en spricka i HAZ vid en V-fog.

Skillnaden i ljudvägsriktningar beror på olika ljudhastighet i grundmaterial respektive svetsmaterial och på grund av denna ljudhastighetsskillnad bryts ljudvågen i övergången mellan dessa material.



Figur 20. Ljudvägsriktningar genom svetsfog och grundmaterial.

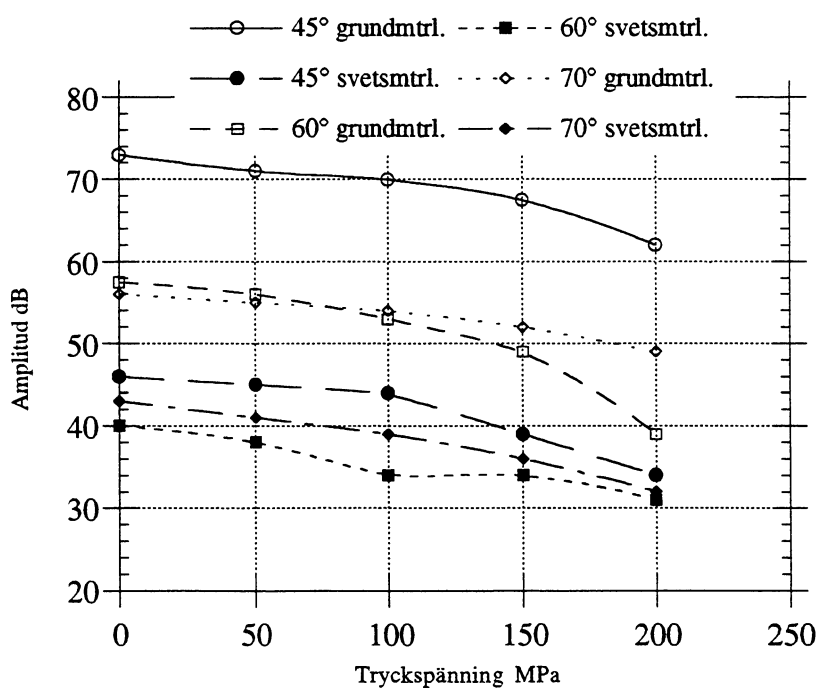
Vid experiment mot V-fog och en 6 mm djup spricka placerad i HAZ ger 45° sökaren bästa signalsvaret medan 70° sökaren påverkas mest av tryckspänningarna, se figur 21. Detta försök enligt Kapranos et al. [4] visar också att 60° är den vinkel som uppvisar minst avböjningseffekter. Undersökningen utfördes från motstående spricksida vilket medför att 45°-brytningsvinkel ger bäst resultat pga hörneffekten.



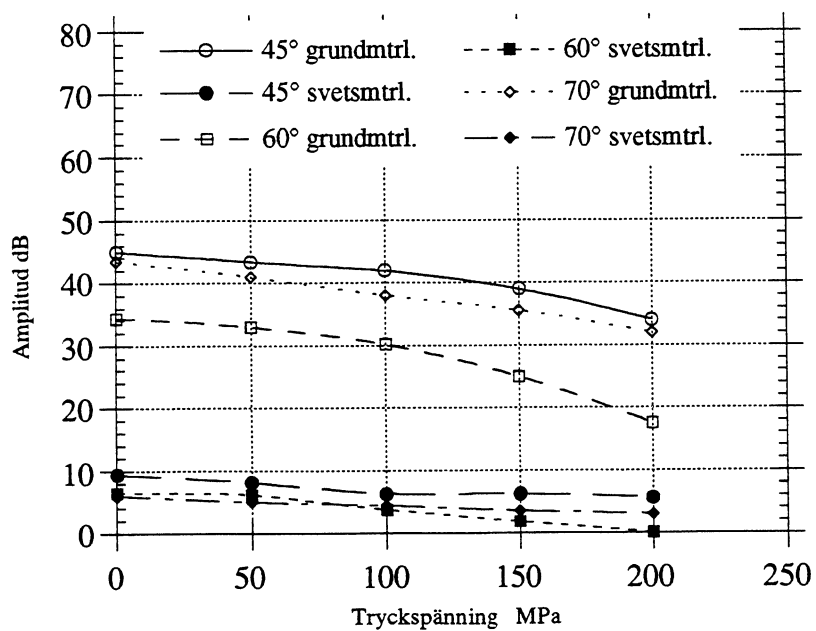
Figur 21. Amplitudsvar för 2 MHz transversalvågssökare med olika sökarevinklar. 6 mm djup utmattningsspricka.

Experiment har även utförts för att undersöka frekvensens inverkan på amplituden i samband med sprickslutning i grundmaterial respektive svetsmaterial. S.I. Ibrahim et al [3] har jämfört amplitudsvaret från 2 och 5 MHz sökare, transversellt ljud vid brytningsvinklarna 45°, 60° och 70°.

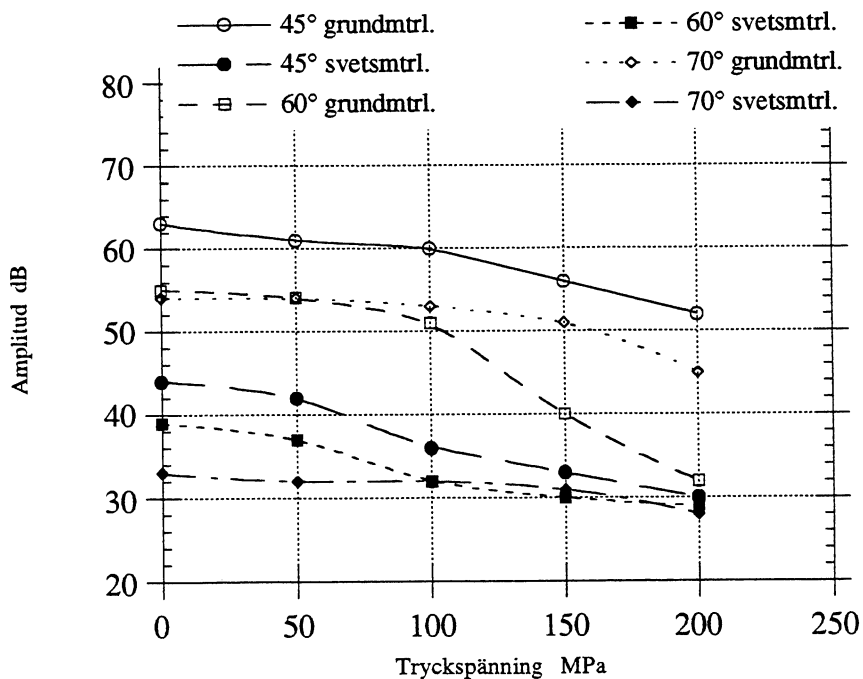
Vid försöken [3] har en 4 och en 8 mm djup utmattningsspricka i HAZ hos en rostfri svets, X-fog, provats i två avsökningsriktningar med puls-eko teknik från motstående spricksida, dels genom grundmaterial och svetsmaterial och dels genom endast grundmaterial, se figurena 22 till 25.



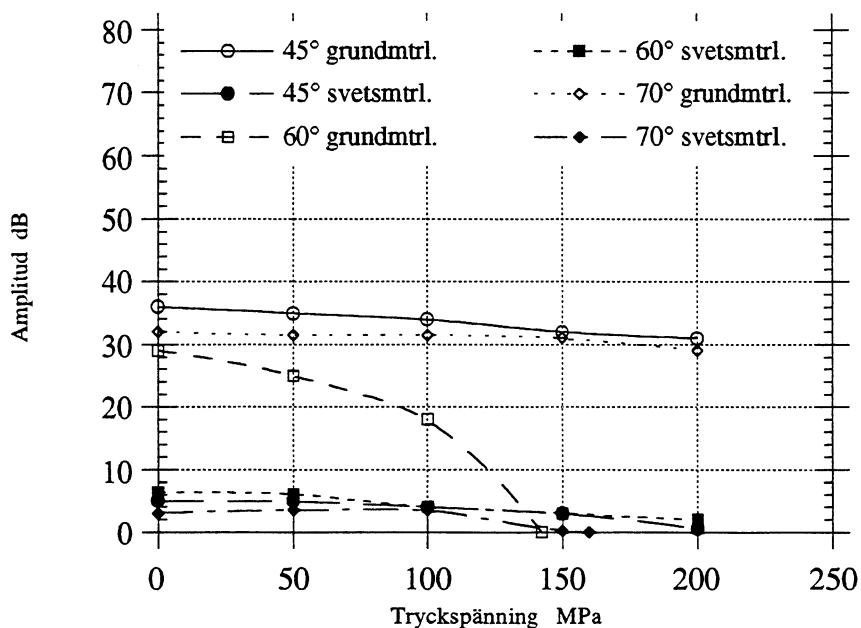
Figur 22. Amplitudsvaret för 2 MHz sökare vid olika sökarvinklar. 8 mm djup utmattningsspricka.



Figur 23. Amplitudsvaret för 5 MHz sökare vid olika sökarvinklar. 8 mm djup utmattningsspricka.



Figur 24. Amplitudsvaret för 2 MHz sökare vid olika sökarvinklar. 4 mm djup utmattningsspricka.



Figur 25. Amplitudsvaret för 5 MHz sökare vid olika sökarvinklar.
4 mm djup utmattningsspricka.

Resultat från experimenten ^[3] i rostfritt material visar att högre frekvenser påverkas betydligt mera av tryckspänningar än lägre frekvenser. Det gäller generellt oavsett avsökningsvinklar men speciellt vid avsökning genom svetsgods. Det visar sig också att speciellt 60° sökarna påverkas negativt av tryckspänningar. Bäst resultat ger 45° sökaren, 2 MHz.

En anledning till att 5 MHz sökarna ger så lågt signalsvar vid avsökning genom svetsgods ^[3] kan bero på att korngränsspridning är kraftigt beroende av förhållandet mellan kornstorleken (korndiametern D) och våglängden (λ). Dämpningen (a) beror på olika korngränsspridningar enligt följande:

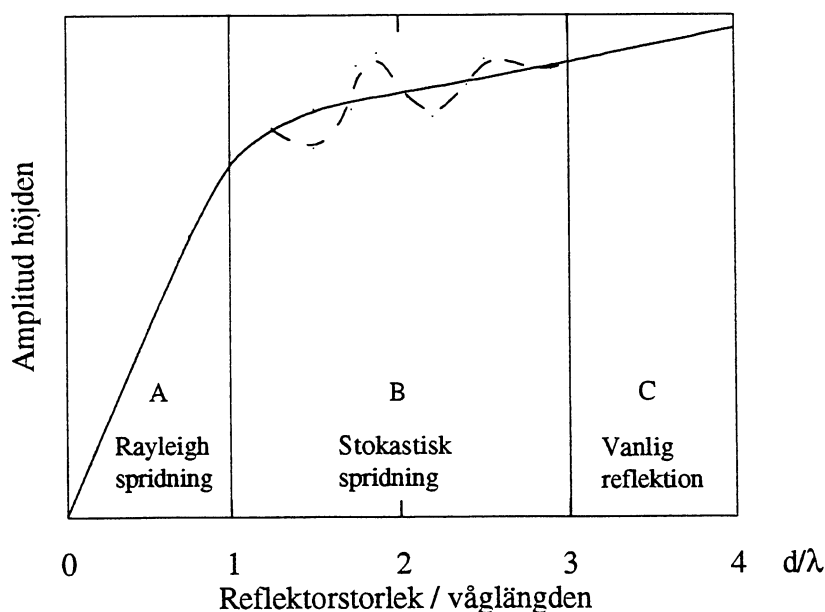
$$\text{Rayleigh spridning när } \lambda \gg D : a = k_1 f^4 D^3$$

$$\text{Stokastisk spridning när } \lambda \approx D : a = k_2 f^2 D$$

$$\text{Diffus spridning när } \lambda < D : a = k_3 D^{-1}$$

där f är frekvensen och k_1 , k_2 och k_3 är konstanter beroende av den elastiska anisotropin för kristaller i svetsen.

Om Rayleigh spridning och Stokastisk spridning, enligt figur 26, råder gynnas provning med lägre frekvens.



Figur 26. Principen för sammanhanget felstorlek (d) och våglängd (λ).

För att visa förhållandet mellan reflektorer och våglängd gäller följande resultat. Kurvan går genom tre områden som är markerade med lodräta streck. Det första området A gäller för reflektorstorlekar/våglängd förhållandet $0 \leq d/\lambda \leq 1$. I detta område uppstår spridning av ljudpulsen (Rayleigh - spridning) och man ser att amplituden ökar fort med ökande reflektorstorlek. I detta område är amplituden i stor del oberoende av formen på själva reflektorn.

I området B, med förhållandet $1 < d/\lambda < 3$, kommer den spridda reflektionen, (Stokastisk spridning), gradvis att förändras till ren reflektion. Sammanhanget mellan amplitud och reflektorstorlek i detta område är starkt beroende av reflektorns ytbeskaffenhet samt formen på reflektorn.

I område C, med förhållandet $d/\lambda \geq 3$, har vi normal reflektion.

Som tumregel bör reflektorn vara större än halva våglängden för att inte signalen skall försvinna i bruset.

3.1.6 Effekt av värmebehandling

Undersökningar av sprickslutningseffekter vid olika värmebehandlingstillstånd har utförts av Ibrahim et al [2].

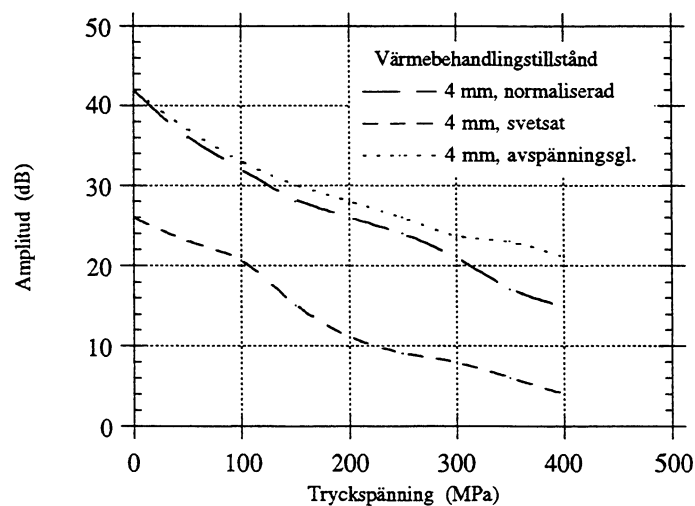
Resultatet presenteras för utmattningssprickor i obehandlad avspänningsglödgd och normaliserad svets. Sprickorna har samma djup och de har vuxit under samma förhållande i alla tre fallen.

1. Ej värmebehandlat efter svetsning.
2. Avspänningsglödgd i 600°, 1 timme.
3. Normaliserat i 950°, 1 timme.

Provingen har utförts med brytningsvinklarna 45°, 60° och 70° transversellt ljud, samt med frekvenserna 2 och 5 MHz.

Defekterna utgjordes av utmattningssprickor med djupen 2, 4 och 6 mm.

Försöken visar att sprickor i de värmebehandlade svetsarna ger bättre signalsvar, se figur 27. Effekten av externt pålagda tryckspänningar är dock densamma oberoende av värmebehandling. Bäst resultat ger 45°, 5 MHz sökaren.



Figur 27. Amplituden som funktion av tryckspänningen för 45°, 5 MHz sökare vid testobjekt med olika värmebehandling. Sprickdjup är 4 mm.

3.2 Storleksbestämning

Djupbestämning av defekter genom att med ultraljud mäta den diffrakterade signalen från sprickspetsen då den påverkas av tryckspänningar har utförts dels experimentellt och dels genom teoretiska beräkningar.

3.2.1 Teoretiska modeller

För att kunna förutse ultraljudets utbredning i olika komponenter har olika matematiska modeller för ultraljudprovning tagits fram. Boström et al.^[18] har vidareutvecklat Nuclear Electrics (tidigare CEGB) modeller för ultraljudprovning framför allt med avseende på sprickor som hålls mer eller mindre slutna av ett yttre tryck.

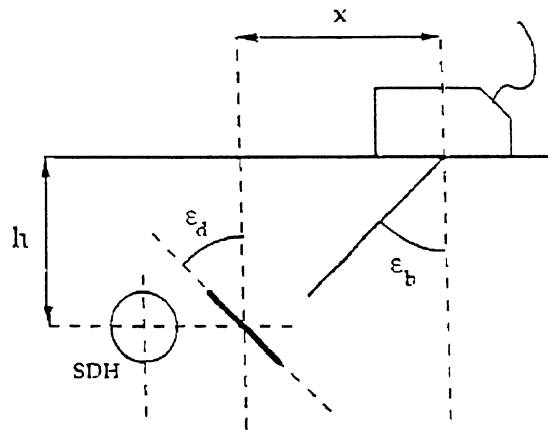
Man har använt sig av en approximativ högfrequensmetod som också tar hänsyn till den diffraktion som sker vid sprickkanterna - geometrisk diffraktionsteori (GTD, Geometrical Theory of Diffraction). Sprickor modelleras som plan och slät och kan vara öppen eller vätskefylld, cirkulär eller elliptisk. Ytbrytande sprickor kan inte modelleras.

Sökarna är av av enkristalltyp, icke fokuserande puls-eko, transversellt alternativt longitudinellt ljud.

Programmet har vidareutvecklats av Boström et al.^[18] till att också omfatta sprickor som är slutna på grund av ett yttre tryck.

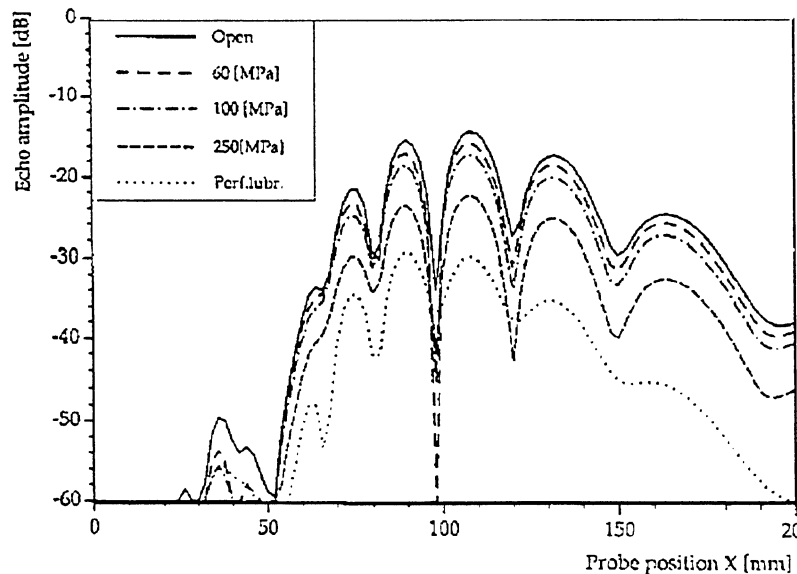
Resultatjämförelser har också gjorts mellan beräkningar utförda med detta data-program och beräkningar utförda med nollställmetoden. Detta är en exakt integralmetod som kan användas vid inte alltför höga frekvenser. För en detaljerad beskrivning av de teoretiska modellerna som ligger till grund för ovan nämnda program, se Boströms et al.^[18].

De olika beräkningar som har gjorts utgår ifrån geometrin i figur 28. Försökens betoning ligger i att jämföra öppen, vätskefylld spricka med en spricka under varierande tryck.



Figur 28. Definition av sprickgeometri samt sökarplacering.

Som exempel på de resultat som kan erhållas, visas i figurerna 29 och 30 signalsvaret från en lång inre spricka med höjden 10 mm på djup 60 mm under ytan samt vinkelrät mot svepriktningen. Sprickans lutning (ϵ_d) kan varieras.



Figur 29. Ekoamplituden för en otilltad spricka, dvs $\epsilon_d=0$, med 60° longitudinellt ljud.

Figur 29 visar ekoamplituden som funktion av sökarposition i förhållande till sprickan vid olika tryckspänningar samt vid våt spricka för en 60° , 4 MHz longitudinalvågssökare.

I dessa fall är sprickan rak dvs $\epsilon_d = 0^\circ$. Resultatet visar att signalens utseende för en spricka under tryckspänning är likformigt med signalen från en öppen spricka.

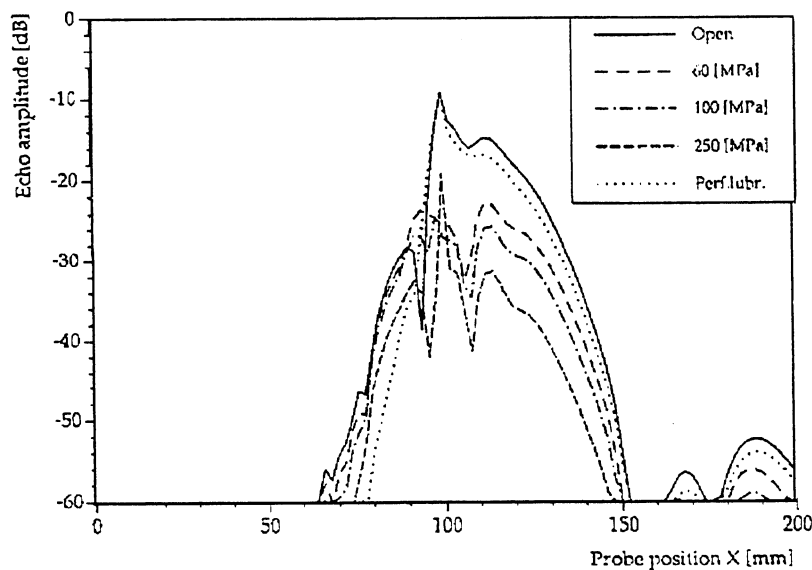
Amplituden har dock sjunkit något men inte mera än ca 2 dB för en spricka under 60 MPa tryckspänning.

Den vätskefyllda sprickan ger dock ett mycket lägre signalsvar än en öppen spricka vid samma tryckspänning. Från ca 10 dB lägre för 45° brytningsvinkel till ca 20 dB för 70° brytningsvinkel.

Detta förklaras med att en vätskefylld spricka låter en longitudinell våg propagera igenom vätskan. Den uppträder alltså i visst avseende som om det inte var någon spricka alls.

Figur 30 visar motsvarande fenomen men för en 60°, 4 MHz transversellt ljud. Här kan man se att en vätskefylld spricka i princip ger samma signalsvar som en öppen spricka.

För 45°-sökaren erhålls inget signalsvar från den vätskefyllda sprickan i intervallet $x = 50-80$ mm. Detta beror på att diffraktionskoefficienten för en vätskefylld spricka är mycket liten för dessa diffraktionsvinklar.



Figur 30. Ekoamplituden för en otilltd spricka, dvs $\epsilon_d=0$, med 60° transversellt ljud.

Resultatet av effekten då en spricka lutar ($\epsilon_d=15^\circ$ och -15°) visar att en lutning mot positivt ϵ_d ger högre signalsvar, vilket är naturligt då infallsvinkeln närmar sig sprickans normal. Vid ökad lutning ökar också bredden på signalen.

Även bredden på varje individuell peak-signal ökar med ökad brytningsvinkel.

Resultaten ovan visar att för diffraktion av longitudinellt ljud är skillnaden liten mellan en öppen spricka och en spricka utsatt för tryckspänning. För diffrakterat transversellt ljud är skillnaden större.

3.2.2 Experimentella försök

Då signalen från en sprickspets redan utan någon påverkan av tryckspänning ofta är svag kan det finnas risk för att signalen försvinner i bruset då sprickan påverkas av tryckspänningar. Experiment utförda av Wooldridge et al.^[5] visar att detta kan ske redan vid ca 40 MPa tryckspänning.

Wooldridge et al.^[5] hävdar att storleksbestämning med hjälp av sprickspetsenko bara kan anses relevanta i de fall där man med säkerhet vet att sprickspetsen befinner sig i spänningslöst tillstånd eller under dragspänning.

På Harwell har experiment utförts med 10 MHz longitudinalvågssökare och med 5 MHz transversalvågssökare. Transversalvågen var av typ horisontellt polariserat ljud där reflektion erhålls utan vågomvandling, precis som med longitudinellt ljud.

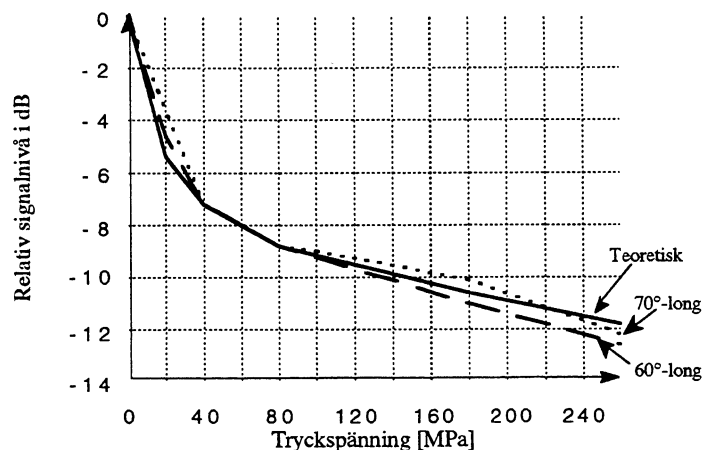
Syftet med experimenten var att studera hur pålagd spänning på sprickytan påverkar diffrakterad signal från sprickspetsen.

Experimenten visar att det sker en reduktion i signalstyrka, men att signalen aldrig försvinner helt.

Två konfigurationer testades experimentellt, dels med sökarna placerade på spricksidan och dels med sökarna på motstående spricksida.

Mätningarna utfördes vid maximal diffrakterad signal och resultaten rapporterades för ökande tryckspänning och visar att den diffrakterade signalen från sprickspetsen minskar vid ökande tryckspänning.

I figur 31 har experimentella försök enligt Whapham^[6] ritats in tillsammans med resultat från Temples teoretiska modeller för reflektionskoefficienten med en 6 MHz longitudinalvåg och en spricka med 1,5 μm ytfinhet samt med infallande vinklar mot sprickplanet på 20° och 30°. Jämförelserna ger bra överensstämmelse.



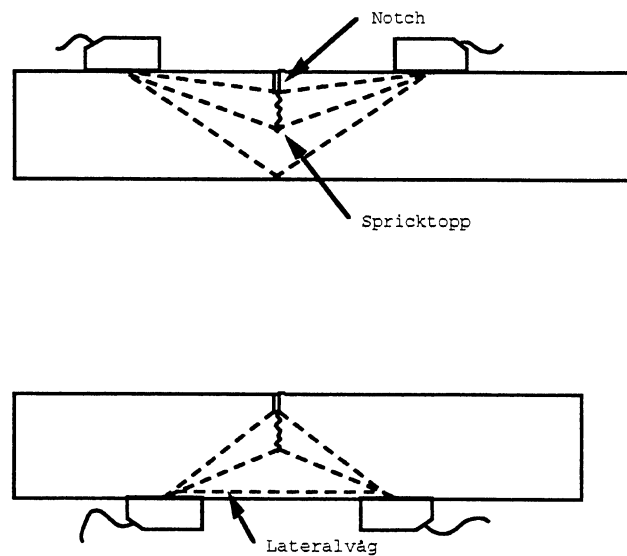
Figur 31. Jämförelse mellan resultat från Temples teoretiska modeller och experiment utförda av Whapham et al.^[6].

Resultaten visar att diffrakterad signal från en utmattningsspricka varierar med tryckspänningen. En maximal minskning av den diffrakterade signalen på omkring 13 dB erhöles för en pålagd spänning på sprickytorna på omkring 2/3 av materialets sträckgränsvärde.

Temple gör också en jämförelse med provning av en PWR-tank vid avställning och konstaterar att spänningarna i dessa inte uppgår till samma storleksvärde som i studien.

Tryckspänningen i PWR-tanken är ungefär 1/4 av det maximala värdet vid experimenten, vilket innebär att signalstyrkan vid diffraktion minskar med ca 8 dB.

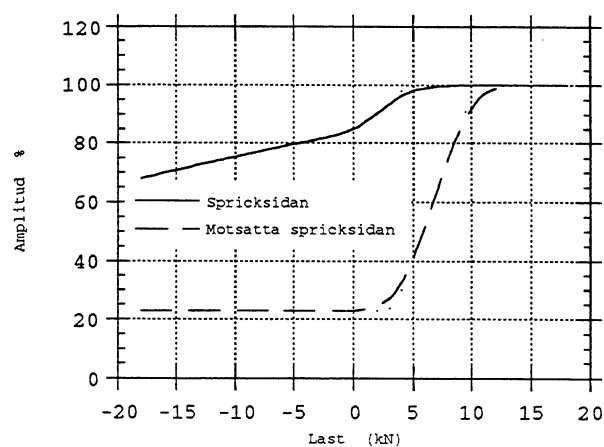
Idag sker, där så är möjligt, djupbestämning av defekter med hjälp av ultraljud och diffraktionsteknik, t ex TOFD (Time Of Flight Diffraction), enligt figur 32.



Figur 32. Experimentuppställning vid TOFDundersökningar från spricksida respektive motstående sida.

Undersökning av tryckspänningens inverkan på ultraljudssignalen vid TOFD har också studerats av A.D. Whapham et. al.^[6].

Figur 33 visar resultatet från dessa undersökningar med TOFD på en 12,4 mm djup spricka vid experiment med longitudinellt ljud, 5 MHz och 70° sökare från spricksida samt med longitudinellt ljud 5 MHz och 45° sökare från motstående sida.

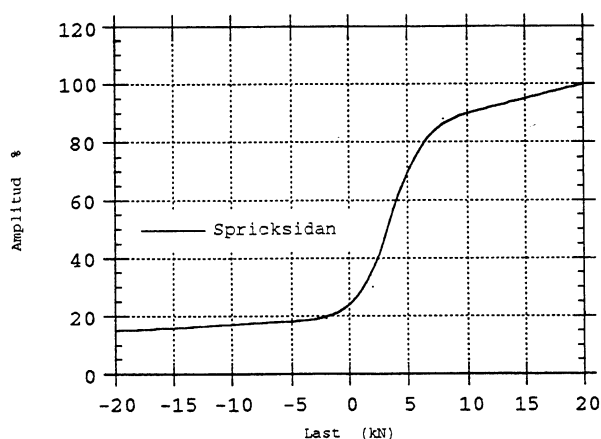


Figur 33. Signalen från sprickspets för longitudinellt ljud vid olika laster.

Resultatet visar att signalen vid avsökning från spricksidan fortfarande vid relativt stora tryckkrafter har kvar mycket av sin energi. Även om signalen sjunker i amplitud vid ökad tryckkraft når amplituden aldrig noll.

Amplituden vid avsökning från motstående sida med 45°-sökaren sjunker betydligt mera.

Avsökning med transversellt ljud ger ett svagare signalsvar än med longitudinellt ljud. Figur 34 visar resultaten från en 2,5 MHz, 55° transversalvågssökare vid avsökning från spricksidan.



Figur 34. Signalen från sprickspets för transversellt ljud vid olika laster.

Experiment som K Newton ^[9] har gjort visar, i likhet med A.D. Whapham et al^[6] att TOFD påverkas betydligt mindre av tryckspänningar än puls-eko gör. Vid stora tryckspänningar ökar dock risken att helt missa signalen från sprickspetsen då den försvinner i bruset.

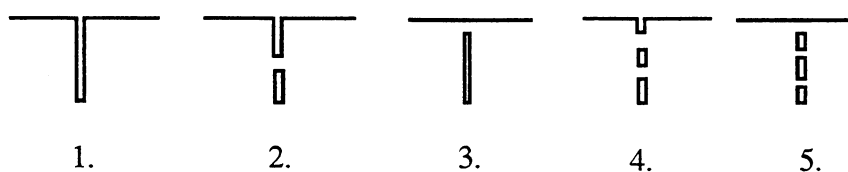
Försök med TOFD på både slutna sprickor och sprickor fyllda med vatten och korrosionsprodukter har gjorts. Inga märkbara skillnader i storleksbestämning fås för dessa två fall.

K Newton ^[9] experiment visar att korrosionsprodukter i sprickor har en mycket liten eller snarast ingen påverkan alls på diffraktionssignalen.

4. VIRVELSTRÖM

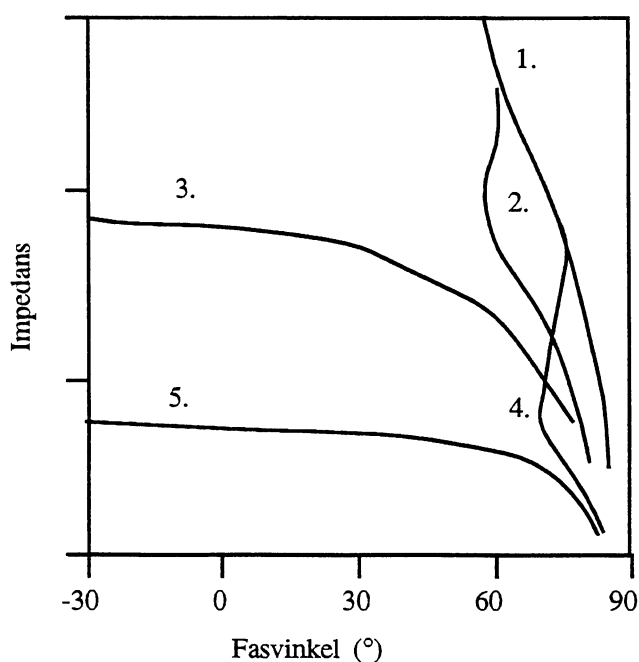
I litteraturen finns färre experimentella och teoretiska arbeten publicerade avseende inverkan av sprickslutning på virvelströmssignaler, i jämförelse med det som finns om ultraljud.

Vissa matematiska beräkningar på olika former av "slutna sprickmodeller", har utförts av N.Nakagawa^[10], se figur 35. Vi utelämnar här den matematiskt teoretiska delen och presenterar endast resultatet.



Figur 35. Olika täta spricktyper för vilka impedanssignaler har beräknats.

Resultatet av dessa beräkningar presenteras i ett fas-impedansdiagram för de olika defekterna, enligt figur 36.



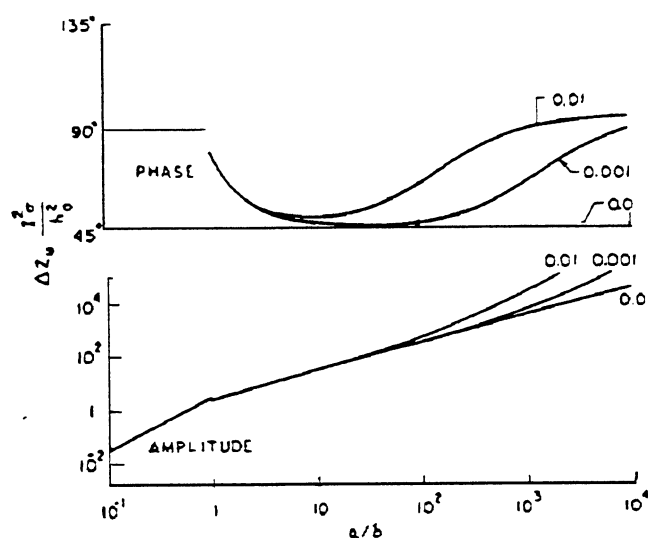
Figur 36. Beräknad impedanssignal för defekterna enligt figur 35.

Enligt detta resultat blir det stora skillnader i signalsvar från olika slutna sprickor. Detta gäller speciellt då sprickan är sluten mot ytan, defekterna 3 och 5, dvs då elektrisk kontakt mellan sprickytorna uppstår, se figur 36.

Som resultatet visar erhålles en fasvinkeländring hos signalen då elektrisk kontakt uppstår över defekten.

I studien av Auld et al.^[19], som är både teoretisk och experimentell, har man bl a studerat fenomenet slutna sprickor i kombination med virvelströmsprovning. Undersökningen är utförd på block i aluminium med både lågfrekvent och högfrekvent virvelström. Den , som man i dessa sammanhang betecknar som lågfrekvent är av standard typ, dvs 50 kHz till 2 MHz, medan den högfrekventa är en ferromagnetisk resonance sond (FMR), även kallat mikrovågsvirvelström. Frekvenserna för FMR ligger på 500 MHz till 2000 MHz. Då denna typ av virvelström är ointressant för normala stålkomponenter, har endast standardtekniken utvärderats.

Både analytiska och experimentella resultat visar att stora a/δ förhållanden är känsligare för sprickslutningseffekter än låga a/δ , där (a) står för sprickdjup och (δ) står för skin-effekt, dvs signalens inträngningsdjup. I ett material med bra ledningsförmåga är skin-effekten liten.



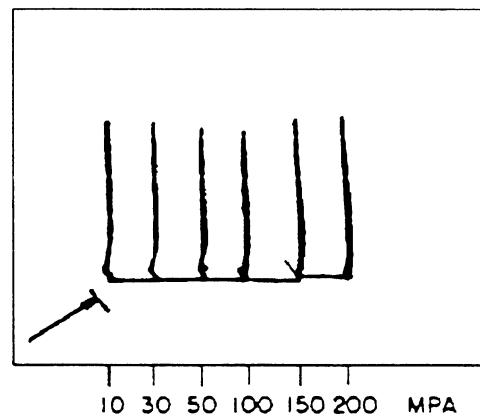
Figur 37. Fasvinkel och amplitud svar som funktion av a/δ .

Figur 37 redovisar amplitud och fasvinkel av impedansförändringar för en virvelströmssignal som funktion av förhållandet a/δ , med spricköppningen COD

som parameter. $COD=0$ svarar mot en sluten spricka. Kurvan för en tät spricka ($COD=0$) har en fasvinkel som är lika med 90° för små a/δ och fasvinkeln ungefär 45° för stora a/δ .

Målsättningen med de experimentella försöken var att göra en kvantitativ jämförelse av impedansförhållandet mot samma defekt med låg- respektive högfrekvent virvelström och det visar sig att för en sluten spricka i aluminium är den lågfrekventa signalen oförändrad.

Figur 38 visar att en lågfrekvent sond mot en utmattningsspricka inte påverkas amplitudmässigt av tryckspänningar. Detta överensstämmer med de teoretiska modeller som redovisas av Auld.



Figur 38. Resultat från provning med en 500 kHz sond mot en utmattningsspricka i aluminium under olika tryckförhållanden över sprickytan. Sprickans djup är 1,8 mm.

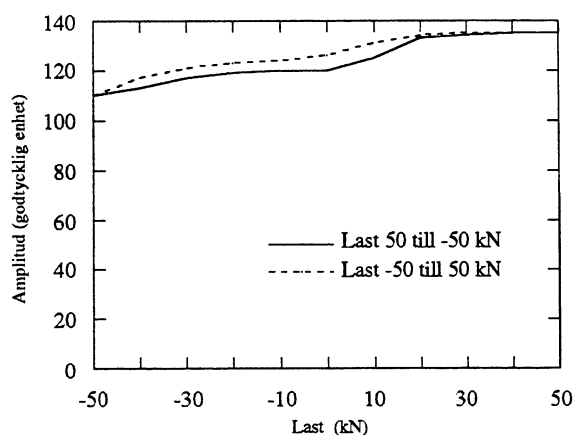
Utförda experiment har visat god överensstämmelse med Nakagawas teorier [10]. Sammanfattningsvis hävdas att för slutna sprickor som inte har elektrisk kontakt påverkas inte signalen nämnvärt. Så fort elektrisk kontakt börjar uppstå förändras signalen.

Experiment med virvelström på torra respektive våta sprickor har undersökts av Newton[9].

Vid stora laster erhålls för torra sprickor en sänkning av signalsvaret med ca 20 %, se figur 39.

För våta sprickor blir variationen mindre eller lika stor, ca 2-25% och slutsatsen blir att virvelströmprovning inte påverkas i någon större omfattning av sprickslutning.

Det troliga är istället att virvelströmsprovning är mera materialberoende, dvs att variationer i materialets permeabilitet och ledningsförmåga har större inverkan på signalen än tryckspänningar över sprickan.

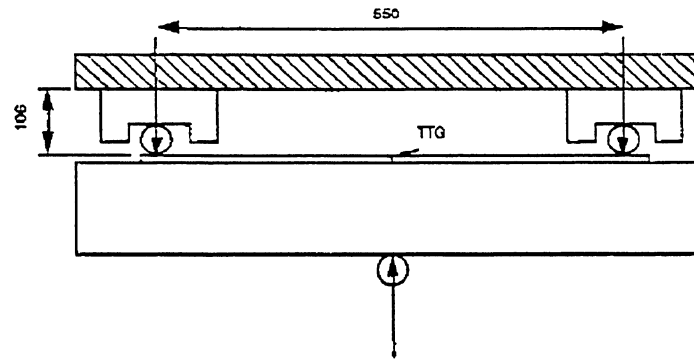


Figur 39. Diagram som visar virvelströmsteknikens påverkan av sprickslutningseffekter för en torr spricka.

Blomberg et al.^[20] har utfört en experimentell undersökning som visar att tryckspänningens påverkan på virvelströmssignalen avgörs av sprickans djup samt av materialegenskaperna.

I denna undersökning har tester utförts med utmattningssprickor i ett Inconel 182 block.

Över sprickan fanns tillväxtinducerade tryckspänningar, som under experimenten relaxerades genom 3-punkts böjning. Mätningar utfördes mot sprickorna vid obelastat tillstånd, vid 4,5 kN samt vid 14,5 kN last, se figur 40.



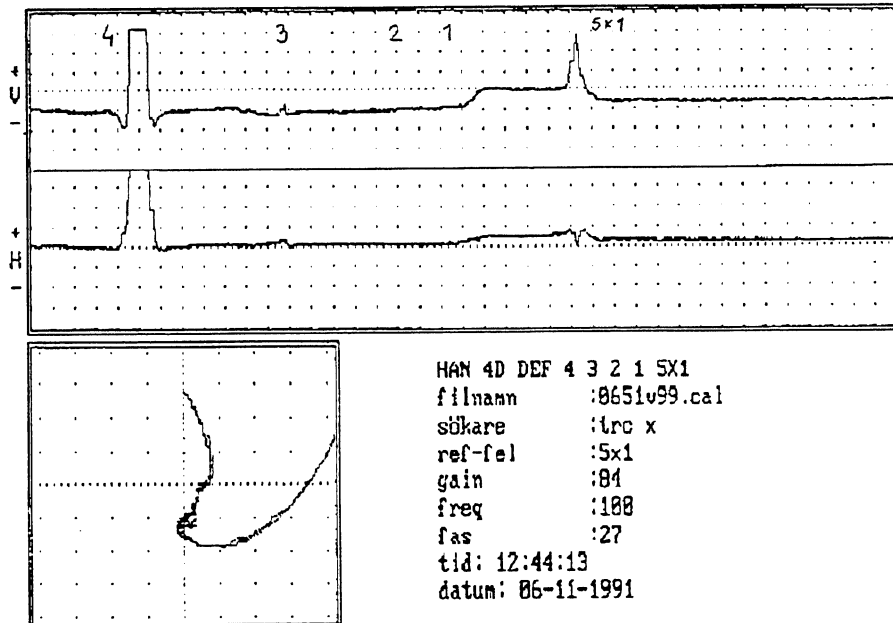
Figur 40. Principskiss för relaxering av spricka.

Resultatet visar att en spricka som var ca 4 mm djup, defekt nr 3 i figurena 41 och 42, inte var detekterbar vid obelastat tillstånd men vid 14,5 kN last detekterades mycket bra.

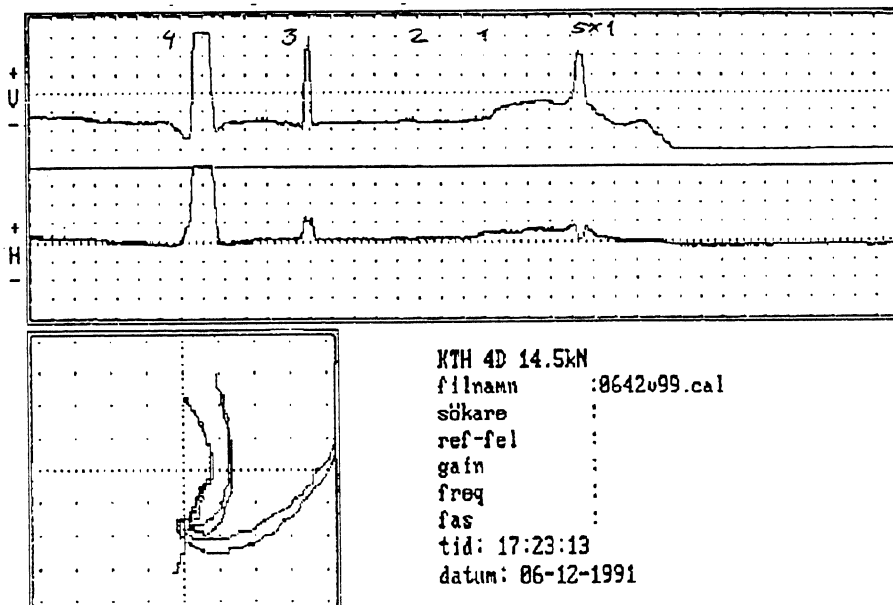
En spricka som var 0,5 mm djup, defekt nr 2, detekterades inte alls, vare sig vid tryckspänning över sprickytorna eller efter relaxering.

Sprickan som var ca 10 mm djup, defekt nr 4, detekterades tydligt även då tryckspänningar påverkade sprickan.

Figurena 41 och 42 visar tillståndet vid maximal tryckspänning samt efter relaxering.



Figur 41. Signalbild från sprickorna vid maximal tryckspänning.



Figur 42. Signalbild från sprickorna vid relaxering.

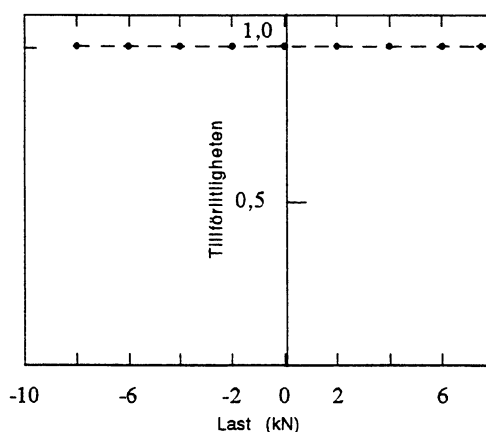
5. MAGNETPULVER OCH PENETRANT

Experiment med magnetpulverprovning har utförts på både torra och våta sprickor av Newton^[9].

Slutsatsen av dessa experiment blir att vid sprickor i icke-korrosiv miljö reduceras indikeringen succesivt med ökad tryckspänning och blir helt osynlig vid höga tryckspänningar. Detta kan förklaras på samma sätt som för virvelströmsprovning. Det bildas elektrisk kontakt mellan sprickytorna och magnetfältet störs i mindre grad.

För en spricka som har tillväxt i saltvattenmiljö och innehållande korrosionsprodukter erhålls en viss variation i detektering, men indikeringen finns kvar under hela tryckspänningsförfarandet.

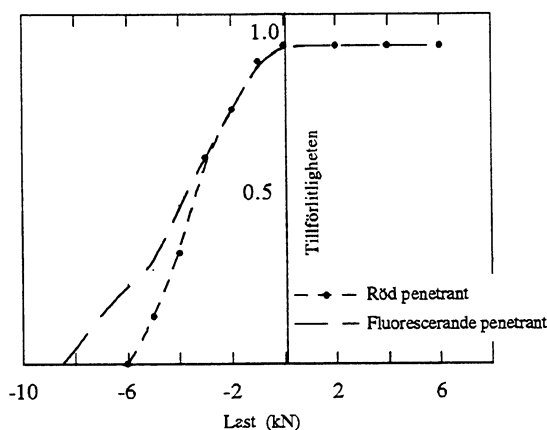
Experiment ^[11,17] där man inte får elektrisk kontakt mellan sprickytorna på grund av oxiderade produkter har utförts på ett antal utmattningsprickor och visat att även då sprickorna belastas med en tryckspänning på upp till 2/3 av sträckgränsen har det varit möjligt att indikera samtliga sprickor med flourose-rande magnetpulver. Tillförlitligheten vid detektering av dessa defekter under olika laster visas i figur 43.



Figur 43. Diagram som visar magnetpulverteknikens tillförlitlighet för detektering vid sprickslutning av sprickor innehållande korrosionsprodukter.

Samma sprickor har också undersökts med penetrantmetod [9]. Det visar sig då att sprickorna måste vara öppna, dvs ej påverkade av tryckspänningar, för att det skall gå att detektera dessa.

Motsvarande tillförlitlighetskurva för penetrantprovning som för magnetpulverprovning kan ses i figur 44.



Figur 44. Diagram som visar penetrantteknikens tillförlitlighet för detektering vid sprickslutning.

Resultatet är logiskt då en av förusättningarna för att penetrantprovning skall fungera är att sprickorna är ytbrytande samt att kapillärkrafter råder dvs att sprickan inte är sluten.

6. SPRICKSLUTNING - SVENSKA KÄRNKRAFTREAKTORER

I den kartläggande studie som behandlar sprickslutning vid avställda anläggningar som Brickstad [12] har utfört ges följande slutsatser:

Sprickslutning, pga kompressiva svetsegenspänningar kan inträffa för omkrets-sprickor på insidan av tjockväggiga rör ($t > 25$ mm) om sprickan är djupare än ca en tredjedel av svetsskarvens godstjocklek.

Exempel på tjockväggiga objekt i BWR-anläggningar är svetskarvar i system 313, huvudcirkulationssystem, vissa svetskarvar i system 312 matarvattenssystem och system 311, huvudångledning.

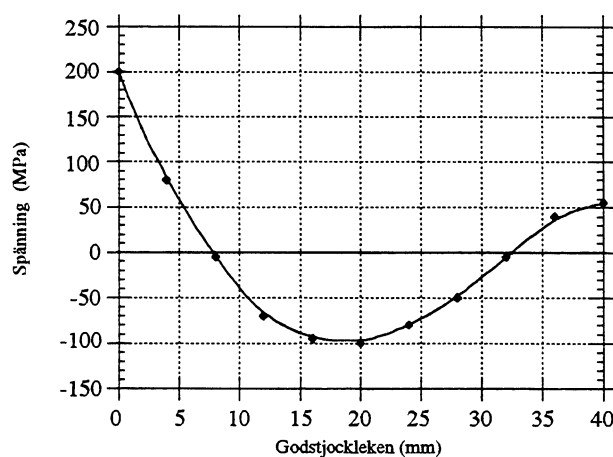
I PWR-anläggningar gäller det framför allt rörskarvarna i huvudlooparna mellan reaktortank, ånggenerator och cirkulationspumpar.

För rundsvetsar i tunnväggiga rör ($t < 25$ mm) är sprickor från utsidan i allmänhet slutna vilket också gäller vid driftsatt reaktor.

I reaktortanken kan det finnas kompressiva egenspanningar i och omkring pläteringskiktet. Detta kan ge upphov till sprickslutning vid avställd reaktor.

Tillväxtbetingad sprickslutning på grund av utmattning kan förekomma i blandningsställen, rörsystem där kallt och varmt vatten blandas, dvs termiska utmattningssprickor. Det gäller också vissa stutsar som utsätts för stora temperaturvariationer.

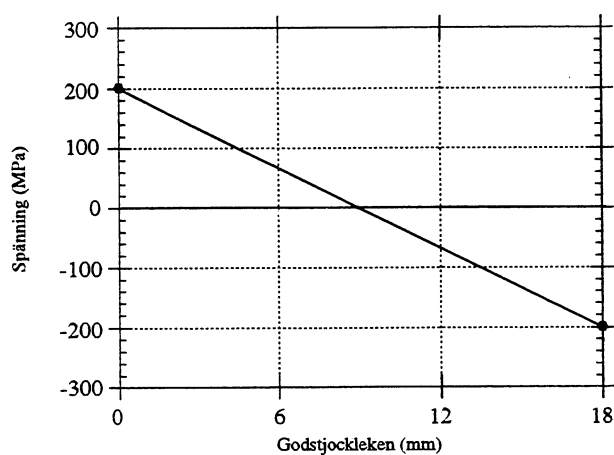
Hur stora kompressiva spänningar kan man då anta uppträder i dessa objekt? För tjockväggiga rör kan enligt Hazelton [13], svetsegenspanningarna axiellt uppgå till som mest ca 100 MPa, se figur 45.



Figur 45. Axiell svetsegenspanning för austenitiska rostfria svetsar i rör [$t > 25$ mm] [13].

I tunnväggiga rör ser fördelningen av axiella svetsegenspänningar annorlunda ut. Fördelningen av axiella svetsegenspänningar i austenitiska rostfria svets skarvar enligt EPRI NP-4690-SR^[14] visas i figur 46.

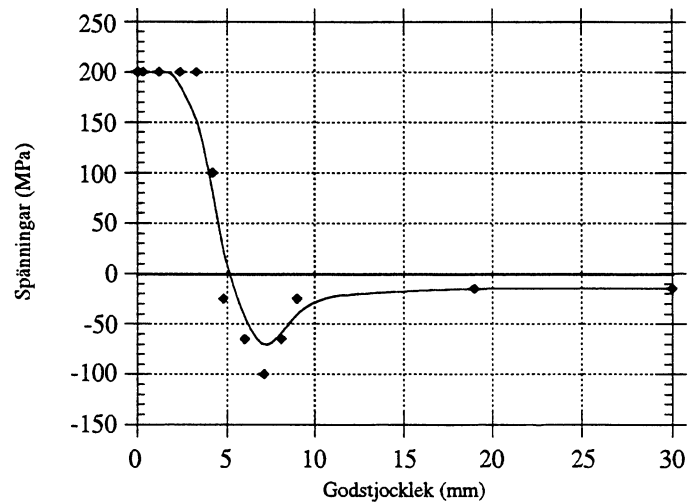
Här uppgår maximal tryckspänning pga svetsegenspänningar till ca 200 MPa på utsidan av röret. Att i detta område kunna detektera en grund utmattninsspricka kan vara omöjligt.



Figur 46. Rekommenderade axiella svetsegenspänningar i svetsens mittlinje för austenitiska rostfria svets skarvar ($t < 25$ mm)^[14].

Dessa två diagram över svetsegenspänningarna gäller för svetsning mellan artlika grundmaterial och svetsgods. För blandsvetsgods, vilket förekommer i kärnkraftsanläggningar, är fördelningen av svetsegenspänningarna sannolikt mera komplexa än för artlika material.

För områden i och omkring plätningen kan tryckspänningarna uppgå till ca 100 MPa några mm in i tankmaterialet, räknat från gränsytan plätning-grundmaterial, se figur 47.



Figur 47. Egenspänningsfördelning i närheten av pläteringsskikt för en svensk PWR-tank. Pläteringsskiktets tjocklek är 5 mm.

Flertalet undersökningar avseende tryckspänningars inverkan på ofp-signaler har utförts på utmattningsprickor. Denna spricktyp påverkas sannolikt i högre grad av tryckspänningar än vad t ex en spänningskorrosionsspricka gör. Sprickor av typ IGSCC har en ytstruktur som gör dessa mindre känsliga för tryckspänningar.

7. SLUTSATS OCH REKOMMENDATION

Generellt har litteraturstudien visat att de ofp-metoder som har undersökts påverkas på olika sätt av sprickslutning.

Det går däremot inte att ge generella kvantitativa värden på effekten av tryckspänningar. Det finns för många parametrar som påverkar resultatet. Varje provning måste bedömas individuellt baserat på aktuella förhållanden.

Driftinducerade spänningskorrosionssprickor är sannolikt lättare att detektera än de utmattningsprickor som oftast ingår i de experimentella försök som här har redovisats.

7.1 Ultraljud

Några slutsatser som kan dras från de undersökningar som är presenterade är följande:

Detekteringsförmågan hos konventionella sökare, 45°, 60° och 70° brytningsvinkel, frekvenser mellan 2 och 5 MHz och både transversellt ljud samt longitudinellt ljud försämras vid ökad tryckspänning. Bästa signalsvaret för detektering, dvs minst påverkan av sprickslutningeffekter visar 45° sökare med låga frekvenser vid provning från motstående spricksida. Amplituden sjunker dock med mer än 50 % vid tryckspänningar uppåt 100 MPa.

Ljudvågor med kortare våglängd är okänsligare för sprickslutningeffekter än vågtyper med stora våglängder.

Ytfinheten på sprickytorna har betydelse för signalsvaret vid detektering.

Undersökningarna visar att grövre ytor reflekterar mera ljud än ytor med små Ra-värden vid samma tryckspänningsnivå. Storleken på reflekterad signal är frekvensberoende, såtillvida att högre frekvenser, kortare våglängder, påverkas mindre av ytfinheten än lägre frekvenser.

En vätskefylld spricka ger ett mycket lägre signalsvar än en öppen spricka vid samma tryckspänning för en longitudinell våg. Detta förklaras med att en vätskefylld spricka låter den longitudinella vågen propagera igenom vätskan. En transversell våg ger i princip samma signalsvar oberoende av om sprickan är vätskefylld eller torr.

Studien visar att amplitudminskningen är försumbar för svetsdefekter av typ bindfel och stelningssprickor. Detta beror på att separationen mellan defektytorerna är större för dessa typer av defekter än för sprickor.

Defektens placering har betydelse såtillvida att provning genom svetsgodset reducerar signalstyrkan. Amplituden sjunker mera för en 60°-brytningsvinkel än för en 45°-brytningsvinkel vid påverkan av tryckspänningar.

En undersökning visar att om ett svetsförband har genomgått någon form av värmebehandling ökar signalsvaret från en utmattningsspricka.

Vid påverkan av yttre tryckspänningar fås dock samma effekt oavsett värmebehandling.

TOFD-tekniken påverkas i mindre grad av tryckspänningar och sprickslutning än vad som gäller för detektering med puls-eko tekniken

Risken finns dock att diffraktionssignalen från en sprickspets helt försvinner i bruset. TOFD tekniken är mera känslig för materialstrukturen, då det är viktigt att signal-brus-förhållandet är stort.

Resultat visar att TOFD-provning från spricksidan inte påverkas i lika stor grad av tryckspänningar som vid provning från motstående sida.

7.2 Virvelström

De undersökningar som studerats i denna rapport visar att virvelströmstekniken är känsligare för materialstrukturen än för tryckspänningar. I t ex aluminium med mycket bra ledningsförmåga och stort inträngningsdjup för virvelströmmar, påverkas signalen genom en fasändring, men inte genom en amplitudminskning vid påverkan av tryckspänningar över sprickplanen.

I Inconel 182 har det visat sig svårt att överhuvud taget detektera små sprickdjup. Den känslighet som erfordras för att detektera en 1,0 mm djup spricka kräver en känslighetsinställning som kan göra provningen svårutvärderad.

Då en ytspricka huvudsakligen är sluten nära ytan, visar det sig att även djupa sprickor i Inconel 182 detekteras väl. Detta har givetvis att göra med virvelströmmarnas inträngningsdjup.

7.3 Magnetpulver och Penetrant

Om tryckspänning existerar över torra, rena sprickor kan detekteringen med magnetpulver påverkas negativt och vid höga tryckspänningar försvinna helt. Sprickor som innehåller korrosionsprodukter mellan sprickplanen är nära 100% detekterbara även vid mycket höga tryckspänningar.

Penetrantvätskor ger mycket dålig detektering av sprickor som är utsatta för tryckspänningar. Tekniken kräver att sprickan är öppen mot ytan.

7.4 Slutsatser om effekten av sprickslutning i svenska kärnkraftanläggningar

I de fall där risken för svetsdefekter kan föreligga är troligen inte sprickslutningsfenomenet något större problem, eftersom svetsdefekter ofta har ett relativt stort gap.

För svetsar i tjockväggiga rör ($t > 25$ mm) finns risk att storleksbestämningen av djupa ytsprickor försvåras av sprickslutning pga tryckegenspänningar.

För svetsar i tunnväggiga rör ($t < 25$ mm) finns risk att ultraljudsprovning av ytterytan inte är tillförlitlig. Här kan tryckspänningar på upp till ca 200 MPa uppträda och i dessa fall har en 70° sökare tappat all känslighet.

Även återvärmningssprickor under plätering kan vara svårprovade. Här kan tryckspänningarna uppgå till ca 100 MPa, vilket medför att signalen från en 70° sökare visar en kraftig amplitudminskning.

För utmattningssprickor som kan uppstå t ex pga termiska transienter eller vibrationer genereras alltid tillväxtinducerade tryckegenspänningar över sprickan som kan uppgå till sträckgränsen. Dessa spänningar kan försvåra både detektering och storleksbestämning.

Ovannämnda förhållanden förutsätter att sprickornas ytstruktur är fin, dvs ett litet Ra-värde på sprickytorna samt att det inte finns korrosionsprodukter mellan sprickytorna. Är sprickorna av typ IGSCC ökar med stor sannolikhet detekteringsförmågan.

REFERENSER

- [1] Kapranos P.A. (1984), "Compression Crack Closure Effect(CCCE)-A Basis for an Ultrasonic NDE Technique" - Materials Evaluation / 42
- [2] Ibrahim S.I, Whittaker V.N, (1981), "The Influence of Crack Topography and Compressive Stresses on the Ultrasonic Detaction of Fatigue Cracks in Submerged Arc Welds" - British Journal of NDT, Sept. 1983 pp. 233-240
- [3] Ibrahim S.I, Kapranos P.A, Whittaker V.N, (1982), "Ultrasonic Inspection of fatigue Cracks in the HAZ of Austenitic Weldments, Useing Shear Wave Probes" - British Journal of NDT vol.24
- [4] Kapranos P.A, Whittaker V.N, (1982), "Ultrasonic Inspection of Fatigue Cracks in Austenitic 316 and 347 Weldments" - British Journal of NDT vol.24
- [5] Wooldridge A.B and Steel G. (1981) "The Influence of Crack Crowth Conditions and Compressive Stress on the Ultrasonic Detection and Sizing of Fatigue Cracks" - CEGB-NW-SSD
- [6] Whapham A.D, Perring S., Rusbridge K.L (1985) "Effects of Stress on the Ultrasonic Response of Fatigue Cracks" - NDT Metallurgy Sec. Harwell lab.
- [7] Sessler J.G (1977) "The effect of stress fields on ultrasonic energy reflected from discontinuities in solids" - Int.Advances in NDT vol.5
- [8] Denby D., Duncumb A.C (1984)"The effects of stress on ultrasonic detectability of defects" - WI Conference paper, London 1984
- [9] Newton K. (1987) "The Transparency of Fatigue Cracks to NDT Methodes used for the Inspection of Offshore Structures" - UKAEA SPE 16576 / 1

- [10] Nakagawa N., Kogan V.G, Bozzolo G. (1988) "Effect of Crack Closure on Eddy Current Signals" - Review of Progress in Quantitative NDE Publication, vol 7A
- [11] "Residual stresses and their influence for detection and sizing of defects" - CEC Report EUR 14101
- [12] Brickstad B. (1991) "Kartläggning av sprickslutningseffekter i svenska kärnkraftanläggningar" - SA/FoU-rapport 91/03.
- [13] Hazelton W.S (1986) "Technical Report on Material Guidelines for BWR Coolant Pressure Boundary Piping" - , NUREG-0313, rev. 2, USNRC
- [14] Norris D.M (1986) "Evaluation of Flaws in Ferritic Piping" - , EPRI Special Report NP-4690-SR
- [15] Arakawa T. (1983) "A study on the Transmission and Reflection of an Ultrasonic Beam at Machined Surface Pressed Against Each Other" - , Material Evaluation /41/ page 714-719.
- [16] Clark R., Dover W.D, Bond L.J (1987) "The effect of crack closure on the reliability of NDT predictions of crack size" - NDT Int. vol 20
- [17] Temple J.A.G (1984) "The Effects of Stress and Crack Morphology on Time-of Flight Diffraction Signals" - , TP 1067 Harwell
- [18] Boström A., Persson G., Wirdelius H. (1991) "Extension and verification of the CEGB model for predicting ultrasonic signals from cracks" - , SKI-projekt 1991.
- [19] Auld B.A, Muennemann F, Winslow D.K (1981) "Eddy Current Probe Response to Open and Closed Surface Flaws" - Journal of NDE, vol 2
- [20] Blomberg G, Long R, Högberg K, (1991) "Forsmark aggregat 3 - Verifiering av ET/UT-teknik för provning av zon 1 i anslutningssvetsar, del 2"

SAMMANSTÄLLNING ÖVER DE ARTIKLAR SOM INGÅR I STUDIE

Referens - Författare	Teknik	Detekt./Storl.	Sökarparam.	Typ av trycksätt./ Tryckspänn.	Defektyp	Studien behandlar siganelens beroende av:	Experim. / Teoretiskt
Ref. [1] - Kapranos, 1984	UT	Detektering	2-4 MHz 45°,60°,70° T+L	3-punkts böjning / 0-150 MPa	Utmattn.spr. 2, 6, 8 mm djupa	Sökarvinkeln	Experimentell
Ref. [2] - Ibrahim, Whittaker, 1983	UT	Detektering	2-5 MHz 45°,60°,70° T	3-punkts böjning / 0-400 MPa	Utmattn.spr. 2, 4, 6 mm djupa	Sökarvinkeln Värmebeh.tillstånd	Experimentell
Ref. [3] - Ibrahim, Kapranos, Whittaker, 1982	UT	Detektering	2-5 MHz 45°,60°,70° T	3-punkts böjning / 0-200 MPa	Utmattn.spr. 4,6,8 mm djupa	Sökarvinkel, Frekvens, Placering	Experimentell
Ref. [4] - Kapranos, Whittaker, 1982	UT	Detektering	2-5 MHz 45°,60°,70° T	3-punkts böjning / 0-280 MPa	Utmattn.spr. 5,6 mm djupa	Defektens placering	Experimentell
Ref. [5] - Woodbridge, Steel, 1980	UT	Detektering	2,25-10 MHz 0°,45°,60° T+L	3-p.b. och axiell ihoppressning / 0-160 MPa	Utmattn.spr. 5,10,15 mm djupa	Sökarvinkel, Frekvens, Morfologi TOFD	Experimentell
Ref. [6] - Whapham, Perring, Rusbridge, 1977	UT	Storleksbestämning	2,5-10 MHz 45°,55°,60°,70°, T+L	3 och 4-p.b. / 0-240 MPa	Utmattn.spr.	TOFD	Teoretisk Experimentell
Ref. [7] - Sessler, 1977	UT	Detektering	2,25-10 MHz Ø	3-p.b./	Utmattn.spr. 12 mm djup	Vät / Torr spricka	Teoretiska modeller
Ref. [8] - Denby, Duncumb, 1984	UT	Detektering	1,5 MHz 45°,65°,70° T	Axiell belastn. Endast last.	Tillverkn.defekter	Defektyp	Experimentell
Ref. [9] - Newton, 1987	UT ET MT / PT	Detektering	2-10 MHz 45°,60°,70° T+L	4-p.b. / 0-200 MPa	Utmattn.spr. 16 mm djup 10-16 mm	Morfologi TOFD Vät / Torr	Teoretiska modeller Experimentell
Ref. [10] - Nakagava, Kogan, Bozzolo,	ET	Detektering	Ingen uppgift	Ingen uppgift	Sprickor generellt	Fasvinkeländring	Teoretiska modeller
Ref. [11] - EUR rep.14101	MT	Detektering	Fluoreserande	Ingen uppgift	Sprickor	Tryckspänningar Korrosionsprod.	Litteraturst.
Ref. [12] - Brickstad, 1991	-	-	-	-	-	-	Teoretisk Brottmekanik

Bilaga 1.

Referens - Författare	Teknik	Detekt./Storl.	Sökarparam.	Typ av trycksätt. / Tryckspänn.	Defekttyp	Studien behandlar siganelens beroende av:	Experim. / Teoretiskt
Ref. [13] - Hazelton, 1986	-	-	-	-	-	-	Teoretisk Brottmekanik
Ref. [14] - Norris, 1986	-	-	-	-	-	-	Teoretisk Brottmekanik
Ref. [15] - Arakawa, 1983	UT	Detektering	2-8 MHz T+L	Ihoppresning av två plåtar / 0-200 MPa	Oändlig yta	Frekvens	Experimentellt
Ref. [16] - Clarc, Dover, Bond, 1987	UT MT PT	Detektering Storleksbest.	5 MHz -	4 p.b./ Endast last	Utmattn.spr.	Storleksbest. / Tryckspänning	Experimentellt
Ref. [17] - Temple, 1984	UT MT	Detektering	5-10 MHz 60°, 70° T+L / 0-380 MPa	3-punkts böjning	Utmattn.spr.	Morfologi TOFD	Teoretisk + jämf. med experiment
Ref. [18] - Boström, Persson, Wirdelius, 1991	UT	Storleksbe- stämming	4-10 MHz 45°, 60°, 70° T+L / 0-250 MPa	Trycksp.gene- rellt	Sprickor	TOFD Vågtyp Frekvens Vinkel Våt / Torr	Teoretisk
Ref. [19] - Auld, Muennemann, Winslow, 1984	ET	Detektering	50kHz-2MhzZ (500- 2000MHz) / 0-200 MPa	Ingen uppgift	Sprickor	Fasvinkeländring	Teoretisk Experimentellt
Ref. [20] - Blomberg, Long, Högberg, 1991	ET	Detektering	100 kHz / Endast last	Relaxering genom 3- punkts böj- ning	Utmattningssp rockor, 0,5- 10 mm djupa	Material Spänningsförhållande Sprickdjup	Experimentellt

www.ski.se

STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION
Swedish Nuclear Power Inspectorate

POST/POSTAL ADDRESS SE-106 58 Stockholm

BESÖK/OFFICE Klarabergsviadukten 90

TELEFON/TELEPHONE +46 (0)8 698 84 00

TELEFAX +46 (0)8 661 90 86

E-POST/E-MAIL ski@ski.se

WEBBPLATS/WEB SITE www.ski.se