



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Daniel Andersson
Daniel Mångård
Jens Gunnars

Forskning

2017:10

Inverkan av ligament på spricköppning
och K-faktor vid IDSCC

SSM perspektiv

Bakgrund

Visuell teknik (VT) är en av de metoder som används för provning av mekaniska anordningar i kärnkraftverk. När det gäller detektering av ytbrytande sprickor så har spricköppningen, dvs bredden på sprickan vid ytan, en avgörande betydelse för metodens känslighet. Spricköppningen beror främst av spricklängd och nivån av restspänningar när anläggningen är avställd, dvs i kallt tillstånd. Vid skador orsakade av s.k. interdendritisk spänningskorrosion (IDSCC) uppstår obrutna ligament tvärs över sprickan som också kan påverka sprickans öppning och spänningstillstånd. Att det förekommer sprickor med ligament har noterats i samband med att sprickor brutits upp och analyserats i laboratorium.

Syfte

Denna utredning syftar till att undersöka vilken effekt dessa ligament har på spricköppningens storlek och spänningsintensitetsfaktor (K-faktor) i nickelbaserat svetsgods av typen Alloy 182.

Resultat

Studien visar att vid den analyserade restspänningsnivån 200 MPa, går det att detektera en halvcirkulär ytspricka utan ligament med längd 15 mm, enligt den generella procedur som tillämpas för visuell kontroll (VT01). Om det finns jämt fördelade, obrutna ligament över hela sprickytan med en ytdensitet på 7,5%, går sprickan däremot inte att detektera. Extrapolation av resultaten indikerar att ytsprickan i det senare fallet behöver ha en längd på omkring 25 mm för att vara detekterbar enligt VT01.

Studien visar också att värdet på spänningsintensitetsfaktorn (K) i den djupa punkten av sprickan är starkt kopplat till värdet på maximal spricköppning. Risken för underskattning av värdet på K-faktorn är liten för andelen obrutna ligament upp till 7,5% av ytan. För en spricka som har obrutna ligament med en ytdensitet på 7,5% och som detekteras med VT är dock verklig spricklängd större jämfört med om ligament saknas. Detta innebär att beräknad tid för spricktillväxt till största acceptabla längd kan överskattas om sprickan innefattar ligament men antas vara ligamentsfri.

Användning av resultat

Resultatet kan användas för att bedöma tillförlitligheten i resultat från provningar av komponenter med sprickor där dessa materialkombinationer förekommer.

Behov av ytterligare forskning

För att bestämma omslag i respons finns behov av att göra analyser med ytdensitet 3 och 15 %. Det skulle också vara intressant att göra analyser med olika restspänningsnivåer, restspänningsfördelningar och relation mellan restspänning och primärspänning för sprickor med och utan ligament.

Projekt information
Kontaktperson SSM: Erik Strindö
Referens: SSM2013-2194



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Daniel Andersson, Daniel Mångård, Jens Gunnars
Inspecta Technology AB, Stockholm

2017:10

Inverkan av ligament på spricköppning och K-faktor vid IDSCC

Datum: Februari 2017

Rapportnummer: 2017:10 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Sammanfattning

Vid provning med visuell teknik (VT) är spricköppningen avgörande för detektering. Spricköppningen beror främst av sprickstorlek och nivån på restspänningar i avställt tillstånd. Vid skademekanismen interdendritisk spänningskorrosion (IDSCC) uppstår obrutna ligament som kan påverka spricköppningen. Denna utredning syftar till att undersöka vilken effekt dessa ligament har på spricköppning och K-faktor i nickelbas svetsmaterial Alloy 182.

Ett fall som representerar en liten halvcirkulär ytspricka i en buttring studeras. Primärspänningen under driftcykeln och svetsegensspänningen antas till 84 respektive 200 MPa. Tre olika ytdensitet (0.8, 7.5, 35%) med två olika fördelningar (hela sprickytan, ett område nära sprickfronten) av obrutna ligament studeras. Resultaten visar följande:

- Betydande plastisk deformation erhålls i de obrutna ligamenten för ytdensitet 0.8% vid fördelning över hela sprickytan och för ytdensitet upp till 7.5% vid fördelning i ett område nära sprickfronten.
- Spricköppningen och K-faktorn ökar till en början med ökande ytdensitet av obrutna ligament för att sedan minska när ytdensiteten fortsätter att öka. Med obrutna ligament över hela sprickytan sker omslaget tidigare.
- Spricköppningens profil påverkas av fördelningen av obrutna ligament över sprickytan. Entydig information om realistiska fördelningar saknas men en inventering antyder att en jämn fördelning av ligament över hela ytsprickan kan vara relevant. Publicerad information indikerar att en ytdensitet på 7.5% kan vara representativ för IDSCC i Alloy 182.
- En halvcirkulär ytspricka utan ligament med en spricklängd 15 mm går att upptäcka enligt VT01 för den analyserade restspänningsnivån. En ytspricka med samma storlek går inte att upptäcka om det finns obrutna ligamenten jämnt fördelade över hela sprickytan med en ytdensitet på 7.5%. Extrapolation av resultaten indikerar att en ytspricka med samma proportioner och en ytdensitet obrutna ligament på 7.5% behöver en spricklängd på omkring 25 mm för att vara detekterbarhet enligt VT01.
- Värdet på K-faktorn vid djupaste punkten och värdet på maximal spricköppning är starkt kopplade. Risken för underskattning av värdet på K-faktorn är liten för andelar obrutna ligament upp till 7.5%. För en VT-detekterad ytspricka är dock verklig spricklängd större om sprickan har en ytdensitet på 7.5% ligament jämfört med om ligament saknas. Detta innebär att beräknad tid för tillväxt till största acceptabla sprickstorlek överskattas om sprickan innehåller ligament men antas vara ligamentfri.

(Inspecta Technology AB, Report No. 5000564, Rev. 0)

Innehåll

1. Inledning	3
1.1 Bakgrund	3
1.2 Syfte.....	4
2. Metodik	5
3. Inventering av information om obrutna ligament vid IDSCC	6
4. FE-modellering	9
5. Analyserade fall	13
6. Resultat	17
6.1 Skillnad mellan verklig spricklängd och detekterbar längd	17
6.2 Effekten av obrutna ligament på COD	19
6.3 Effekten av obrutna ligament på K	24
6.4 Effekten av obrutna ligament på relationen mellan K och COD ..	28
6.5 Analys av ett exempelfall	30
7. Sammanfattning och slutsatser	31
8. Förslag på fortsatt arbete	33
9. Referenser	34

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Provning med visuell teknik (VT) används för kvalificerad återkommande kontroll men även för generella avsyningar av reaktortank och interndelar. I dessa sammanhang används en videokamera med zoomoptik samt manipulator inklusive styrning av belysning. VT har fördelar som att vara relativt enkel att tolka och normalt behövs ingen anpassad manipulator. Provning med kvalificerad visuell teknik enligt proceduren VT01 [1] innebär att den minsta defekt som kan detekteras uppfyller spricköppning $\geq 20 \mu\text{m}$ över en sammanhängande spricklängd av minst 5 mm.

Detekteringsförmågan beror av åtkomst vad gäller både avstånd och betraktningvinkel mot ytan. Ovanstående exempel på detekteringsgräns gäller för avstånd $< 200 \text{ mm}$ och vinkel $< 15^\circ$ från ytnormalen.

Skademekanismen IDSCC (Inter Dendritic Stress Corrosion Cracking) kan uppkomma i svetsgods av nickelbasmaterial som Alloy 182. Vid IDSCC sker spricktillväxten mellan långsträckta dendriter i svetsgodset och karakteristiskt är att det kan finnas kvar större obrutna ligament mellan sprickytorna.

En internationell erfarenhet är att sprickor med COD $< 20 \mu\text{m}$ ofta är svåra att detektera med VT [2], vilket också diskuteras i [3]. Sammanställningen i [4] visar resultat från analyserade tvärsnitt av sprickor som upptäckts med bl.a. ultraljud. Medelvärde för COD vid ytan är större än $20 \mu\text{m}$ för samtliga redovisade skademekanismer (IGSCC, IDSCC, TGSCC, termisk utmattning, mekanisk utmattning, samt stelningssprickor i svetsgods). Det finns dock i [4] inga spricköppningar som är baserade på mätningar för ytsprickor med olika storlek. Det bör noteras att sprickstorlek och restspänningsnivå påverkar spricköppningen.

Det finns fall som visat att vid IDSCC kan spricköppningen variera väsentligt på djupet i materialet och sprickor kan vara nästan slutna vid ytan [4]. Obrutna ligament och förgreningar kan inverka. Utredningen [4] är för IDSCC och COD baserad på mätningar på uttagna båtprov för relativt stora sprickor. Svetsegenspänningarna omfördelas och relaxeras väsentligt när ett båtprov tas ut och denna effekt har tidigare uppskattats genom simuleringar i [5]. Observera dock att sedan dessa analyser utfördes har simuleringssmodeller utvecklats vidare bl.a. avseende materialmodellering för svetssimulering samt möjligheter till 3D analys av relaxeringen.

Den viktigaste parametern för att detektera sprickor vid provning med VT är spricköppningen, även kallad sprickbredden eller COD (Crack Opening Displacement). För att spricköppningen ska bli tillräckligt stor krävs det restspänningar i drag tvärsprickans plan i avställt tillstånd. Restspänningar bidrar även till uppkomst av skador genom

spänningskorrosion och VT kan därigenom fungera bra för att söka efter sådana skador.

Tillståndet vid sprickspetsen karakteriseras ofta av spänningsintensitetsfaktorn K . Obrutna ligament mellan sprickytorna kan ha en effekt också på K och påverkan från ligamenten på COD och K behöver inte stå i proportion till varandra. I en situation med underskattad spricklängd skulle ligamenten samtidigt kunna medföra att K sjunker mer än motsvarande den bedömda spricklängden och situationen skulle då bedömas konservativt. Men situation kan även vara omvänd.

Förståelsen för hur obrutna ligament mellan sprickytorna inverkar på COD, K och relationen mellan COD och K är därför viktig när bedömning av sprickor ska göras utgående från resultat från visuell kontroll.

1.2 Syfte

Syftet med denna utredning är att undersöka obrutna ligaments inverkan på COD, K -faktorn och sambandet mellan COD och K -faktorn vid IDSCC.

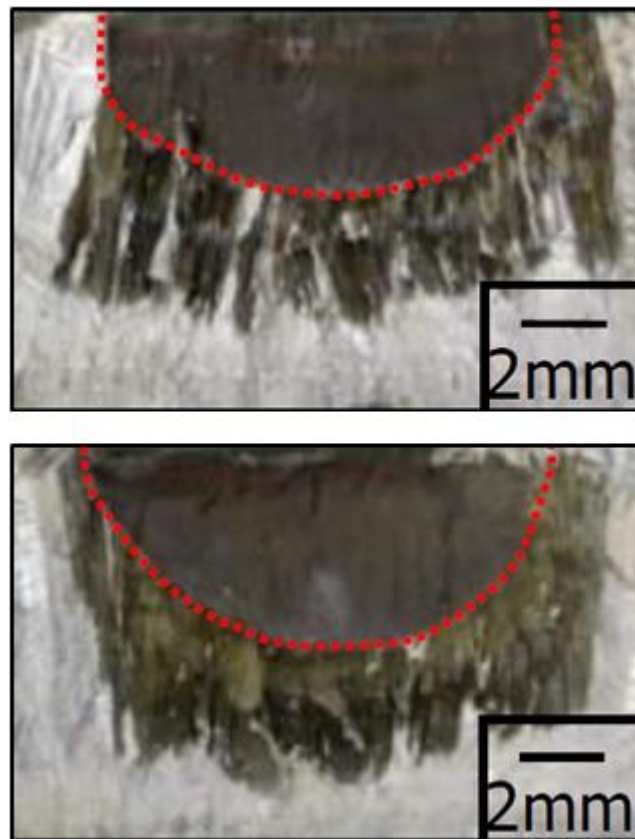
2. Metodik

Undersökningen är uppdelad i följande moment

- a. Inventering av publicerat material och eventuellt tillgängliga prover för att uppskatta en approximativ fördelning, form och storlek för kvarvarande obrutna ligament vid IDSCC-sprickor. Syftet är att få en bedömning av möjligt intervall för parametrar som beskriver ligamentens ytdensitet och fördelning.
- b. Utarbetande av metod för FEM-modellering för att simulera effekten på spricköppningen vid ytan och spänningsintensitetsfaktorn utmed sprickfronten på grund av obrutna ligament inklusive plastiska effekter. En rimligt förenklad modellering tas fram med målet att ge en första uppskattning av effekten.
- c. Beräkningar av spricköppning och spänningsintensitetsfaktorer för utvalda exempelfall, med och utan IDSCC-ligament. Analys av två fall av fördelning av kvarvarande ligament.
- d. Utvärdering av resultat från analys med respektive utan ligament.

3. Inventering av information om obrutna ligament vid IDSCC

En inventering av publicerat material visar att det finns mycket begränsat med information kring fördelning, form och storlek av obrutna ligament vid IDSCC-sprickor. I avsnitt 6.5.2 i [6] finns exempel på tvärsnittsbilder för IDSCC-sprickor. Exempel på uppbrutna sprickytor från IDSCC är sparsamt dokumenterade i litteraturen men finns i [7] där experiment utförts för tillväxt av IDSCC i Alloy 182 från ytsprickor som skapats genom utmattning. Figur 1 visar bilder från [7] och de mörka ytorna är från IDSCC och de ljusa områdena ger en indikation på hur andelen obrutna ligament kan se ut. Notera att dessa IDSCC-sprickor startar sin tillväxt från utmattningsprickor vilket gör att enbart delen utanför den röda markeringen kan antas vara ett exempel på IDSCC.



Figur 1 Två uppbrutna IDSCC ytsprickor i Alloy 182 [7]. De streckade linjerna markerar initiala ytsprickor från utmattning som användes i försöken. De områden som vuxit genom IDSCC ger exempel på kvarstående ligament.

En tidigare undersökning [8] är den enda kända kartläggningen av morfologin för IDSCC-sprickor. Tvärsnittsbilder av sprickorna blir mycket diskontinuerliga vilket leder till svårigheter vid karakterisering av förgreningar och sprickslut. Spricköppningen (eller bredden, avstånd mellan sprickytorna) är för flertalet av de undersökta sprickorna i [8] mindre vid skärningen med ytan än djupare ner. För andra skademekanismer ökar i allmänhet sprickans bredd med ökande avstånd från sprickspetsen.

Det kan antas att obrutna ligament uppstår när sprickfronten når sekundära dendriter orienterade i en tydlig vinkel relativt sprickans tillväxtplan. Sprickfronten delar sig och växer runt dendriten vilket skapar ett obrutet ligament. När kraften som tas upp av de obrutna ligamenten blir tillräckligt stor kan ligamenten förväntas brista duktilt. Obrutna ligament kan representera ett kluster av flera närliggande dendritar som tillsammans överbryggat sprickytorna. Det är därför svårt att relatera en typisk storlek hos ligament till diametern hos dendritar i svetsgodset. I [8] uppskattades dock diametern hos sekundära dendritar till 15-20 μm och ligament som mätts är 5-10 gånger större än diametern hos enskilda sekundära dendriter. Tabell 1 och Tabell 2 innehåller resultat från uppmätningar i olika tvärsnitt, och exempel på tvärsnitt kan ses i Figur 2.

Utvärderingen av data i Tabell 1 och Tabell 2 ger att medeldiameter för obrutna ligament är 155 μm . Tvärsnittsbilderna ger att andelen obrutna ligament utmed sprickans djup är 6.3% (ekvivalent ligamentfraktion), med antagande om homogen fördelning. Dessa siffror har bestämts från slumpvis utvalda tvärsnitt genom några undersökta sprickor, och värdena måste ses som exempel som kan indikera vad realistiska värden för ytdensitet och fördelning kan vara vid IDSCC i Alloy 182. Svårigheten inses genom att studera sprickan längs en linje i sprickans tillväxtriktning i Figur 1. Hur representativt utseendet längs denna linje är för sprickan varierar mycket beroende på var linjen läggs.

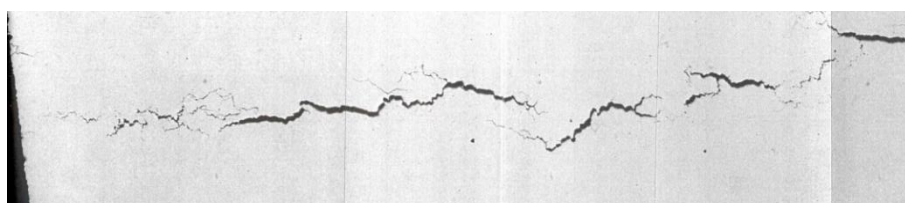
Ligamentytdensiteten 6.3 % är beräknad från data tagna längs snitt. Det finns en osäkerhet i hur linjedensiteten ser ut utmed denna linje. Dessutom råder osäkerhet om hur ytdensiteten ser ut över sprickytan (alltså när övriga riktningar beaktas). Detta exempel får tjäna som en startpunkt för en känslighetsstudie avseende ligamentytdensitet och ligamentfördelning. Figur 1 ovan indikerar att ligamentytdensiteten från ett snitt beror av snittets riktning relativt dendritriktningen.

Tabell 1 Resultat från uppmätning av avstånd mellan obrutna ligament i tvärsnitt [8].

Spricka Nr	Antal ligament	Maximalt avstånd [μm]	Medelavstånd [μm]
R4-A	6	120	100
R4-C	12	400	170
R4-E	8	500	95
R4-F	10	600	250
B1-4	5	300	140
VCS-1	12	400	180
VCS-3	3	200	150

Tabell 2 Resultat för spricklängd mellan obrutna ligament i tvärsnitt [8].

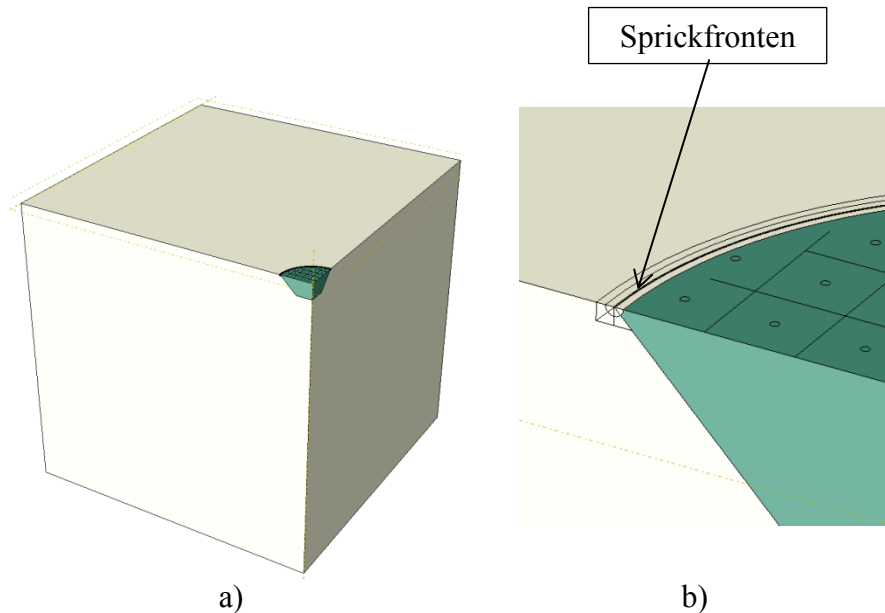
Spricka nr. räknat från ytan	Spricklängd i mm						
	R4-A	R4-C	R4-E	R4-F	B1-4	VCS-1	VCS-3
1	6,6	0,4	1,2	0,5	0,7	7	0,8
2	3,4	1,1	1,0	2,6	2,2	7	2,5
3	0,5	2,5	0,8	0,8	1,0	7	1,4
4	2,4	1,2	0,6	0,8	2,0	3	1,4
5	2,0	1,2	0,6	0,1	1,2	5	
6		1,0	1,1	0,3	0,8	2	
7		2,0	1,3	0,4		15	
8		1,1	1,1	2,2		7	
9		2,5				6	
10		4,0				6	
11		2,0				8	
12		2,2				7	



Figur 2 Exempel på obrutna ligament vid IDSCC spricka. Bilden visar ett tvärsnitt av en tredjedel av sprickan R4-C från [6] i 28x förstoring.

4.FE-modellering

En halvcirkulär ytspricka studeras. Enbart en fjärdedel modelleras p.g.a. symmetri, se Figur 3a. I Figur 3b visas ett förstort område vid sprickfronten där ytsprickans djupaste punkt är markerad. Där kan också de enskilda ligamenten ses i forma av små cirklar.



Figur 3 a) Symmetri innebär att enbart en fjärdedel av strukturen behöver modelleras. Det mörka området är modellerat med elastisk-plastiska materialegenskaper. b) Närbild på sprickfronten vid djupaste punkten. Obrutna ligament framstår som cirklar.

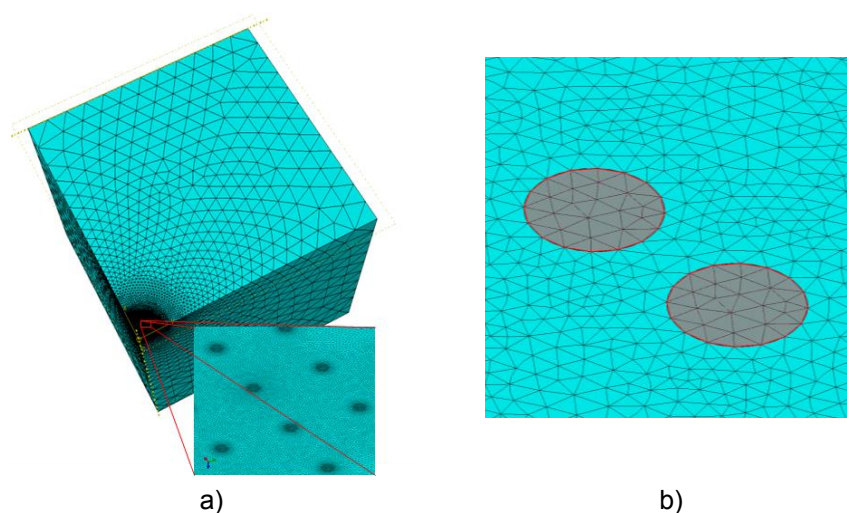
Närvaron av obrutna ligament modelleras genom att cirkulära öar med diametern 200 μm erhåller symmetriandvillkor. På så sätt överbryggas sprickytorna i likhet med obrutna ligament. Modelleringen av dessa obrutna ligament illustreras i Figur 3 och Figur 4. Figur 5 visar deformationen i ligamenten. Positionerna för obrutna ligament genereras jämnt fördelade över den del av sprickytan där ligamenten är placerade. En tillräckligt hög elementtätet hos FE-nätet säkerställs i och kring de obrutna ligamenten, se Figur 4.

Tabell 3 Materialdata för Alloy 182 vid 20 °C.

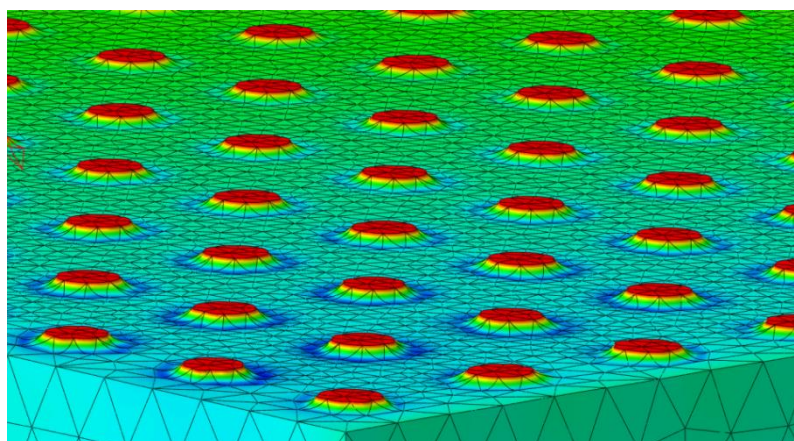
Elasticitetsmodul /GPa	Poissons tal	Sträckgräns /MPa
214	0,29	312

Tabell 4 Plastiska hårdnande för Alloy 182 vid 20 °C.

Töjning /-	Spänning /MPa
0	0
1.46E-03	312
3.62E-03	343
1.17E-02	362
3.74E-02	408
8.23E-02	477
1.56E-01	581



Figur 4 Elementnätet i FE-modellen. I a) visas hela modellen, och i b) en förstoring av elementnätet kring två modellerade obrutna ligament. Vart och ett av dessa obrutna ligament har en diameter av 200 µm.



Figur 5 Uppskalad deformation i området med obrutna ligament. Rött motsvarar störst deformation.

Det ljusa området i Figur 3 modelleras med elastiska materialegenskaper för Alloy 182 vid 20°C, se Tabell 3. Det mörka området i Figur 3 innehållande ligamenten tilldelas elastisk-plastiska materialegenskaper med ett plastiskt hårdnande enligt Tabell 4.

Genom detta sätt att modellera förenklas utvärderingen av K-faktorerna i Abaqus väsentligt

K-faktorer beräknade med modellen i Figur 3 utan ligament har jämförts med handbokslösning [9] för tre sprickstorlekar. Med linjärt elastiska materialegenskaper i hela modellen fås en skillnad på 0.4% vid den djupaste punkten, se Tabell 5. Med elastisk-plastiska materialegenskaper enligt Tabell 3 i det mörka området i Figur 3 fås en skillnad på 0.9% vid den djupaste punkten, se Tabell 6.

Effekten på K-faktorerna till följd av denna modelleringsteknik bedöms vara acceptabel för denna studie där effekten av obrutna ligament studeras.

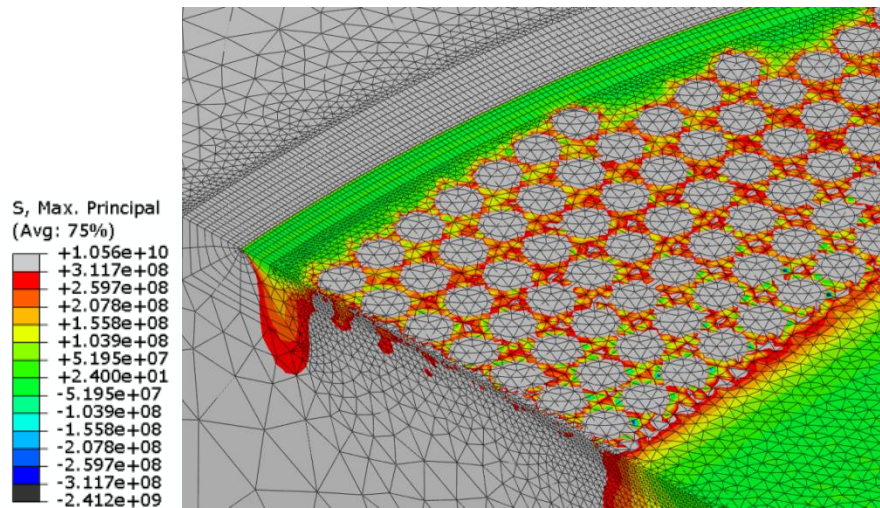
Tabell 5 Jämförelse mellan handbokslösning [9] och numeriska beräkningar för olika spricklängder utan ligament och med linjärt elastiska materialegenskaper i hela modellen.

Spricklängd	K, numeriskt	K, handbokslösning [9]	Relativt fel
12 mm	18.01 MPa*m ^{1/2}	18.08 MPa*m ^{1/2}	0.4 %
15 mm	20.14 MPa*m ^{1/2}	20.22 MPa*m ^{1/2}	0.4 %
20 mm	23.26 MPa*m ^{1/2}	23.34 MPa*m ^{1/2}	0.3 %

Tabell 6 Jämförelse mellan handbokslösning [9] och numeriska beräkningar för olika spricklängder utan ligament och elastisk-plastiska materialegenskaper i det mörka området i Figur 3.

Spricklängd	K, numeriskt	K, handbokslösning [9]	Relativt fel
12 mm	17.98 MPa*m ^{1/2}	18.08 MPa*m ^{1/2}	0.6 %
15 mm	20.08 MPa*m ^{1/2}	20.22 MPa*m ^{1/2}	0.7 %
20 mm	23.12 MPa*m ^{1/2}	23.34 MPa*m ^{1/2}	0.9 %

Figur 6 visar största huvudspänning i modellen med 35% obrutna ligament i området nära sprickfronten vid applicering av membranspänningen 284 MPa (maximalt applicerad spänning i studien) på sidan motstående den ytsprickan är placerad i. Det framgår att samtliga obrutna ligament plasticerar (gråa cirkulära tvärsnitt i figuren). Vidare framgår det att materialet i sprickplanet mellan ligamenten och sprickfronten beter sig elastiskt, d.v.s. största huvudspänning ligger klart under sträckgränsen. Detta indikerar att antagen modell, med elastisk-plastiska materialegenskaper i det mörka området i Figur 3 och elastiska materialegenskaper i resterande del av modellen, kan tillämpas vid beräkning av K-faktorer för aktuella fall.



Figur 6 Största huvudspänningen vid applicering av membranspänningen 284 MPa (maximalt applicerad spänning i studien) för modellen med 35% obrutna ligament (gråa cirkulära tvärsnitt) i området nära sprickfronten. Spänning som överstiger sträckgränsen 312 MPa motsvaras av grått fält.

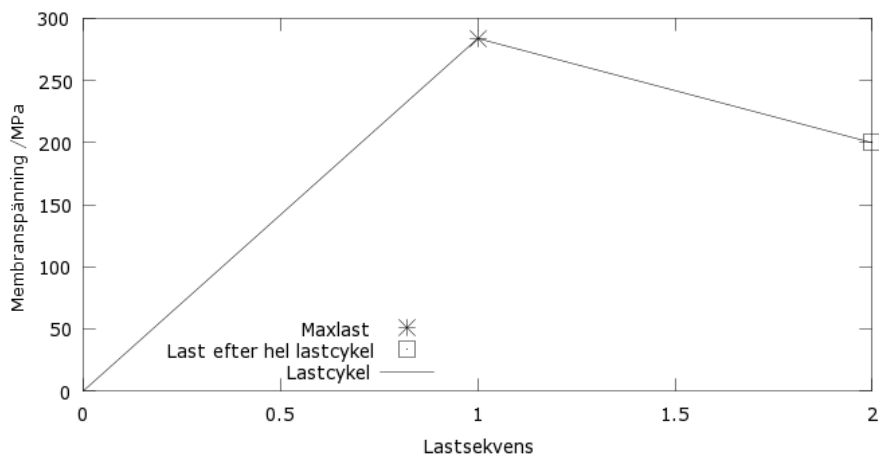
5. Analyserade fall

Tillgänglig information om fördelning av obrutna ligament över IDSCC sprickor är knapphändig. Ligamentyttdensiteten är beräknad utifrån observationer med relativt homogen fördelning av obrutna ligament. Om fördelningen inte är homogen är det rimligt att de obrutna ligamenten befinner sig närmare sprickfronten och att tidigare obrutna ligament längre från sprickfronten blivit så pass påkända att de brustit. I denna studie har därför två fördelningar analyserats; både fall med en jämn fördelning av obrutna ligament över hela sprickytan, samt fall där obrutna ligament endast fördelas nära sprickfronten. Ligamentyttdensiteten är dock densamma för båda fallen.

Analyserna utförs för en halvcirkulär ytspricka som är belastad av restspänningar och spänningar orsakade av ett inre övertryck. En membran restspänning med nivån 200 MPa ansätts vilket förenklat kan representera spänningsnivån vid rumstemperatur i en värmebehandlad buttring av Alloy 182 i ett område med dragspänningar (restspänningsnivån i Alloy 182 svetsar kan vara mer än dubbelt så hög). Restspänningen antas vara oberoende av temperaturen. Ett representativt inre övertryck är 84 bar. Med en kvot mellan inre radie och tjocklek på 10 fås membranspänningen 84 MPa.

Den primära spänningen orsakad av det inre trycket är 42% av restspänningen. Denna fördelning mellan primära och sekundära spänningar bedöms vara representativ.

Inverkan av elastisk-plastisk deformation av ligamenten på spricköppning och K-faktorer studeras för lastsekvensen i Figur 7. Tillståndet 1 motsvarar drift och tillståndet 2 motsvarar avställd reaktor. Membranspänningen i Figur 7 appliceras på sidan motstående den ytsprickan är placerad i.



Figur 7 Pålagd membranspänning på sidan motstående den ytsprickan är placerad i. Last efter hel lastcykel motsvarar avställd reaktor.

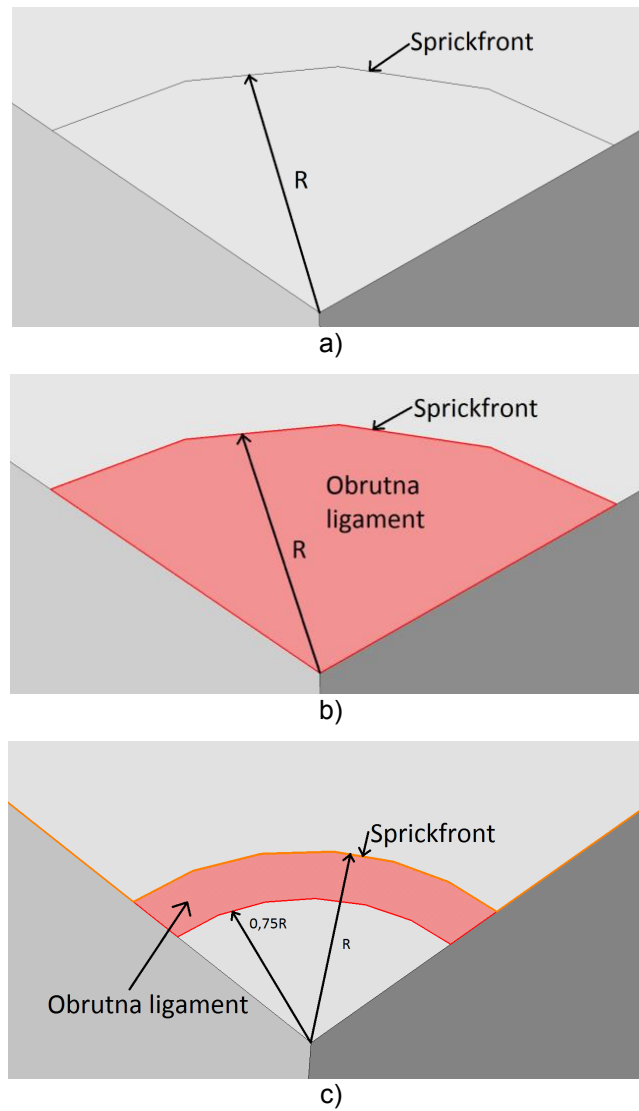
Spricköppningen beräknas för tre olika storlekar på en halvcirkulär ytspricka utan ligament. Utgående från resultatet bestäms den sprickstorlek som ger en detekterbar spricköppning enligt VT01, d.v.s. spricklängden som ger att $COD \geq 20 \mu\text{m}$ över en sammanhängande längd $\geq 5 \text{ mm}$.

Informationen om ytdensiteten av obrutna ligament och dess fördelning över sprickytan är osäker. För att få en uppfattning om hur spricköppningen och K-faktorerna påverkas av kvarstående ligament genomförs därför en känslighetsstudie.

Två olika fördelningar av obrutna ligament studeras. I det första fallet är ligamenten jämnt fördelade över hela sprickplanet, se Figur 8b. I det andra fallet är ligamenten placerade i ett område nära sprickfronten där en gräns lagts vid 75% av ytsprickans radie, se Figur 8c.

Ytdensiteter av obrutna ligament som studeras är 0.8%, 7.5%, och 35% där 7.5% representerar ytdensiteten enligt inventeringen redovisad i avsnitt 3. De andra två ytdensiteterna motsvarar ett lågt respektive högt värde. Ytdensitet definieras som obrutna ligaments totala tvärsnittsyta dividerad med total sprickyta med ligament.

Samtliga beräkningsfall är sammanställda i Tabell 7.



Figur 8 Modell utan ligament visas i a), modell med obrutna ligament jämnt fördelade över hela sprickytan visas i b), och modell med obrutna ligament endast nära sprickfronten visas i c). Rött markerar sprickyta som har obrutna ligament.

Tabell 7 Ligamentkonfiguration för de utvalda beräkningsfallen. Modellen i Figur 8a används för fall A0, modellen i Figur 8b används för fall B1, B2 och B3, och modellen i Figur 8c för fall C1, C2 och C3.

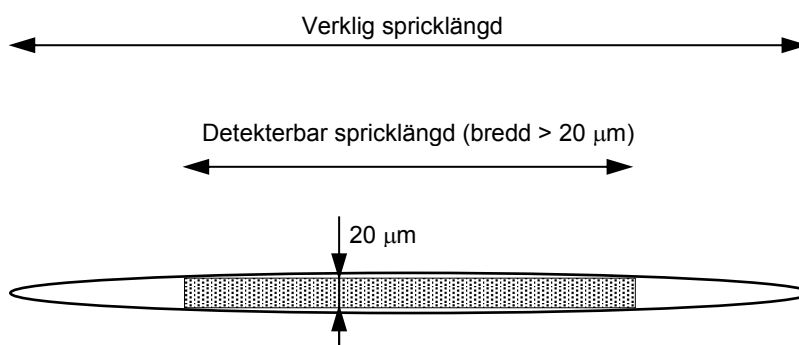
ID	Ligamentkonfiguration	Spricklängder /mm
A0	Inga obrutna ligament	12, 15, 20
B1	Ytdensitet på 0.8 % jämnt fördelade över hela sprickytan	12, 15, 20
B2	Ytdensitet på 7.5 % jämnt fördelade över hela sprickytan	12, 15, 20
B3	Ytdensitet på 35 % jämnt fördelade över hela sprickytan	12, 15, 20
C1	Ytdensitet på 0.8 % endast nära sprickfronten	12, 15, 20
C2	Ytdensitet på 7.5 % endast nära sprickfronten	12, 15, 20
C3	Ytdensitet på 35 % endast nära sprickfronten	12, 15, 20

6.Resultat

6.1 Skillnad mellan verklig spricklängd och detekterbar längd

Nedan ges resultat från en analys av detekterbar längd av sprickan vid provning med visuell teknik enligt procedur VT01 [1] för fallet *utan* kvarstående ligament. Resultat är i första hand relevant för spricktillväxtmekanismer där få obrutna ligament förekommer, som IGSCC eller utmattning. Resultatet används även som jämförelsebas i avsnitt 6.2 där IDSCC sprickor med obrutna ligament utvärderas.

Gränsen för detektering är relaterad till spricköppningen (även kallad sprickbredden, eller COD). Endast den del av sprickans längd där öppningen är tillräckligt stor med de belastningar som råder för avställd reaktor kommer att vara skönjbar. Figur 9 nedan visar en spricka och ett exempel på skillnad mellan verklig spricklängd och detekterbar längd vid en given detekteringsgräns. En gräns för detekterbar defektbredd innebär att en viss del av sprickspetsarna inte kan ses. Exempelvis kan en spricka i ett område med höga dragrestspänningar öppna flera tiotal μm , medan en helt obelastad eller en mycket kort spricka kan öppna enbart någon enstaka μm .



Figur 9 Exempel på skillnad mellan verklig spricklängd och detekterbar längd.

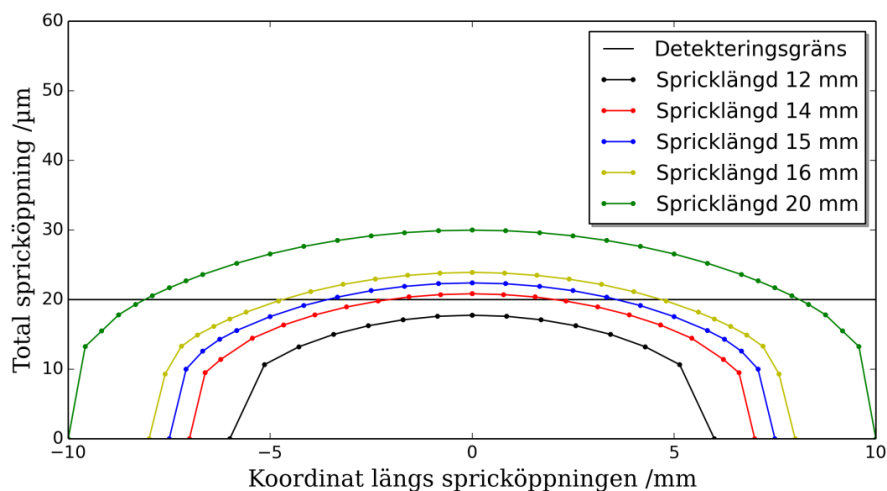
Vid provning med VT behöver analys av spricköppningen utföras som en del i skadetålighetsanalysen eftersom den postulerade defekt som ger ett givet kontrollintervall även måste uppfylla gränsen för detektering med VT. Gränsen för detektering med VT beror av åtkomst vad gäller både avstånd och betraktningvinkel mot ytan (men kan även påverkas av förstöringsgrad, avsökningshastighet, etc.). Vid provning enligt procedur VT01 [1] ges den minsta detekteringsgränsen av att defekten måste uppfylla: sprickbredd $\geq 20 \mu\text{m}$ över en sammanhängande spricklängd av minst 5 mm, vilket gäller vid provning från avstånd $< 200 \text{ mm}$ och med vinkel $< 15^\circ$ från ytnormalen.

Nedan ges ett exempel på utvärdering av spricköppningen i förhållande till ett gränsvärde för detektering. Analyserna är utförda för en halvcirkulär ytspricka i ett konstant restspänningsfält på 200 MPa. Alla övriga antaganden är de enligt avsnitt 5.

Figur 10 visar spricköppning och detekterbar längd. Figuren illustrerar att skillnaden mellan verklig spricklängd och detekterbar längd är störst för små defekter och den del av sprickspetsarna som inte kan ses minskar när defektstorleken ökar. Den första spricklängd som uppfyller gränsen för detektering enligt VT01 är 15 mm lång (sprickbredd > 20 μm över > 5 mm). Denna spricklängd, samt den minsta (12 mm) och största (20 mm), har använts för jämförelser i kommande avsnitt där effekten av obrutna ligament undersöks.

Figuren visar behovet av att i skadetålighetsanalyser utvärdera sprickbredden längs sprickan som en del i arbetet med att ta fram detekteringsmål för VT. För små sprickor som har en bredd (spricköppning) som ligger i närheten av gränsen för detektering, kan verklig spricklängd skilja relativt mycket från detekterbar längd. För fallet med en 15 mm långa postulerad defekt så är verklig spricklängd dubbelt så lång som den som är detekterbar. För en 20 mm lång ytspricka har skillnaden minskat till c:a 20%.

I realiteten är givetvis inte detekteringsgräns knivskarp utan urskiljningsförmågan avtar succesivt och beror av åtkomlighet, belysning och andra parametrar enligt tidigare diskussion. Exemplet visar dock att man i arbete med detekteringsmål för VT behöver beakta att skillnaden mellan detekterbar längd och verklig spricklängd. Denna skillnad beror av detekteringsgräns, restspänningsnivå och spricklängd. I analyserat fall är restspänningsfältet konstant. Vid gradienter i restspänningsfältet blir situationen något mer komplex.



Figur 10 Spricköppning för halvcirkulär ytspricka vid 200 MPa membran restspänning och utan ligament. Figuren visar detekterbar längd vid olika spricklängd. Första spricklängd som uppfyller VT01 (öppning > 20 μm över en längd > 5 mm) är 15 mm lång.

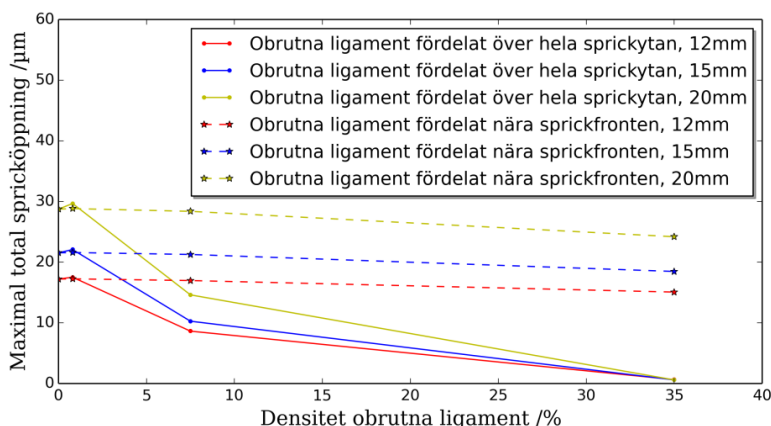
6.2 Effekten av obrutna ligament på COD

Figur 11 - Figur 17 visar effekt av obrutna ligament på spricköppningen för fallet med en konstant restspänning på 200 MPa och lastsekvensen enligt Figur 7. Detta tillstånd motsvarar avställd reaktor.

Figur 11 visar den maximala spricköppningen (mitt på sprickan) för olika stora sprickor vid olika ytdensitet av obrutna ligament, med två olika fördelningar av ligamenten över sprickytan.

För de fall där de obrutna ligamenten fördelas jämnt över hela sprickytan och ytdensiteten är låg (0.8%), visar analyserna att spricköppningen efter lastcykeln blir större jämfört med fallet då ligament saknas, se Figur 11 - Figur 17. Förklaringen till detta resultat är att ligamenten plasticeras så pass mycket under driftcykeln att de, när spänningen orsakad av det inre trycket tas bort, motverkar ytsprickan att sluta sig. Analysen med låg ytdensitet av obrutna ligament visar vidare att den plastiska töjningen i ligamenten är hög. När ytdensiteten av obrutna ligament ökar minskar spänningen i ligamenten samtidigt som spricköppningen minskar. När ytdensiteten går mot 100 %, och ingen spricka finns, går öppningen mot noll.

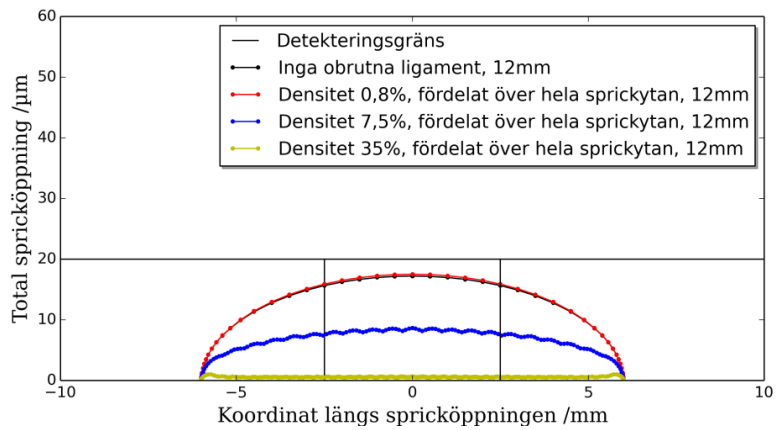
För fallen när de obrutna ligamenten endast ligger i ett område nära sprickfronten visar Figur 11 att reduceringen av spricköppningen går betydligt långsammare med ökande ytdensitet av ligament. I området där ytdensiteten är mindre än 7.5% kan en begränsad skillnad av COD förväntas, jämfört med den som ges av linjerna i Figur 11, på grund av att brott av ligament kan förekomma i den verkliga sprickan.



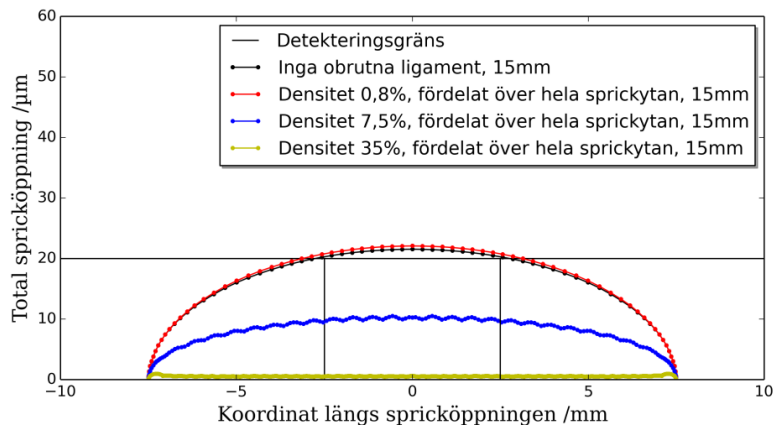
Figur 11 Maximal spricköppning för ytsprickor med olika storlek som funktion av andel obrutna ligament i ytsprickan. Både fall med obrutna ligament fördelade över hela sprickytan och fördelade endast nära sprickfronten redovisas. Resultaten redovisas för last motsvarande avställd reaktor.

I Figur 12 - Figur 17 visas spricköppningarna längs hela sprickfronten för de olika beräkningsfallen. Figur 12 - Figur 14 visar resultatet från simuleringar med obrutna ligament jämnt fördelade över hela sprickytan (A0, B1, B2 och B3). Figur 15 - Figur 17 visar motsvarande simuleringar (A0, C1, C2 och C3) med obrutna ligament fördelade över en del av sprickytan nära sprickfronten.

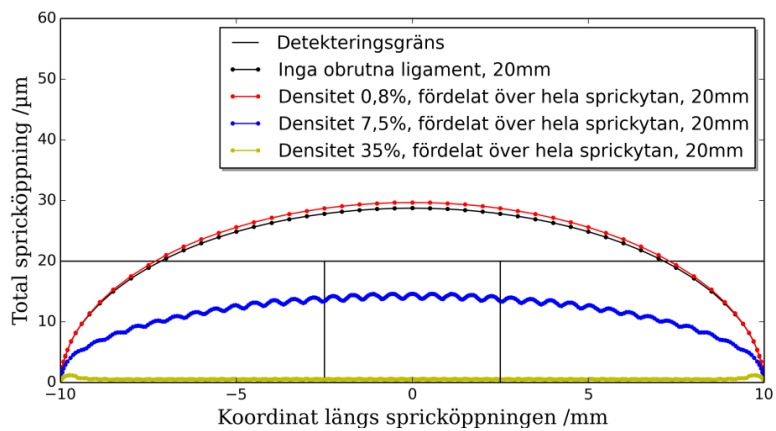
För fallen med obrutna ligament över hela sprickytan visar resultaten att en låg ytdensitet (0.8%) av obrutna ligament har liten inverkan på spricköppningen trots ovan beskrivna plasticering av ligamenten. När ytdensiteten ökas ytterligare minskar spricköppningen. Med en ytdensitet på 7.5 % så mer än halveras COD. Detta innebär att dessa ytsprickor inte kan detekteras enligt VT01. Enligt avsnitt 3 så kan denna ytdensitet vara representativ för IDSCC i Alloy 182. Med en ytdensitet på 35% fås en randeffekt närmast sprickspetsarna. I området mellan ligamenten och sprickfronten öppnar sig sprickan mer än för den övriga delen av sprickan, se Figur 12 - Figur 14. Sättet att modellera ligamenten närmast sprickfronten inverkar således på spricköppningen nära sprickfronten när ytdensiteten av ligament är hög. Resultaten från motsvarande beräkning av K-faktorer måste därför tolkas med försiktighet.



Figur 12 Spricköppning för en 12 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament då ligamenten ligger jämnt fördelade över hela sprickytan.

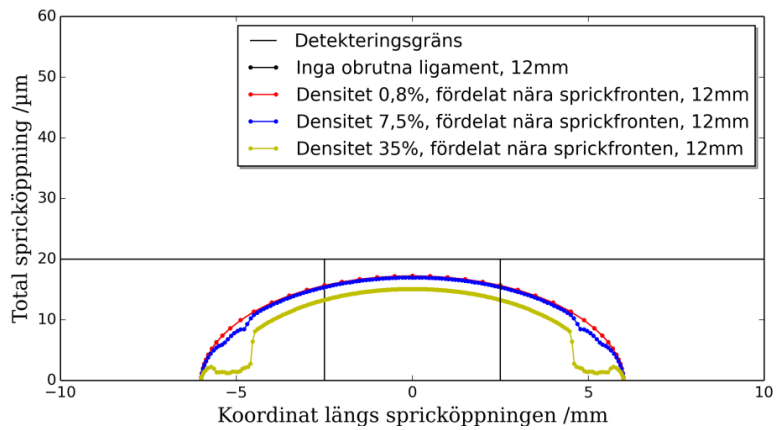


Figur 13 Spricköppning för en 15 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament då ligamenten ligger jämnt fördelade över hela sprickytan.

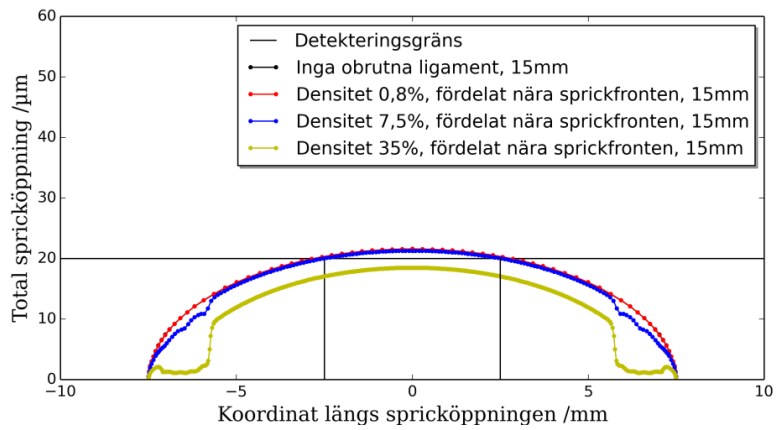


Figur 14 Spricköppning för en 20 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament då ligamenten ligger jämnt fördelade över hela sprickytan.

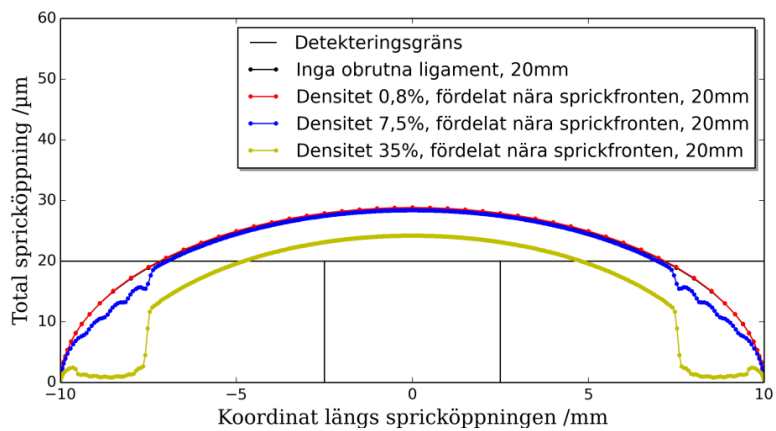
Resultaten från analyserna av fallen med obrutna ligament i ett område nära sprickfronten visar att spricköppningens profil starkt påverkas av fördelningen av ligament över sprickytan. Som nämnts tidigare saknas i litteraturen entydig information om fördelningen av ligament. Resultatet i Figur 16 visar att en halvcirkulär ytspricka med spricklängden 15 mm och ytdensiteten 7.5 % fortfarande kan detekteras. Detta gäller inte för fallet med en ytdensitet på 35 %. Resultatet i Figur 17 visar att en halvcirkulär ytspricka med spricklängden 20 mm och ytdensitet av obrutna ligament på 35% är detekterbar. På samma sätt som för fallen med jämnt fördelade ligament över hela sprickytan fås en randeffekt närmast sprickspetsarna då ytdensiteten är 35%. I området mellan ligamenten och sprickfronten öppnar sig sprickan mer än intilliggande område strax innanför, se Figur 15 - Figur 17. Sättet att modellera ligamenten närmast sprickfronten inverkar således på spricköppningen närmast sprickspetsarna när ytdensiteten av ligament är hög. Resultaten från motsvarande beräkning av K-faktorer måste därför tolkas med försiktighet.



Figur 15 Spricköppning för en 12 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament då ligamenten endast ligger i närheten av sprickfronten.

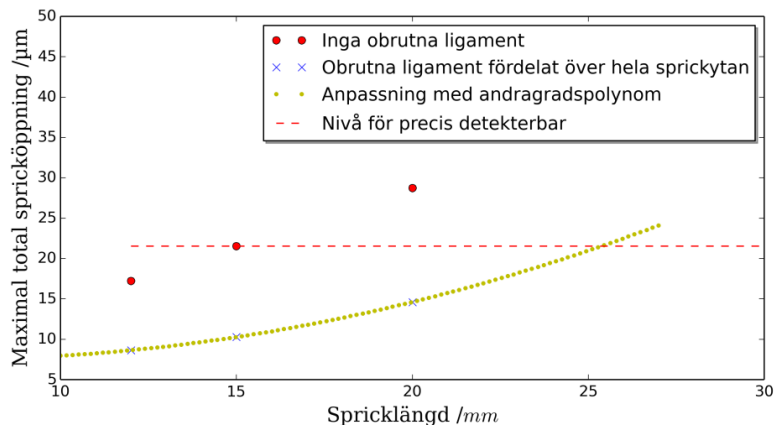


Figur 16 Spricköppning för en 15 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament då ligamenten endast ligger i närheten av sprickfronten.



Figur 17 Spricköppning för en 20 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament då ligamenten endast ligger i närheten av sprickfronten.

Figur 18 visar maximal spricköppning för olika spricklängder för fallet utan ligament och för fallet 7.5% obrutna ligament jämnt fördelade över hela sprickytan. I fallet med obrutna ligament visar resultaten i Figur 13 att en ytspricka utan ligament med spricklängd 15 mm precis är detekterbar enligt VT01 [1]. I fallet med 7.5% obrutna ligament fördelade över hela sprickytan indikerar resultaten i Figur 18 (genom extrapolation) att en spricklängd på omkring 25 mm krävs för att den skall vara detekterbar enligt VT01.

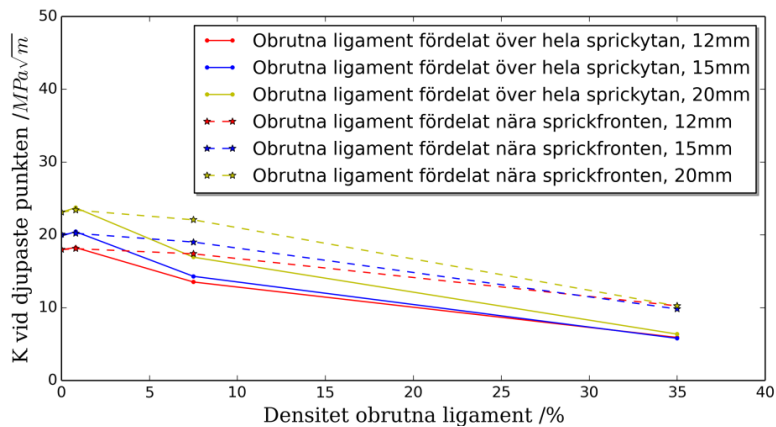


Figur 18 Figuren visar maximal spricköppning för olika spricklängder för fallet inga ligament och fallet 7.5% obrutna ligament jämnt fördelade över hela sprickytan.

6.3 Effekten av obrutna ligament på K

Effekten av obrutna ligament på K-faktorn längs sprickfronten vid en konstant restspänning på 200 MPa och lastsekvensen enligt Figur 7 visas i Figur 19 - Figur 25.

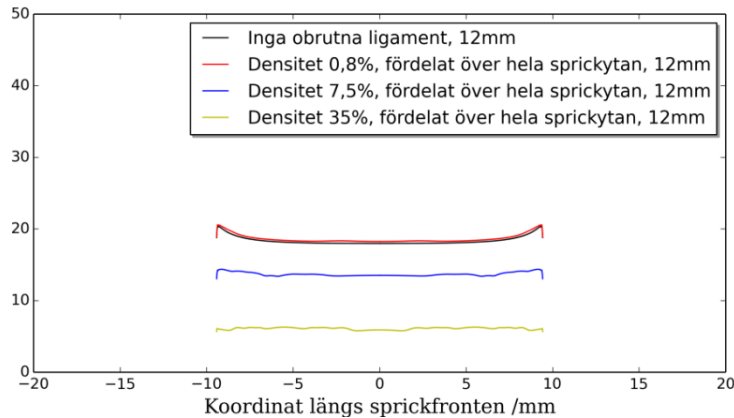
I Figur 19 redovisas K-faktorn för djupaste punkten för olika densitet och olika fördelning av obrutna ligament och olika sprickstorlekar. I likhet med effekten av obrutna ligament på spricköppningen visar resultaten i denna undersökning att en liten ökning av värdet på K-faktorn fås vid en liten mängd ligament, se Figur 19. I fall med större andel obrutna ligament minskar K-faktorn vid djupaste punkten. I Figur 19 framgår också skillnaden mellan hur olika fördelning av obrutna ligament påverkar K-faktorn.



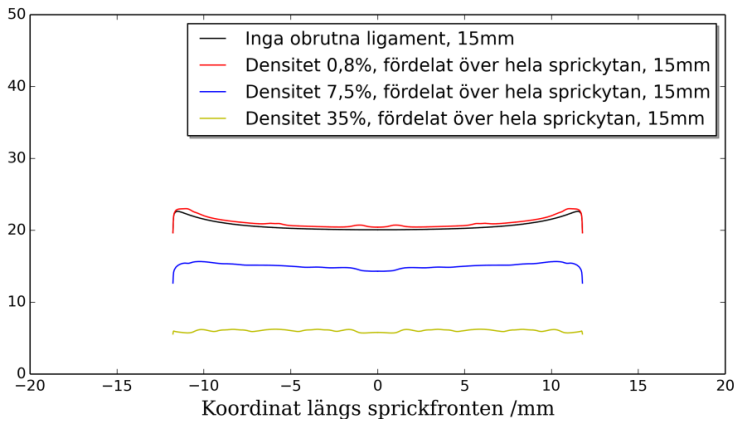
Figur 19 K-faktorn vid djupaste punkten för ytsprickor med olika storlek som funktion av andel obrutna ligament i sprickan. Både fall med ligament fördelade över hela sprickytan och ligament fördelade endast nära sprickfronten redovisas. Resultaten redovisas för last motsvarande avställd reaktor.

I Figur 20 - Figur 25 redovisas K-faktorn längs med sprickfronten för respektive sprickstorlek, densitet av obrutna ligament och fördelning av obrutna ligament. Resultaten visar att de obrutna ligamenten som ligger närmast sprickfronten har en lokal effekt på K-faktorn. Detta ses i form av att kurvorna är lite hackiga. Orsaken är att ligamenten är placerade i ett rutnät och inte rotationssymmetriskt varför ”trappsteg” uppstår längs sprickfronten, se Figur 6. Värdet på K-faktorn är dock relativt stabilt utmed sprickfronten. Det sker en lastutjämning från ligamenten till sprickfronten trots att avståndet mellan de obrutna ligamenten och sprickfronten i vissa fall inte är mer än 0.2 mm. Påpekas bör att värdet 0 på koordinaten längs sprickfronten motsvaras av djupaste punkten och att värdena på K-faktorn i figurerna är speglade kring denna punkt endast av visualiseringskäl.

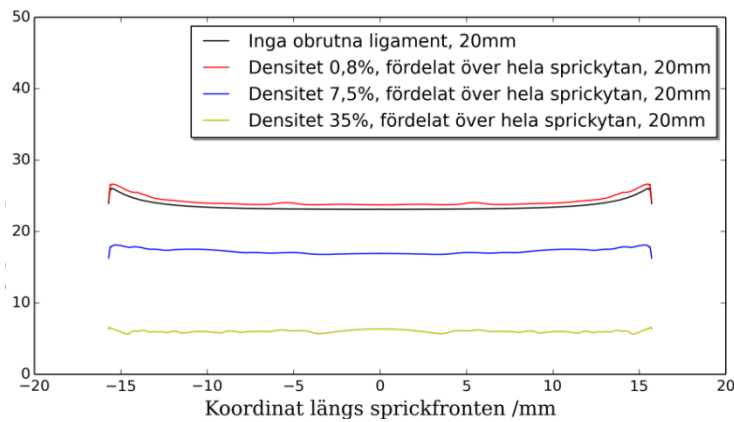
Inventeringen i avsnitt 3 indikerar att en ytdensitet av obrutna ligament på omkring 7.5% kan vara rimlig. Resultaten i Figur 19 visar att om de obrutna ligamenten är jämnt fördelade över hela sprickytan, är en densitet på 7.5% tillräcklig för att avsevärt minska värdena på K-faktorerna. Om samma ytdensitet av obrutna ligamenten istället är fördelade endast nära sprickfronten fås inte lika stor reduktion. Kunskap om fördelningen av obrutna ligament är med andra ord viktig också för att bedöma påkänningen på en ytspricka med obrutna ligament mellan sprickytorna.



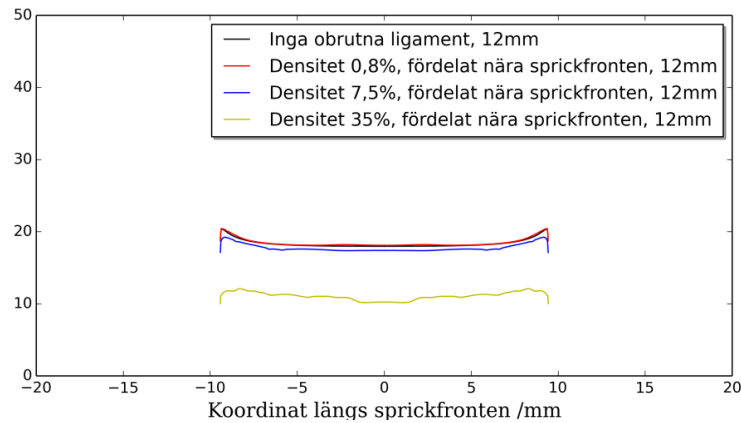
Figur 20 K-faktorn i $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ längs sprickfronten för en 12 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament jämnt fördelade över hela sprickytan. Värdet 0 på koordinaten längs sprickfronten motsvaras av djupaste punkten. Värdena på K-faktorn är speglade kring denna punkt endast av visualiseringsskäl.



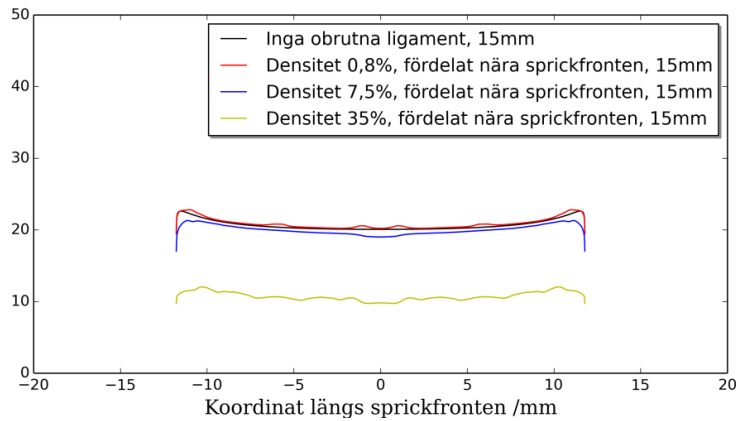
Figur 21 K-faktorn i $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ längs sprickfronten för en 15 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament jämnt fördelade över hela sprickytan. Värdet 0 på koordinaten längs sprickfronten motsvaras av djupaste punkten. Värdena på K-faktorn är speglade kring denna punkt endast av visualiseringsskäl.



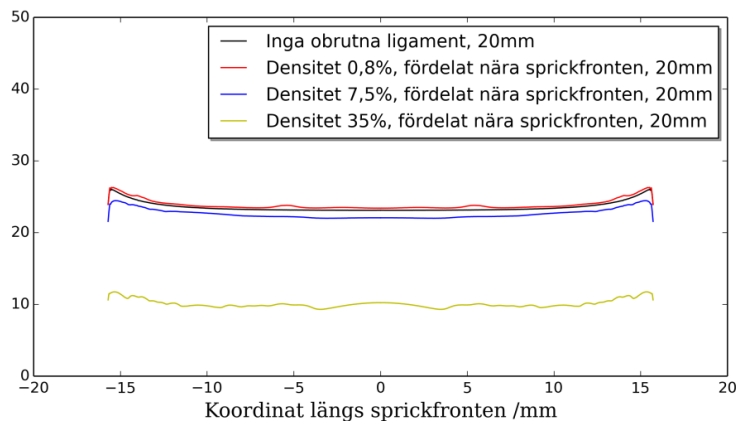
Figur 22 K-faktorn i $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ längs sprickfronten för en 20 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament jämnt fördelade över hela sprickytan. Värdet 0 på koordinaten längs sprickfronten motsvaras av djupaste punkten. Värdena på K-faktorn är speglade kring denna punkt endast av visualiseringsskäl.



Figur 23 K-faktorn i $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ längs sprickfronten för en 12 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament fördelade nära sprickfronten. Värdet 0 på koordinaten längs sprickfronten motsvaras av djupaste punkten. Värdena på K-faktorn är speglade kring denna punkt endast av visualiseringskäl.



Figur 24 K-faktorn i $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ längs sprickfronten för en 15 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament fördelade nära sprickfronten. Värdet 0 på koordinaten längs sprickfronten motsvaras av djupaste punkten. Värdena på K-faktorn är speglade kring denna punkt endast av visualiseringskäl.



Figur 25 K-faktorn i $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ längs sprickfronten för en 20 mm lång ytspricka med olika ytdensitet av obrutna ligament fördelade nära sprickfronten. Värdet 0 på koordinaten längs sprickfronten motsvaras av djupaste punkten. Värdena på K-faktorn är speglade kring denna punkt endast av visualiseringskäl.

6.4 Effekten av obrutna ligament på relationen mellan K och COD

Det är av intresse att studera relationen mellan storheter som styr tillväxthastigheten för en spricka och den information som insamlas vid visuell provning. Det har tidigare inte utretts hur denna relation ser ut, exempelvis mellan K-faktorn längs sprickfronten (som i hög grad styr tillväxthastigheten för en spricka) och spricköppningen (som är den viktigaste informationen som samlas in vid visuell provning), i närvaro av IDSCC.

I tidigare avsnitt har effekten från förekomst av obrutna ligament på spricköppning (COD) och spänningsintensitetsfaktorer (K-faktorer) studerats och resultaten indikerar att COD och K-faktorer är starkt kopplade till varandra vid närvaro av obrutna ligament, se Figur 11 och Figur 19.

Storleken på COD för en plan plåt bestäms av pålagd last (σ), storlek på sprickan (a), materialegenskaper (E, \dots) och en formfaktor (g). Storleken på K-faktorn bestäms av pålagd last (σ), storlek på sprickan (a) och en geometriberoende formfaktor (f). För att visa på relationen mellan dessa effekter definieras en faktor C enligt

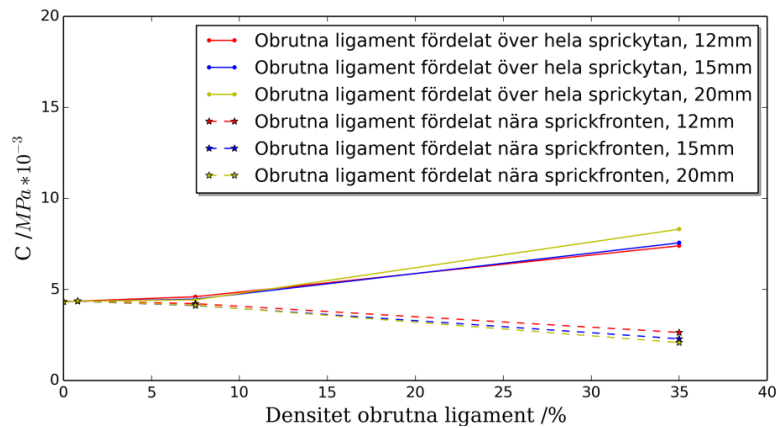
$$C = K_{dp} / \sqrt{COD_{max}}, \quad (1)$$

där K_{dp} motsvarar K-faktorn vid djupaste punkten, och COD_{max} motsvarar maximal spricköppning, d.v.s. de storheter som beräknats och redovisats i avsnitt 6.2 och 6.3. Faktorn C fås genom att ur sambandet mellan COD_{max} , sprickstorlek, materialegenskaper, lastnivå och formfaktor lösa ut sprickstorlek a , och stoppa in a i uttrycket för K_{dp} . I denna faktor ligger en konstant beroende av materialbeteende och last. Dessa är samma för samtliga redovisade värden på K-faktorer och spricköppningar.

I Figur 26 redovisas faktorn C för samtliga analyserade fall i Tabell 7. Det är tydligt att kopplingen mellan värden på K-faktorer och värden på COD_{max} är stark. En ytdensitet av obrutna ligament upp till 7.5% är vanligast förekommande enligt inventeringen redovisad i avsnitt 3. I detta område är förändringen av faktorn C med ökande densitet obrutna ligament tämligen liten enligt Figur 26. Resultatet indikerar att COD_{max} och K-faktorerna påverkas på motsvarande sätt och i motsvarande utsträckning för en halvcirkulär ytspricka med en given sprickstorlek i ett membrant restspänningsfält på 200 MPa.

För en ytdensitet på 35% avviker C för de två fördelningarna av ligament från varandra. För fallet att de obrutna ligamenten är jämnt fördelade över hela sprickytan sjunker COD_{max} snabbare än K_{dp} när ytdensiteten ökar från 7 till 35%. För fallet att de obrutna ligamenten är fördelade endast nära sprickfronten sjunker K_{dp} snabbare än COD_{max} . Detta resultat är något oväntat för fallet med jämnt fördelade ligament över sprickytan då C borde ligga kvar på samma nivå när ytdensiteten av obrutna ligament ökar. Det oväntade resultatet

förklaras av modelleringen de obrutna ligamenten närmast sprickfronten. Beroende på avståndet mellan de obrutna ligament som ligger närmast sprickfronten och sprickfronten själv kommer spricköppningen lokalt och K_{dp} att påverkas samtidigt som COD_{max} inte påverkas. Slutsatsen är att resultaten för ytdensiteten 35% av obrutna ligament jämnt fördelade över sprickytan måste tolkas med försiktighet. Beaktande att inventeringen i avsnitt 3 visar på att en ytdensitet på 7.5% ligament är mest förekommande vid IDSCC har resultaten för ytdensiteten på 35% inte analyserats vidare.



Figur 26 Relationen mellan K och spricköppning, för olika densitet av obrutna ligament, olika fördelning av obrutna ligament och olika storlekar på ytsprickor.

6.5 Analys av ett exempelfall

För att tydliggöra resultatens konsekvens gås ett exempelfall igenom. Utgångspunkten är en situation där VT används för att avsyna områden i syfte att finna eventuella defekter som behöver bedömas.

- En 15 mm lång ytspricka detekteras. K-faktorn beräknas utifrån antagandet att inga obrutna ligament finns och att restspänningsnivån är 200 MPa. Värdet bestäms till K_α . Tillväxthastighet och därefter kontrollintervall bestäms vilket innefattar antagden om eventuella övriga laster.
- Samma ytspricka utvärderas istället med antagande om jämnt fördelade ligament över hela sprickytan och med en ytdensitet på 7.5%. K-faktorn, här betecknad K_β , bestäms utifrån att restspänningsnivån är 200 MPa. Med antagande om att COD_{max} är närmast konstant för de två utvärderingsantagandena fås med stöd av Figur 26 att K_β i stort sett är lika med K_α . Tillväxthastigheten med de två antagandena blir därför densamma vid den aktuella sprickstorleken i respektive fall.
- Det som skiljer mellan fallet utan och fallet med ligament är verklig spricklängd. Figur 18 indikerar att ytsprickan med ligament har spricklängden 25 mm. Sprickan utan ligament har spricklängden 15 mm enligt Figur 10. En konsekvens av detta är att beräknad tid för tillväxt till största acceptabla sprickstorlek överskattas om sprickan innehåller ligament men antas vara ligamentfri.
- Vid beräkning av största acceptabla sprickstorlek beaktas även eventuella termiska transienter och andra lastbidrag. Denna analys genomförs på samma sätt för de två fallen.

7. Sammanfattning och slutsatser

Provning med visuell teknik (VT) används ofta för både generell avsyning och för kvalificerad återkommande kontroll. Den viktigaste parametern för att detektera sprickor med VT är spricköppningen (sprickbredd över viss längd) vilken beror av bl.a. nivån på restspänningar och sprickstorlek. Vid skademekanismen IDSCC uppstår obrutna ligament som kan påverka spricköppningen och K-faktorer vilket studeras i denna utredning.

Inventering av publicerad information om obrutna ligament vid IDSCC i nickelbasmaterial Alloy 182 visar att underlaget är knapphändigt gällande densiteten och fördelningen av ligament. Det som finns tillgängligt är exempel för snitt utmed undersökta sprickors djup men information saknas om fördelningen av ligament över hela sprickytor.

Sprickbredd och K-faktorer analyseras med FEM för en halvcirkulär ytspricka utan ligament utsatt för en konstant restspänning på 200 MPa. Detekterbar spricklängd bestäms till 15 mm (sprickbredd $\geq 20 \mu\text{m}$ över längd $> 5 \text{ mm}$ enligt VT01). Analys av olika spricklängder visar att skillnaden mellan detekterbar längd och verklig spricklängd kan vara stor. Skillnaden i storlek mellan postulerad defekt och detekterbara delar är en funktion av bl.a. detekteringsgräns, sprickstorlek och nivån på restspänningar. Vid användning av VT måste detta beaktas för varje situation som en del i skadetålighetsanalysen och framtagandet av detekteringsmål.

Resultat från analyser av ytsprickor med ligament visar att sambandet mellan maximal spricköppning och K-faktorn vid djupaste punkten är mycket starkt. Maximal spricköppning ger en stark indikation på värdet på K-faktorn vid djupaste punkten. Risken för att signifikant underskatta värdet på K-faktorn är liten även om ett felaktigt antagande angående förekomst av obrutna ligament görs. Däremot kan spricklängden underskattas om ytdensiteten av obrutna ligament underskattas. I en analys av kontrollintervall motsvaras detta av en underskattning (eller överskattning) av initial sprickstorlek.

Inverkan av obrutna ligament på COD och K-faktorer analyseras för referensspricklängden 15 mm samt för en mindre och en större spricklängd. Tre olika ytdensiteter (0.8%, 7.5% och 35%) av obrutna ligament över sprickytan studeras för de två fallen ligament över hela sprickytan och ligament endast i ett område nära sprickfronten.

Resultatet av analyserna visar följande:

- Betydande plastisk deformation erhålls i de obrutna ligamenten för ytdensitet 0.8% vid fördelning över hela sprickytan och för ytdensitet 0-7.5% vid fördelning i ett område nära sprickfronten.
- Spricköppningen och K-faktorn ökar till en början med ökande ytdensitet av obrutna ligament för att sedan minska när ytdensiteten fortsätter att öka. Med obrutna ligament över hela sprickytan sker omslaget tidigare.
- Spricköppningens profil påverkas av fördelningen av obrutna ligament över sprickytan. Entydig information om realistiska fördelningar saknas, men Tabell 2 antyder att en jämn fördelning av ligament över hela ytsprickan kan vara relevant. Publicerad information indikerar att en ytdensitet på 7.5% kan vara representativ för IDSCC i Alloy 182.
- En halvcirkulär ytspricka utan ligament med spricklängd 15 mm går att upptäcka enligt VT01 för den analyserade restspänningsnivån. En ytspricka med samma storlek går inte att upptäcka om det finns obrutna ligamenten jämnt fördelade över hela sprickytan med en ytdensitet på 7.5%. Extrapolation av resultaten indikerar att en ytspricka med samma proportioner och en ytdensitet obrutna ligament på 7.5% behöver en spricklängd på omkring 25 mm för att vara detekterbarhet enligt VT01.
- Värdet på K-faktorn vid djupaste punkten och värdet på maximal spricköppning är starkt kopplade. Risken för underskattning av värdet på K-faktorn är liten för andelar obrutna ligament upp till 7.5%. För en VT-detekterad ytspricka är dock verklig spricklängd större om sprickan har en ytdensitet på 7.5% ligament jämfört med om ligament saknas. Detta innebär att beräknad tid för tillväxt till största acceptabla sprickstorlek överskattas om sprickan innehåller ligament men antas vara ligamentfri.

8. Förslag på fortsatt arbete

Utgående från resultat från genomförd studie föreslås följande fortsatta arbete:

1. Kompletterande analyser
 - a) Analys med ytdensitet 3 och 15% för bestämning av omslag i respons.
 - b) Bestämning av verklig spricklängd och K-faktorn i djupaste punkten för en enligt VT01 detekterbar ytspricka med jämnt fördelade ligament över hela sprickytan och med olika ytdensitet.
 - c) Analyser med olika restspänningsnivå, restspänningsfördelningar och relation mellan restspänning och primärspänning för sprickor utan och med ligament.
 - d) Jämförande analys med elastisk-plastiska materialegenskaper i hela modellen. Fallet jämnt fördelade ligament över hela sprickytan med en ytdensitet på 7.5% väljs som referensfall.
2. Kartläggning av kvarstående ligament genom undersökning av sprickytor på uppbrutna IDSCC-sprickor. Detta motiveras av att det råder osäkerhet om vad som är en realistisk ytdensitet och fördelning av obrutna ligament vid IDSCC.

9.Referenser

- [1] L. Kastre, ”VT01. Generell procedur. Manuell visuell provning av objekt i reaktortryckkärl och interna delar med avseende på ytbrytande sprickor, revision 4,” 2013.
- [2] S. Cumblidge, M. Anderson och S. Doctor, ”An Assessment of Visual Testing (NUREG/CR-6860, PNNL-14635),” Washington, 2004.
- [3] S. Cumblidge, M. Andersson och S. Doctor, ”A study of remote visual methods to detect cracking in reactor components (NUREG/CR-6943, PNNL-16472),” Washington, 2007.
- [4] J. Wåle, ”Crack characterisation for in-service inspection planning – An update,” 2006.
- [5] J. Gunnars, ”Beräkning av ändring av spricköppning vid båtprovsuttag av tvärsprickor i svets,” 2002.
- [6] S. E. Cumblidge, S. R. Doctor, G. J. Schuster, R. V. Harris, S. L. Crawford, R. J. Seffens, M. B. Toloczko och S. M. Bruemmer, ”Nondestructive and Destructive Examination Studies on Removed-from-Service Control Rod Drive Mechanism Penetrations (PNNL-16628),” Richland, Washington, 2007.
- [7] A. Kanno, K. Hasegawa, F. Yoshikubo, R. Morinaka, H. Hatou och M. Tanaka, ”Development and Field Application Experience of the Reactor Internal Preventive Maintenance Technology,” i *Presentation at International Conference on NPP Life Management, IASA-CN-194-023*, 2012.
- [8] J. Wåle, ”Karakterisering av IDSCC i Alloy 182, Delmål 1 i projekt DAS182,” 2001.
- [9] M. Isida, T. Yoshida och H. Noguchi, ”Tension of a plate with a pair of semi-elliptical surface cracks,” *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, vol. 49, nr 448, pp. 1572-1580, 1983.



2017:10

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-17116 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se