



DokumentID 1415307	Version 1.0	Status Godkänt	Reg nr	Sida 1 (14)
Författare Lars Cederqvist Ulf Ronneteg Håkan Ryden			Datum 2014-02-17	
Kvalitetssäkrad av Sanja Trkulja (KG)			Kvalitetssäkrad datum 2014-02-27	
Godkänd av Jan Sarnet			Godkänd datum 2014-02-27	

Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns svetsar

Innehåll

1	Inledning	2
2	Avgränsningar	3
3	Svetsprocess	4
4	Defekter som kan uppkomma vid FSW av kapselns kopparhölje	5
4.1	Defektbeskrivning enligt standard	5
4.2	Kaviteter	6
4.3	Rotdefekter - foglinjeböjning/kvarvarande fog/förflyttad skarv	6
4.4	Oxidpartiklar	9
4.5	Tappmaterial	12
5	Acceptanskriterier	13
5.1	Detaljerade krav vid OFP	13
	Referenser	14

1 Inledning

SSM har i sin begäran om komplettering av SKB:s ansökan om slutförvar önskat en redovisning av karakteristik och storlek för de defekter som oförstörande provning (OFP) ska detektera i kapselns olika delar enligt punkt 2 och 3 i SSM (2012).

Huvudsyftet med dokumentet är att beskriva de defekter som kan uppstå vid svetsning i 5 cm kopparkapslar med friction stir welding (FSW) och utgöra en kravbild för den del av FSW-processens kvalitetssäkring som kommer att kräva oförstörande provning. De viktigaste delarna utgörs av:

- detaljerad beskrivning av defekter.
- identifiering av eventuell specifik defektkarakteristik som OFP ska kunna detektera.
- acceptanskriterier för varje defekttyp som funktion av läge i svetsområdet.

Den kravbild som definieras grundas på den kunskapsnivå som idag finns och är alltså preliminär. Ett systematiskt fortsatt arbete behövs för att vidare underbygga och slutligen fastställa kraven.

2 Avgränsningar

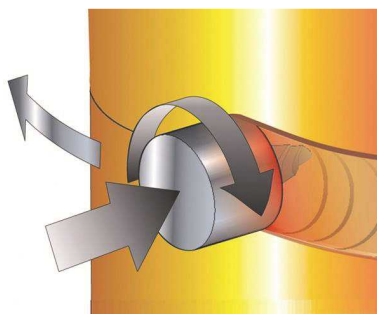
Dokumentet syftar till att beskriva den kravbild avseende olika defekters förekomst och storlek som relaterar till kapselns långsiktiga säkerhet. Dokumentet behandlar således enbart kravbilden avseende säkerhet efter förslutning av slutförvaret. Referensutförningen anger att såväl kopparhöljets botten och lock ska svetsas. Någon skillnad i krav avseende de båda svetsarna föreligger inte. I dokumentet beskrivs t ex defekternas position och kraven med hänsyn till locksvetsens geometri, och eftersom botten svetsens geometri är väldigt snarlik så behandlas inte skillnader i detta dokument.

3 Svetsprocess

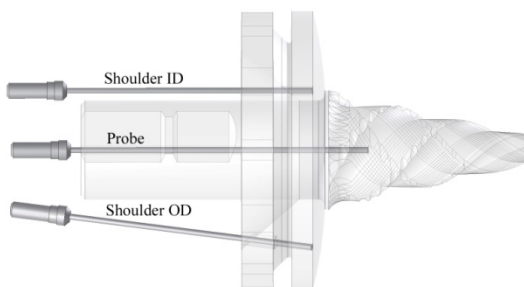
För att kunna följa beskrivningen hur och varför defekter uppstår behövs en beskrivning av svetsprocessen. Principen för den svetsprocess som har utvecklats illustreras i Figur 3-1, som visar de tre svetsparametrar som kan ändras under svetsning och därmed huvudsakligen påverkar defektbildning; svets hastighet längs foglinjen, verktygets rotationshastighet och den kraft som verktyget trycker mot kapseln med för att ha rätt djup. Förutom dessa svetsparametrar som kan justeras under svetsning så finns det flera andra parametrar som påverkar svetsresultatet; t ex svetsverktygets geometri, eventuell vinkel mellan verktyget och kapselytan, samt svetsriktning och verktygets rotationsriktning. De defekter som beskrivs i dokumentet är de som kan uppstå vid gällande svets- och rotationsriktning, där verktyget förflyttas medsols runt fogen och roterar medsols. T ex så blir rotdefekternas form och kaviteternas lokalisering annorlunda med annan svets- eller rotationsriktning.

Figur 3-2 visar de termoelement som mäter temperaturen vid svetsning. Den uppmätta temperaturen för termoelementet i mitten, som mäter temperaturen 1 cm ner i tappen, har visat sig korrelera väl med formationen av defekttypen kaviteter. Denna temperaturmätning kan också korreleras till tappbrott vid höga temperaturer. En annan defekttyp, rotdefekterna, kan korreleras till tappspetsens djup/position från kapselytan. Defekttypen oxidpartiklar minimeras med hjälp av en argonkammare runt svetsverktyget och foglinjen, men eftersom syre ändå finns närvarande i nuvarande kammare så produceras oxidpartiklar.

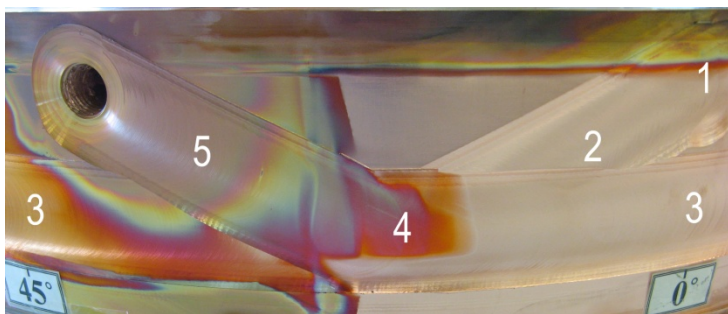
Vid beskrivningen av defekterna nämns ofta vid vilken position längs svetscykeln som defekterna uppstår. Figur 3-3 visar namnen på de sekvenser som förekommer i en svetscykel.



Figur 3-1. Illustration av svetsprocessen.



Figur 3-2. Svetsverktyg och placering av termoelement.



Figur 3-3. Sekvenser i svetscykel: 1. Start, 2. Nedgång, 3. Foglinje, 4. Överlapp, 5. Parkering.

4 Defekter som kan uppkomma vid FSW av kapselns kopparhölje

Denna sammanställning av defekter som kan uppkomma vid friction stir welding av kapselns kopparhölje baseras på de mycket omfattande provsvetsningar som genomförts vid Kapsellaboratoriet och de därtill kopplade undersökningar.

För denna kartläggning av defekter har flera angreppssätt använts:

- Indikationer från OFP av svetsar utförda vid Kapsellaboratoriet har undersökts. Indikationerna och slumpmässigt utvalda prov har verifierats och undersökts genom metallografiska undersökningar och mikrofokusdatortomografi.
- Undersökningar av områden där svetsprocessen har varit utanför processfönstret. I utvalda områden har delar kapats ut för vidare undersökning med framförallt röntgen och slutligen med metallografi.
- Vidare har flera metallografiska undersökningar av oberoende laboratorier gett information om framförallt små defekter eller andra avvikelser som inte påvisas vid OFP.

4.1 Defektbeskrivning enligt standard

ISO-standarderna för FSW, Friction stir welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements (SS-EN ISO 25239-5:2012), beskriver de defekter som kan uppstå vid FSW i aluminium och dess legeringar. Eftersom defektbildning vid FSW i koppar eller aluminium i stort sett är likvärdig, så kan denna defektkaraktärisering användas i detta dokument.

Vissa av de beskrivna defekterna i standarden är dock specifika för vissa foggeometrier och t ex ”skägg” (engelska: flash) och ”oregelbunden yta” anses inte relevanta vid FSW av kopparkapslar eftersom de avlägsnas när ytan bearbetas efter svetsning. Tabell 4-1 visar de relevanta defekttyper från standarden som kan uppstå.

Utöver defekterna i tabell 4-1 så kan det produceras ytterligare två typer av defekter vid svetsning av kopparkapslar; oxidpartiklar och tappmaterial i svetsgodset.

Tabell 4-1. Relevanta defekter angivna i SS-EN ISO 25239-5:2012.

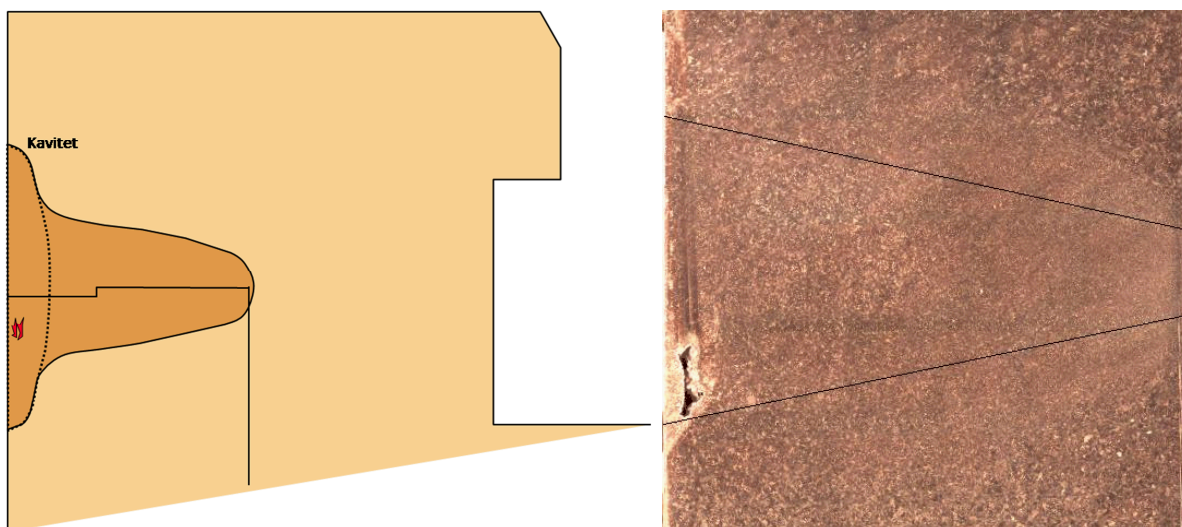
Benämning i detta dokument	Benämning i SS-EN ISO 25239-5:2012	Illustration
Kavitet	Cavity d = maximum transverse cross-sectional dimension of cavity (mm)	
Foglinjeböjning	Hook t = nominal thickness of parent material (mm) h = height of an imperfection (mm)	
Kvarvarande fog	Incomplete penetration t = nominal thickness of parent material (mm) h = height of an imperfection (mm)	

4.2 Kavitet

Kaviteter på den så kallade ”advancing” sidan av verktyget (SS-EN ISO 25239-1:2012), vilket innebär nedanför svetsverktygets centrum enligt gällande svets- och rotationsriktning. Eftersom de enda svetsparametrarna som varierar vid svetsning av kapslarna är verktygets rotationshastighet och den kraft som verktyget trycker mot kapseln med så korrelerar den uppmätta tapptemperaturen (se Figur 3-2) väl med uppkomst av kaviteter (Cederqvist 2011). Kaviteter bildas när tapptemperaturen går under processfönstrets lägre gräns, 790°C. Vid tapptemperatur mellan cirka 750-790°C är kaviteterna inneslutna (se Figur 4-1) och vid lägre tapptemperatur än 750°C kan de bli ytbrytande.

4.2.1 Beskrivning av kavitet

Kaviteter, se figur 4-1 och tabell 4-2, bildas i den yttre delen av svetsen nedanför svetsverktygets centrum. Kaviteter är normalt inneslutna men kan bli ytbrytande vid bearbetning efter svetsning då kapselns svetsområde bearbetas från Ø1060 till Ø1050 mm. Kavitetens utbredning längs svetsriktningen beror på hur länge tapptemperaturen är under processfönstrets lägre gräns, dvs en tillfällig nedgång av temperaturen leder till en kort kavitet (någon centimeter) längs omkretsen medan den blir lång och sammanhängande ifall temperaturen är under gränsen under en längre tid. Kaviteterna har oregelbunden form.



Figur 4-1. Schematisk skiss av kavitet (vänster) och snitbild av innesluten kavitet erhållen vid tapptemperatur på 784°C med inritat läge för tapp (höger).

Tabell 4-2. Beskrivning av kaviteter.

Nominell position färdigbearbetad kapsel [mm]			Beskrivning	
Axiell (från lockets ovansida)	Radiell (från yttre mantelytan)	Omkretsledd	Orientering	Form
60-80*	0-20	Slumpmässig	Slumpmässig	Oregelbunden

*Kan förekomma vid 0-60 mm vid nedgångs- och parkeringssekvensen.

4.2.2 Risk för uppkomst av kavitet

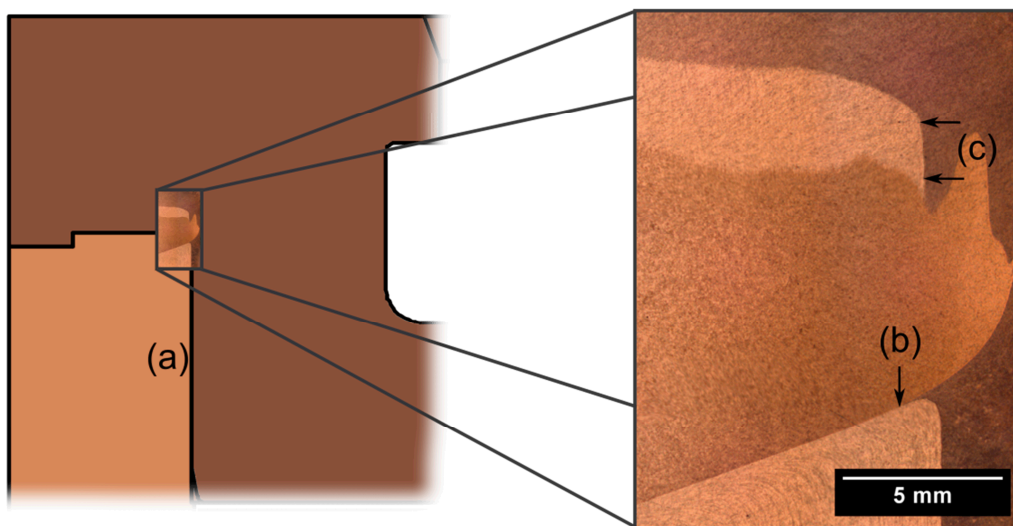
En regulator kontrollerar tapptemperaturen mot ett börvärde på 845°C, och kan normalt kontrollera den inom ±5°C vid foglinjesekvensen (standardavvikelse på mindre än 1°C) (Cederqvist 2011). Detta innebär att risken för att producera kaviteter är mycket liten vid normala svetsbetingelser.

4.3 Rotdefekter - foglinjeböjning/kvarvarande fog/förflyttad skarv

På grund av fogutformningen mellan lock och rör går det inte undvika att rotdefekter, se figur 4-2, som foglinjeböjning eller kvarvarande fog bildas. Dess radiella utbredning är dock möjlig att

kontrollera genom noggrann styrning av svetsprocessen. Utöver dessa defekter finns det dessutom viss risk att del av den vertikala skarven mellan lock och rör förflyttas uppåt.

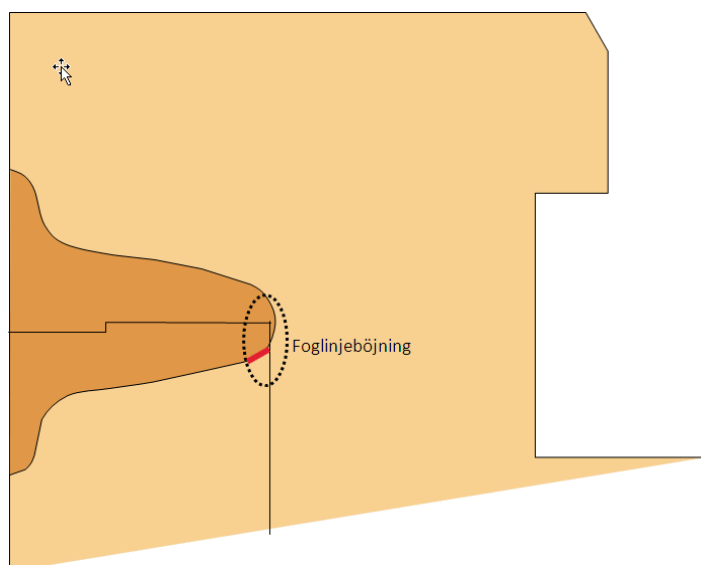
De parametrar som påverkar dessa rotdefekter är: tappens längd, tappens relativa höjdläge mot foglinjen och svetsverktygets djup. Svetsverktygets djup går endast att variera $\pm 0,5$ mm eftersom variationen av den kraft som verktyget trycker med mot kapseln är begränsad.



Figur 4-2. Vertikal skarv (a), foglinjeböjning (b) och förflyttad vertikal skarv (c). Bilden visar foglinjeböjning på drygt 1 mm och förflyttad skarv med 52 mm tapp.

4.3.1 Beskrivning av foglinjeböjning

Foglinjeböjning bildas som en icke volymetrisk defekt när den vertikala skarven mellan lock och rör böjs utåt, se figur 4-3 och tabell 4-3, och följer den nedre kanten på svetsen. När dess radiella utbredning är större än 1 mm är vinkeln från det horisontella planet fixerad till $20^\circ \pm 5^\circ$. Foglinjeböjningens utbredning längs svetsriktningen kan variera från någon grad till att finnas längs hela svetsen.



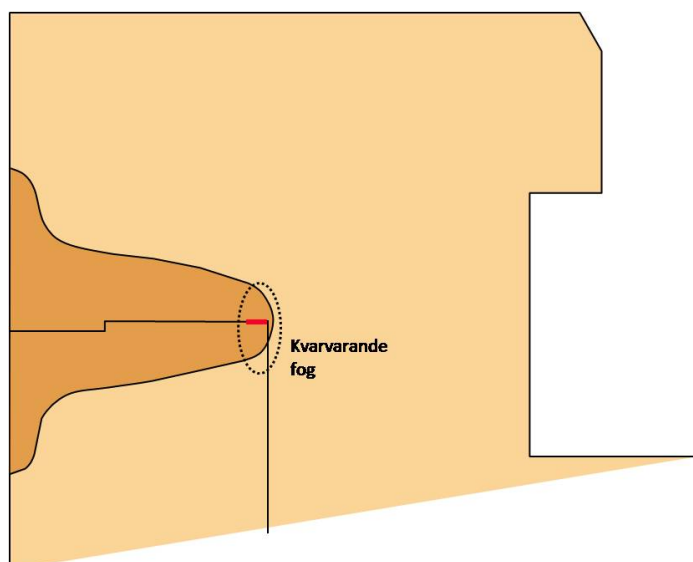
Figur 4-3. Schematisk skiss av foglinjeböjning.

Tabell 4-3. Beskrivning av foglinjeböjning.

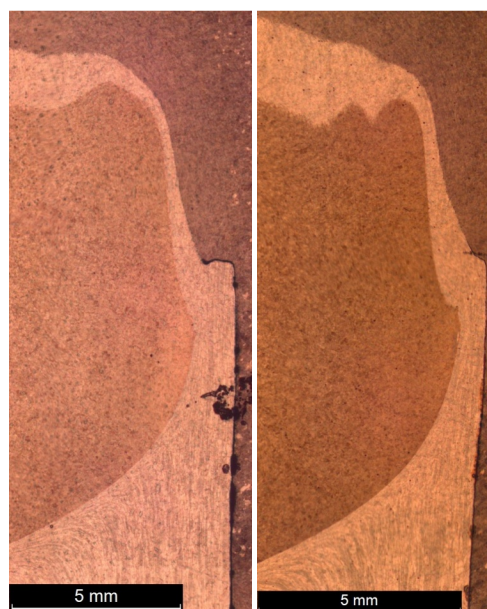
Nominell position färdigbearbetad kapsel [mm]			Beskrivning	
Axiell (från lockets ovansida)	Radiell (från mantelytan)	Omkretsledd	Orientering	Form
60-75	40-50	Slumpmässig	20°±5° från horisontella planet	Följer nedre svetskonturen

4.3.2 Beskrivning av kvarvarande fog

Kvarvarande fog bildas som en icke volymetrisk (plan) defekt när verktyget inte svetsar tillräckligt djupt, se figur 4-4 och tabell 4-4. Ifall den kvarvarande fogen är större än 1 mm så är den orienterad horisontellt, se figur 4-5. I figur 4-5 visas även resultatet med 48 och 49 mm tapp, där den horisontella delen av (kvarvarande) fogen i princip är obefintlig, och vinkeln på den böjda fogen kan variera beroende på tappspetsens position relativt vertikala skarven. Den kvarvarande fogens utbredning längs svetsriktningen kan variera från någon grad till att finnas längs hela svetsen.



Figur 4-4. Schematisk skiss av kvarvarande fog.



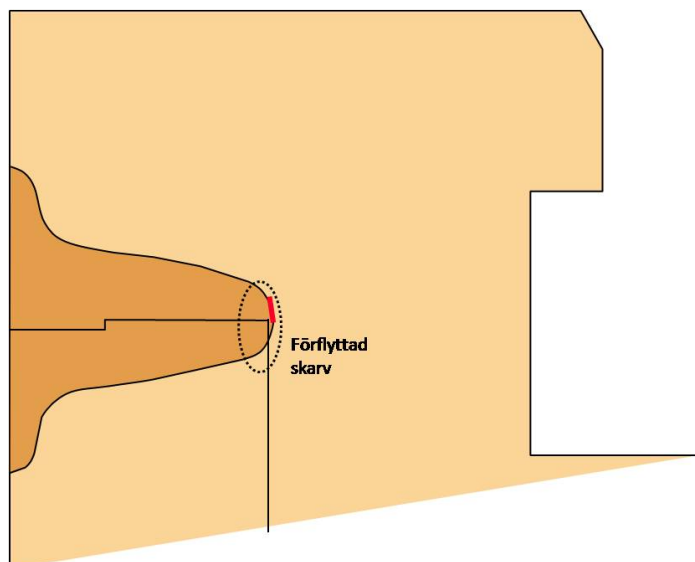
Figur 4-5. Kvarvarande fog (vänster) med 48 mm tapp, böjd kvarvarande fog (höger) med 49 mm tapp (slipprepa slutar i närheten av böjda fogens slut).

Tabell 4-4. Beskrivning av kvarvarande fog.

Nominell position färdigbearbetad kapsel [mm]			Beskrivning	
Axiell (från lockets ovansida)	Radiell (från mantelytan)	Omkretsledd	Orientering	Form
60	40-50	Slumpmässig	Horisontell (när större än 1 mm)	Plan

4.3.3 Beskrivning av förflyttad skarv

Förflyttad skarv, se figur 4-2, figur 4-6 och tabell 4-5, uppkommer på grund av ett materialflöde runt verktygstappens spets. Den förflyttade skarvens ändlägen markeras av pilarna (c) i figur 4-2.



Figur 4-6. Schematisk skiss av förflyttad skarv.

Tabell 4-5. Beskrivning av förflyttad skarv.

Nominell position färdigbearbetad kapsel [mm]			Beskrivning	
Axiell (från lockets ovasida)	Radiell (från mantelytan)	Omkretsledd	Orientering	Form
40-60	45-50	Slumpmässig	Vertikal	Plan

4.3.4 Risk för uppkomst av foglinjeböjning/kvarvarande fog

Eftersom tappspetsens position relativt den vertikala skarven mellan lock och rör (a i Figur 4-2) varierar under en svets, bland annat på grund av termisk expansion av kapseln, så kommer alltid foglinjeböjning och/eller kvarvarande fog förekomma. Med hjälp av att tappens längd och vertikala positionering relativt fogen har optimerats och en regulator kan kontrollera svetsdjupet, så kan foglinjeböjningen/kvarvarande fog kontrolleras till en radiell utbredning på mindre än 2 mm.

4.3.5 Risk för uppkomst av förflyttad skarv

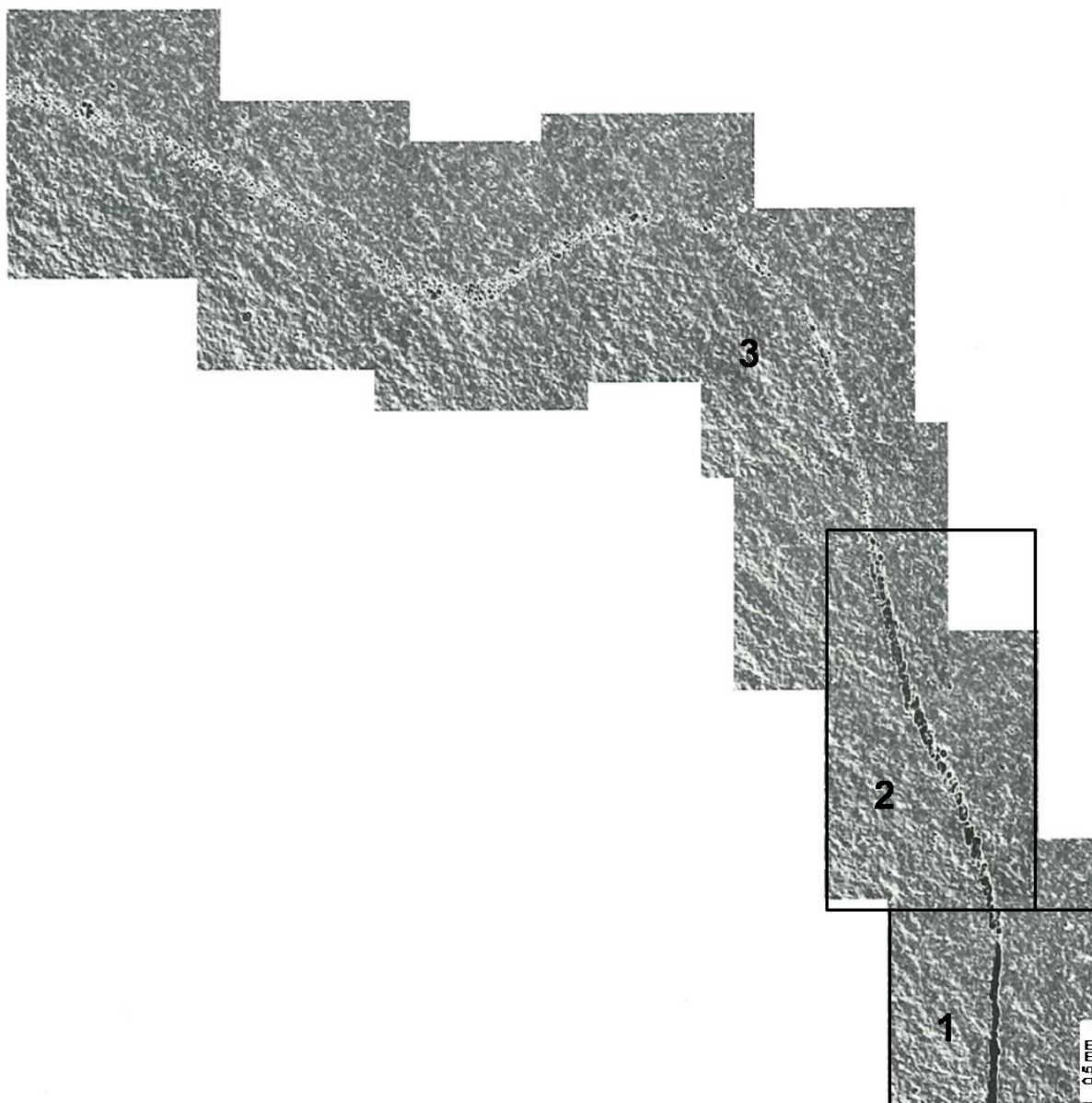
Den förflyttade skarven kan som mest förflyttas lika mycket som tappspetsens diameter (7 mm). I och med att området mellan den ursprungliga skarven och den förflyttade skarven svetsas reduceras inte korrosionsbarriären och därmed behöver denna defekt inte detekteras vid oförstörande provning av svetsen.

4.4 Oxidpartiklar

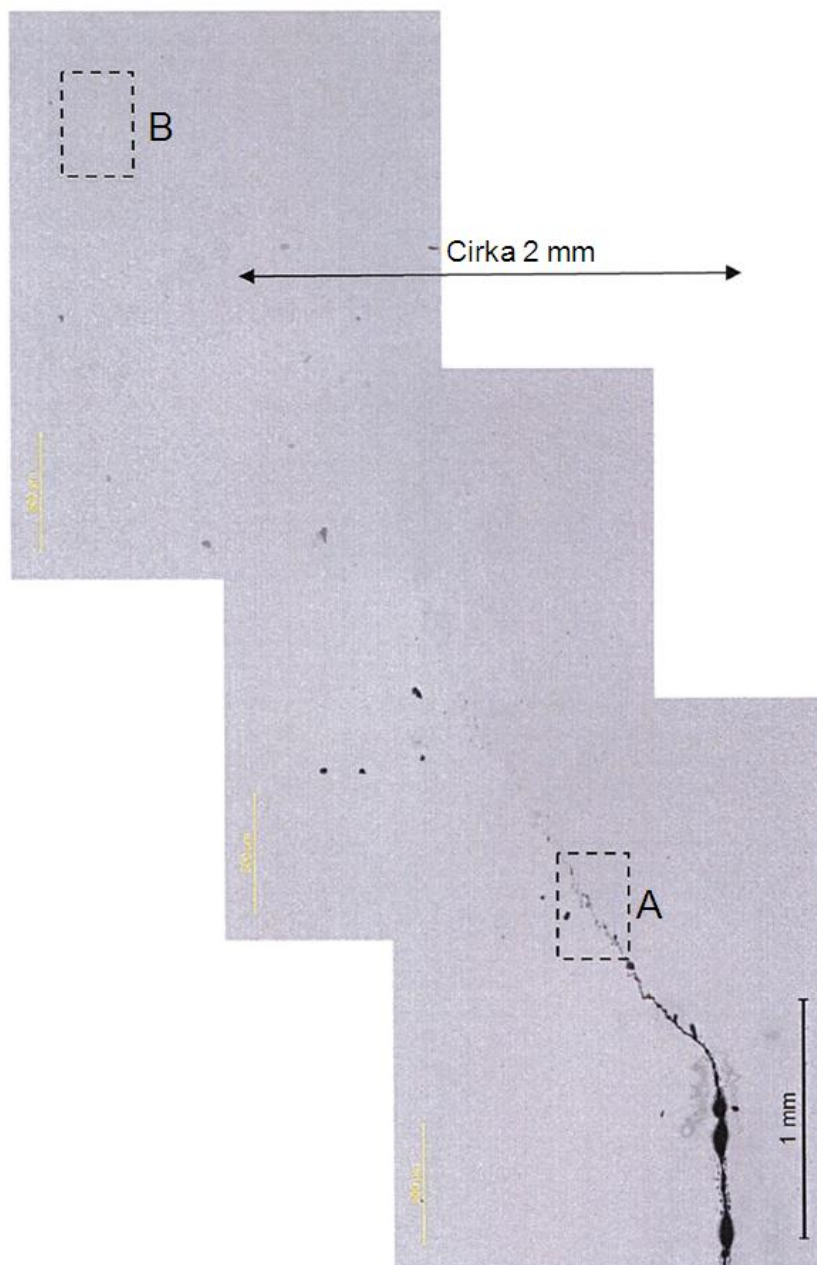
Ett forskningsprogram avseende förekomst av oxidpartiklar i svetsen har genomförts sedan Fud-program 2010 (SKB 2010a). Ett antal svetsar, varav fyra fullvarvscykler, har utförts med ett förbättrat yttre gasskydd runt svetshuvud och längs hela foglinjen. Svetsning med detta gasskydd medför att mängden oxidpartiklar i svetsen har reducerats kraftigt. Figur 4-7 visar en svets utförd i luft i vilken oxidpartikelstråket kunde identifieras gå genom hela det preparerade området (22 mm från roten av svetsen (SKBdoc 1275007)). Ett exempel på ett metallografiskt tvärsnitt av en svets utförd med gasskyddet visas i Figur 4-8 vilket innehåller en mindre mängd av oxidpartiklar. Metallografin är utförd vid två olika tillfällen därav det olika utseendet/kontrasten på bilderna. De områden av svetsen där oxidpartiklar kan finnas genom hela svetsen är i huvudsak under starthålet och i överlappsområdet.

Som kan ses i Figur 4-7 och 4-8 kan oxidstråkens riktning variera mellan (relativt kapselns axlar) axiellt och radiellt. På svetsar utförda i luft kan ett oxidstråk finnas längs hela svetsen (SKBdoc 1268001).

Stråk av oxidpartiklar har inte kunnat påvisas med ultraljudsprovning. Den enda metod som har påvisat förekomsten är metallografiska undersökningar. Det bör noteras att de oxidstråk som uppkommer vid svetsning i luft inte har visat ha någon direkt observerbar påverkan vid krypprovning (Andersson-Östling och Sandström 2009). Det samma gäller vid korrosionsförsök (Gubner och Andersson 2007).



Figur 4-7. Exempel på oxidpartiklar i en svets (FSWL75, SKBdoc 1275007) utförd i luft. Skalstrecket motsvarar 0.5 mm. Notera att provprepareringen överaccentuerar storleken på oxidinneslutningarna. Notera att ruta 1 innehåller vertikala skarven, och ruta 2 innehåller kvarvarande fog, och 3 är det så kallade stråket innehållandes oxidpartiklar.



Figur 4-8. Exempel på oxidpartiklar i en svets (FSWL84, SKBdoc 1315187) utförd med skyddsgas runt hela utsidan av svetsen. Skallstrecket motsvarar 1 mm. Notera att prepareringen överaccentuerar storleken på oxidinneslutningarna. Oxidpartiklar kunde identifieras i region A men inte i B. Notera att kvarvarande fog finns före region A.

4.4.1 Risk för uppkomst av oxidpartiklar

Oxidpartiklar uppkommer under svetsprocessen när syre finns att tillgå och temperaturen är tillräckligt hög. Svetsning under skyddsgas reducerar uppkomsten av oxidpartiklar. Under svetsprocessen är det tänkt att halten syre runt svetsen kommer att övervakas och acceptanskriterium för tillåten gassammansättning kommer att fastställas genom modellering av oxideringsprocessen samt verifierande experiment.

Oxider kan även finnas på foytorna före svetsning. Detta minimeras i nuläget genom att fogbereda ytorna genom torrbearbetning alternativt slipning. Detta ger ett oxidskikt på 10 nm (SKBdoc 1407846).

Notera att de resultat som presenteras är från svetsar med ett experimentellt gasskydd som är under utveckling.

Förekomst av oxidpartiklar kommer att minimeras genom processkontroll av atmosfären vid svetsning och därmed behöver denna defekt inte beaktas vid oförstörande provning av svetsen.

4.5 Tappmaterial

Initialt när verktygstappen inte var ytbelagd kunde spår av nickel (21 ppm) och kobolt (9 ppm) hittas i svetsgodset (SKB 2010a). Efter att tapparna ytbelagts med kromnitrid (CrN), som är ett mycket hårt och nötningsbeständigt material, har inga spår av tappmaterial påvisats i svetsgodset (SKB 2010a). Istället är denna defekt ett tappbrott när tappen eller en del av tappen finns kvar i svetsgodset. Ett tappbrott noteras direkt i svetsdata då det medför ett stort fall i värmeförlusten från verktyget, och eftersom visuell kontroll av tappen sker efter svetsning så skulle man även där upptäcka tappbrott, eftersom alla tappbrott som inträffat har inneburit att minst 25 mm tapp brutits av och lämnats i svetsgodset.

4.5.1 Risk för förekomst av rester av tappen i svetsgodset

Forcerade svetsprov där tapptemperaturen ökats kontinuerligt tills tappbrott visar att brott uppstår över 910°C. Det bör samtidigt påpekas att en ytbelagd tapp klarade en temperaturtopp på över 930°C utan brott. Två tappar har också testats vid 4 fullvarvsvetsar var där regulatören kontrollerat tapptemperaturen mot 845°C, och båda tapparna klarade de 4 svetsarna utan brott (Cederqvist 2011). Med hänsyn till detta bedöms risken för tappbrott vara mycket liten.

Eventuella rester av tappmaterial i svetsgodset kommer att kontrolleras genom specifik kontroll av verktyget efter svetsning och därmed behöver denna defekt inte beaktas vid oförstörande provning av svetsen.

5 Acceptanskriterier

Kapselns referensutförning enligt SKB (2010b) anger inga specificerade krav avseende defekter i kopparhöljet. Initialtillståndsbeskrivningen som är det underlag som användes för säkerhetsanalysen SR-Site anger att den maximala defektstorleken med hänsyn till reduktion av kopparbarriären inte förväntas överstiga 10 mm.

Som framgår av kapitel 4 i Raiko et al. (2010) uppstår inte spricktillväxt vid brottmekanisk provning av koppar. Dessutom framgår att den lokala krypduktiliteten vid notchar under dragbelastning är hög. Ur mekanisk integritetssynpunkt tillkommer därför inga krav avseende defekter.

5.1 Detaljerade krav vid OFP

Kraven på detektering och storleksbestämning utgår från initialtillståndsbeskrivningen (SKB 2010b, s 106) där en maximal reduktion av koppartjockleken på 10 mm har definierats.

Som framgår av defektbeskrivningen är defekttyperna foglinjeböjning och kvarvarande fog rotdefekter och kan inte förekomma parallellt. Defekttypen kavitet kan bildas oberoende av rotdefekterna och den radiella utbredningen måste adderas till sammanfallande rotdefekter.

Tabell 5-1. Krav på detektering och storleksbestämning av defekter vid OFP av lock- och bottenhetsar.

Defekt	Krav på detektering, radiell utbredning ¹⁾	Krav på storleksbestämning för att säkerställa radiell utbredning ²⁾	Krav på axiell lägebestämning	Krav på bestämning i omkretsledd
Kavitet	≥5 mm	≤ 5 mm	N/A	N/A
Foglinjeböjning	≥5 mm	≤ 5 mm	N/A	N/A
Kvarvarande fog	≥5 mm	≤ 5 mm	N/A	N/A

¹⁾ Innebär att alla defekter större än eller lika med 5 mm radiell utbredning ska detekteras.

²⁾ Innebär att storleksbestämningen ska säkerställa att ingen defekt överskrider 5 mm radiell utbredning.

Referenser

Andersson-Östling H C M, Sandström R, 2009. Survey of creep properties of copper intended for nuclear waste disposal. SKB TR-09-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Cederqvist L, 2011. Friction stir welding of copper canisters using power and temperature control. PhD thesis. Lund University.

Gubner R, Andersson U, 2007. Corrosion resistance of copper canister weld material. SKB TR-07-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Raiko H, Sandström R, Rydén H, Johansson M, 2010. Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010a. Fud-program 2010. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010b. Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SS-EN ISO 25239-1:2012. Friction stir welding – Aluminium – Part 1: Vocabulary. Stockholm: Swedish Standards Institute.

SS-EN ISO 25239-5:2012. Friction stir welding – Aluminium – Part 5: Quality and inspection requirements. Stockholm: Swedish Standards Institute.

SSM, 2012. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvar av använt kärnbränsle och kärnavfall – kontroll och provning för fastställande av kapselns initialtillstånd. SSM2011-2426-59, Strålsäkerhetsmyndigheten.

Opublicerade dokument

SKBdoc id, version	Titel	Utfärdare, år
1268001 ver 2.0	Provberedningsmetod av FSW-svets med elektrolytisk polering	Exova AB, 2011
1275007 ver 2.0	Undersökning av inneslutningar i flödeslinjer (PLI): FSWL45 & FSWL75	Exova AB, 2011
1315187 ver 1.0	Undersökning av inneslutningar i flödeslinjer (PLI): FSWL77 & FSWL84	Exova AB, 2011
1407846 ver 1.0	Undersökning av rengöringsmetoder och oxidation av kopparytor i ädelgas med GD-OES	SKB, 2013