

R-05-73

**Friktionssvetsning av
kopparkapslar rapport 1
Statusrapport till 2005-06-31**

Svensk Kärnbränslehantering AB

December 2005

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
SE-102 40 Stockholm Sweden
Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00
Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-05-73

**Friktionsvetsning av
kopparkapslar rapport 1
Statusrapport till 2005-06-31**

Svensk Kärnbränslehantering AB

December 2005

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar utvecklingen av friktionssvetsning (Friction Stir Welding, FSW) vid Kapsellaboratoriet under perioden 2003-04-15 till 2005-06-31. Rapporten beskriver resultaten från 49 locksvetsar i 5 cm tjock koppar utförda vid Kapsellaboratoriet under perioden.

Flera viktiga tekniska framsteg har gjorts under perioden. T ex har en ny starthålsutformning och placering tagits fram och en adaptiv process har utvecklats.

Ett omfattande provprogram enligt Fud 2004 har utförts på Kapsellaboratoriet för att testa svetsystemets och svetsprocessens prestanda med fokus på kapacitet, tillgänglighet och tillförlitlighet samt svetsgodsets egenskaper. I provprogrammet har bland annat parameterstudie, fullskalesvetsning och seriesvetsning utförts. Samtliga svetsprov har undersökts med oförstörande provning, både före och efter bearbetning. Många svetsprover är också undersökta med förstörande provning för att kartlägga struktur och materialegenskaper i svetsgodset.

Det svetsystem som installerades på Kapsellaboratoriet i mars–april 2003 har visat sig vara mycket robust och tillförlitligt, och tillgängligheten har varit mycket hög.

Processen har visat god repeterbarhet och stabilitet och har inte visat sig vara känslig för förändringar i omgivande miljö. Vare sig det rör sig om lock eller botten svetsar, dvs med eller utan insats har processen levererat liknande resultat. Processfönstret, dvs det intervall inom vilket svetsparametrarna får variera, är relativt stort och den uppnådda svetskvaliteten har varit mycket hög, vilket också demonstrerades vid seriesvetsningen.

Trots att svetsmetodens potential för svetsning av botten och för förslutningssvetsning i Inkapplingsanläggningen är uppenbar så finns det behov av utveckling och förbättring i vissa områden. Bl a kontrolleras och styrs processen för närvarande manuellt. Mjukvaran för styrning av processen kommer att utvecklas så att processen kan ske automatiskt för att eliminera/minimera den mänskliga faktorn samt för att öka tillförlitligheten ytterligare. Även svetsverktygets säkerhetsfaktor mot brott, dvs livslängd, och svetsgodsets materialegenskaper ska undersökas ytterligare.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Mål	7
1.2	Bakgrund	7
2	Svetsprocess	9
2.1	Princip	9
2.2	Parametrar	10
2.3	Svetscykel	10
3	Svetsystem	13
3.1	Princip	14
3.2	Svetsverktyg	15
3.3	Processövervakning	16
4	Process- och systemutveckling	17
4.1	Processutveckling	18
4.1.1	Processtyrning	18
4.1.2	Svetsparametrar	18
4.1.3	Starthålsutformning och placering	19
4.1.4	Fogutformning	20
4.2	Systemutveckling	21
4.2.1	Svetsverktyg	21
4.2.2	Processövervakning	22
4.3	Locksvetsar	23
5	Resultat och erfarenheter	27
5.1	Svetsprocess	27
5.1.1	Uppnådd kvalitet vid demonstrationsserien	27
5.1.2	Uppnådd kvalitet vid fullskalig svetsning	27
5.1.3	Uppnådd kvalitet vid övriga locksvetsar	28
5.1.4	Observerade diskontinuiteter	28
5.1.5	Processfönster	29
5.2	Svetsystem	30
5.2.1	Systemets tillgänglighet sedan installation	30
5.2.2	Svetsverktyg	31
5.3	Svetsgodsets materialegenskaper	31
5.3.1	Metallografisk undersökning	31
5.3.2	Krypegenskaper	31
5.3.3	Hållfasthetsegenskaper	31
5.3.4	Föroreningar	33
5.3.5	Restspänningar	34
5.3.6	Korrosion	34
6	Framtida utvecklingsmöjligheter och behov	35
6.1	Svetsprocess	35
6.2	Svetsystemet	35
7	Slutsatser	37

Referenser	39
Bilaga 1 Sammanfattning av locksvetsar	41
Bilaga 2 Resultat vid locksvets på TWI	43
Bilaga 3 Påvisade diskontinuiteter	45

1 Inledning

Denna rapport sammanfattar utvecklingen av friktionssvetsning (Friction Stir Welding, FSW) vid Svensk Kärnbränslehantering AB:s kapsellaboratorium under perioden 2003-04-15 till 2005-06-31. Rapporten beskriver resultaten från 49 locksvetsar i 5 cm tjock koppar utförda vid Kapsellaboratoriet under perioden. Rapporten redogör också den framtida handlingslinjen för att färdigutveckla och produktionsanpassa processen och systemet.

Denna rapport sammanfattar utvecklingsarbetet på Kapsellaboratoriet. Under 2006 lämnar SKB ytterligare två redovisningar inom området förslutning med FSW. I rapporten Kapsel för använt kärnbränsle – Svetsning vid tillverkning och förslutning identifieras kraven som ställs på svetsprocessen. Viktiga krav härleds från konstruktionsförutsättningarna och kvalificeringsprogrammet och vidare analyseras om de ställda kraven uppfylls och handlingsplaner för att uppfylla kraven redovisas. En säkerhetsanalys redovisar tillförlitligheten vid förslutningsprocessen. Rapporten behandlar det delsystem bestående av svetsning och oförstörande provning som kommer att finnas i Inkapslingsanläggningen.

Svetsning planeras för närvarande att ske vid två tillfällen i det framtida produktions-systemet; dels vid svetsning av kopparbotten till kopparröret och dels vid förslutnings-svetsning av kopparlocket. Svetsning av båda momenten är likartad då botten och locket har snarlik utformning. En tydlig skillnad är dock att locket svetsas till en kapsel innehållande radioaktivt bränsle, vilket kräver väsentligt större säkerhetsarrangemang samt fjärrstyrning av processen. Dessutom planeras botten svetsas på röret liggande på grund av produktionstekniska fördelar medan förslutningssvetsen ska göras på en stående kapsel.

1.1 Mål

Utvecklingsarbetets mål har varit att utveckla, demonstrera och dokumentera FSW som tillverknings- och förslutningsmetod för kapslar med 5 cm godstjocklek.

Detta mål innebär att en tillförlitlig process och ett robust system som kan åstadkomma en reproducerbar svets med hög kvalitet skall utvecklas.

Syfte och resultat för varje enskild locksvets har sammanfattats i bilaga 1 och en utförligare beskrivning finns i kapitel 4.3.

1.2 Bakgrund

1997 bestämde sig SKB för att undersöka FSW:s potential att sammanfoga 5 cm tjock koppar och man anlidade The Welding Institute (TWI) i Cambridge, England för detta /Andrews 2004/. Undersökningarna visade att FSW var en möjlig metod för svetsning i tjock koppar men att det fanns några tekniska svårigheter. För att komma vidare utvecklades en experimentell svetsmaskin på TWI och en lämplig utformning av svetsverktyget fastlades. Utvecklingsarbetet på TWI fokuserade sedan på att utveckla ett svetsverktyg som skulle klara av en hel svetscykel utan brott och synbart slitage. Ett verktyg utvecklades som klarade detta med god marginal.

Utvecklingsarbetet på den experimentella svetsmaskinen vid TWI avslutades med att det första locket svetsades på ett avkortat rör i januari 2003. Resultatet visade dock att den utvecklade processen inte hade den stabilitet och reproducerbarhet som krävs i produktion, se bilaga 2.

2 Svetsprocess

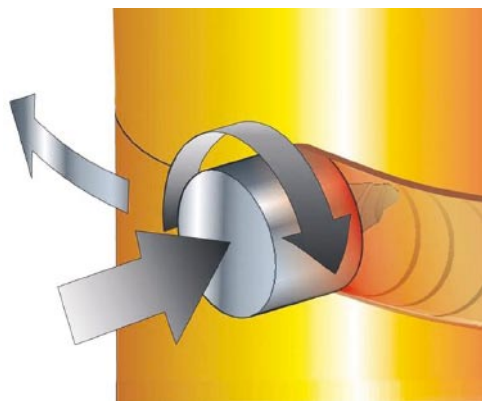
Friction stir welding, FSW, är en variant av friktionssvetsning och uppfanns 1991 på TWI. FSW är en termomekanisk fasttillståndprocess, dvs inte en smältsvetsmetod. Detta innebär att de materialförändringar som uppstår vid smältsvetsning såsom korntillväxt och segringsfenomen kan undvikas. Den resulterande strukturen vid FSW i koppar liknar den som uppstår vid varmformning av kopparkomponenterna i kapseln.

2.1 Princip

Ett roterande verktyg bestående av en konisk tapp och skuldra, se figur 2-1, pressas ner i svetsgodset. Tappens funktion är att genom friktion värma upp svetsgodset och genom sin form och rotation tvinga godset att flyta runt dess form och skapa en svets. Skuldrans funktion är att genom friktion värma upp godset och förhindra att godset pressas ur svetsen. Figur 2-2 illustrerar svetsprocessen. Svetsningen sker genom att det roterande verktyget, som hålls på rätt djup relativt kapselytan med en specificerad kraft, förflyttas längs fogen och den mjuka kopparen flyter runt verktygets form.



Figur 2-1. Svetsverktyget.



Figur 2-2. Skiss av FSW-processen.

2.2 Parametrar

En anledning till det snabbt ökande användandet av FSW inom industrin är att metoden har få processparametrar. Detta betyder att processen enkelt kan kontrolleras. Svetsverket roterar med ett specifikt antal varv per minut och förflyttar sig längs fogen med en konstant hastighet. Verktygsskuldrans position i relation till kapselytan kontrolleras sedan med en specifik nedåtriktad kraft. I de flesta fall vinklas också verktyget relativt till svetsobjektet så att verktygsskuldran ”surfar” på ytan.

Förutom de inmatade parametrarna så mäts resulterande parametrar. Dessa är skuldrans djup i svetsgodset, verktygstemperaturen, spindelmotorns moment och kraften på verktyget i framförningsriktningen.

Det finns ett klart samband mellan de inmatade och resulterande parametrarna, bl a så är produkten av spindelmotorns rotationshastighet och moment lika med värmetillförseln och påverkar därmed verktygets temperatur i hög grad. Dessa relativt elementära samband innebär att processen är enkel att tolka, utveckla och kontrollera.

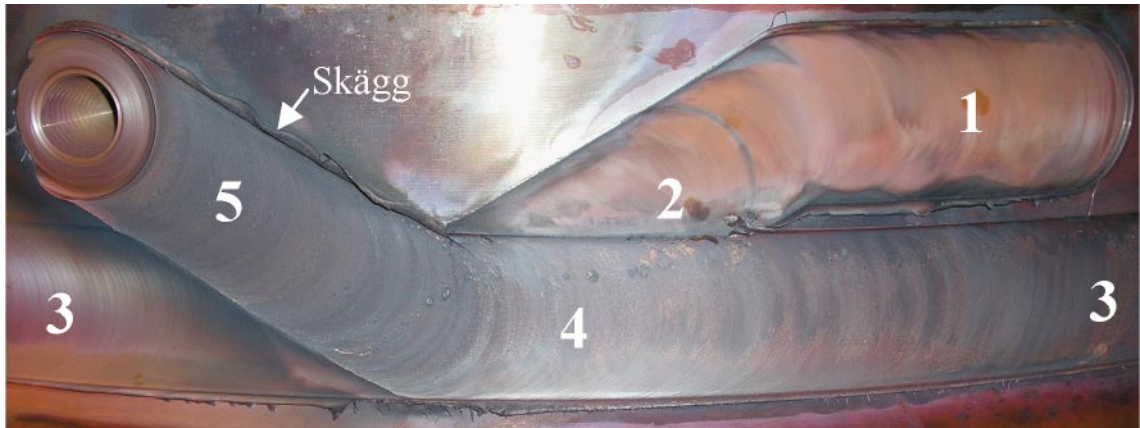
Svetsmaskinen som används vid Kapsellaboratoriet har kylning av både lockklamparna och hållaren för verktyget. Kylningen har dock en sekundär inverkan på processen. Funktionen är att skydda maskinen mot höga temperaturer och minska förslitningsskador på spindelhorn och verktygshållaren.

2.3 Svetscykel

En svetscykel kan delas upp i flera sekvenser, som kan ses i figur 2-3. Först borras ett starthål 75 mm ovanför foglinjen som det roterande verktyget sedan pressas in i så att kopparen värms upp. När verktygstemperaturen har nått ett specifikt värde accelereras svets hastigheten upp till ett konstant värde som en funktion av verktygstemperaturen. Efter att accelerationssekvensen är avslutad och verktygstemperaturen har nått den så kallade jämviktstemperaturen och är stabil förflyttas verktyget ner till foglinjen. Där sker foglinjesvetsningen och efter ett helt varv förflyttas verktyget upp 75 mm där svetscykeln avslutas och det oundvikliga utgångshålet parkeras. Både accelerationssekvensen och utgångshålet bearbetas sedan bort när locket får sina slutgiltiga dimensioner.

Accelerationssekvensen är viktig då den påverkar skäggbildningen och risken för diskontinuiteter under nedgångssekvensen. De övriga sekvenserna, nr 2-5 i figur 2-3, kan sammanföras till den så kallade jämviktssekvensen där alla parametrar håller ett relativt konstant värde.

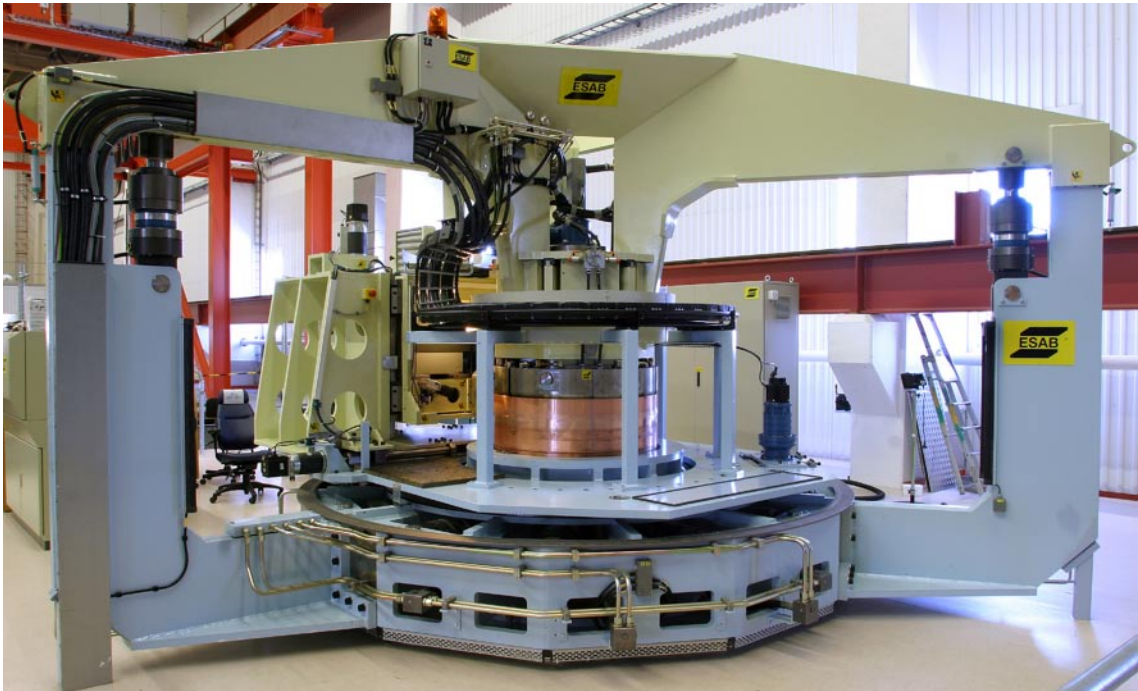
Efter att kapseln är positionerad i maskinen tar det cirka en timme att försluta kapseln inklusive inspanning av kapsel och lock (5 minuter), borring av starthål (5 minuter) och svetsning (50 minuter). Tidsåtgång för svetsoperationen i Inkapslingsanläggningen beräknas vara likvärdig.



Figur 2-3. Sekvenser i svetscykeln: 1. accelerationssekvensen, 2. nedgångssekvensen, 3. foglinjesvetsning, 4. överlappssekvensen och 5. parkeringssekvensen.

3 Svetssystem

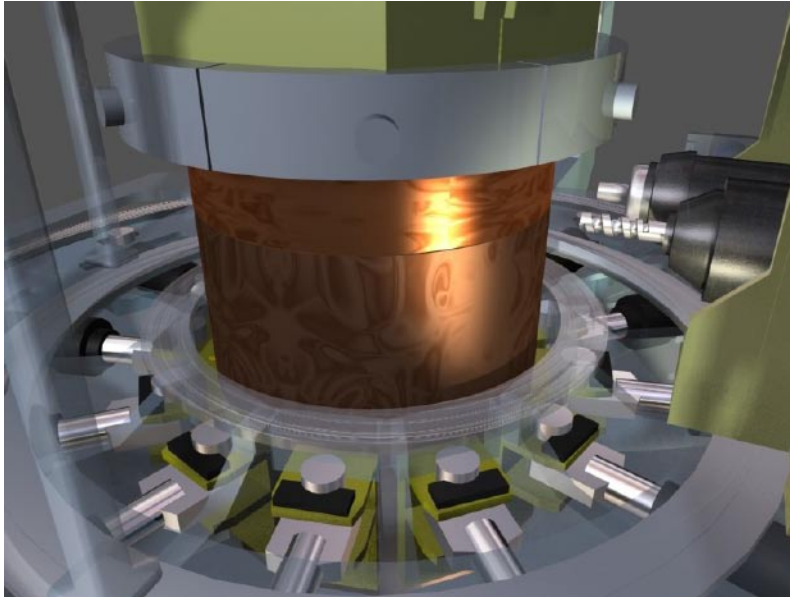
I början av 2002 beställdes ett svetssystem av ESAB AB i Laxå för att kunna svetsa i fullstor skala, se figur 3-1. Systemet har en unik utformning med avseende på hållfasthet och styvhet som säkerställer att den klarar av produktionssvetsning, dvs en locksvets per dag. I slutet av 2002 genomfördes ett fabrikstest på ESAB där de beställda systemfunktionerna testades och godkändes. Ett slutligt leveranstest av det installerade systemet genomfördes och godkändes på Kapsellaboratoriet i april 2003.



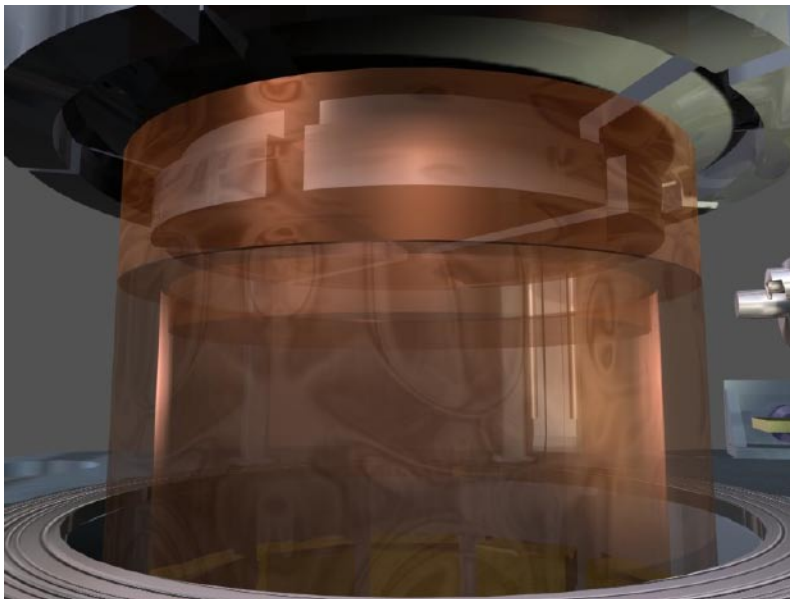
Figur 3-1. Svetssystemet på Kapsellaboratoriet.

3.1 Princip

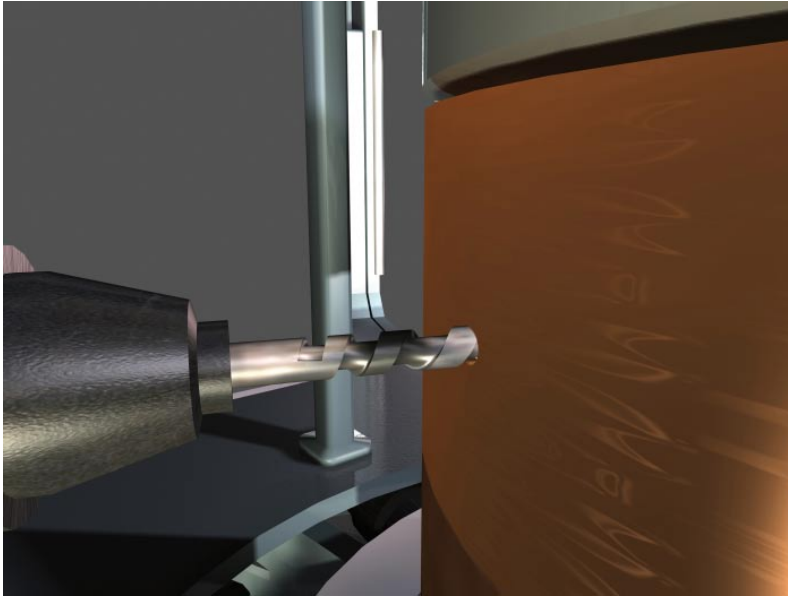
Inför svetsning hissas kapseln upp i systemet med hjälp av kapseltransportören. När kapseln har positionerats i systemet spänns den fast med expanderande tryckbackar, se figur 3-2. Totaltrycket uppgår till 3 200 kN fördelat på 12 backar. I nästa skede expanderas lockklamparna, se figur 3-3, och ett tryck på 390 kN pressar ner locket mot röret. Ett starthål borras, se figur 3-4, med en separat borrenhet vid sidan av spindeln och svetscykeln startar med att verktyget förs in i hålet enligt figur 3-5. Under processen roterar svetshuvudet runt kapseln och den maximala vridningsvinkeln uppgår till 425 grader.



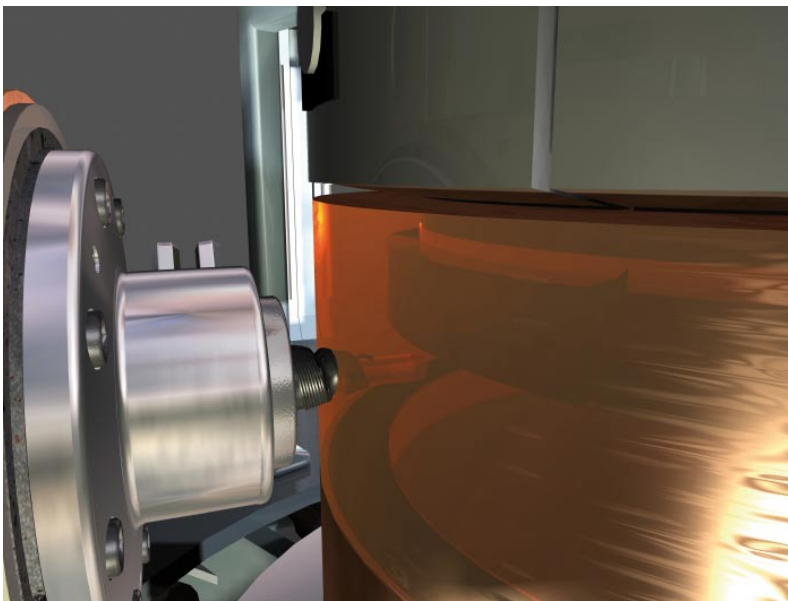
Figur 3-2. Fastspänning av kopparkapsel.



Figur 3-3. Inspänning av lock.



Figur 3-4. Borrning av starthål.



Figur 3-5. Verktog i starthålet.

3.2 Svetsverktyg

Verktyget, se figur 2-1, är en viktig komponent vid FSW av koppar. Verktygets delar måste tåla den höga processtemperaturen liksom de komplexa krafter de utsätts för när upp till fyra meter svets produceras på cirka 50 minuter. Tappens längd bestämmer svetsdjupet och skuldrans diameter måste anpassas efter tappens storlek för att svetsar utan diskontinuiteter ska kunna genereras.

En nickelbaserad superlegering, Nimonic 105, används som material i tappen, eftersom den visade sig kapabel att producera locksvetsar utan brott och synbart slitage. Skuldran tillverkas av en volframlegering, Densimet, som har de termiska egenskaper som krävs.

För närvarande byts verktygstappen efter varje locksvets men det är möjligt att man i produktion kan svetsa flera lock med samma verktygstapp. Kostnaden för verktygstappen är dock relativt låg i sammanhanget, vilket gör det mindre sannolikt att man kommer att använda verktygstapparna till mer än en locksvets i produktion.

3.3 Processövervakning

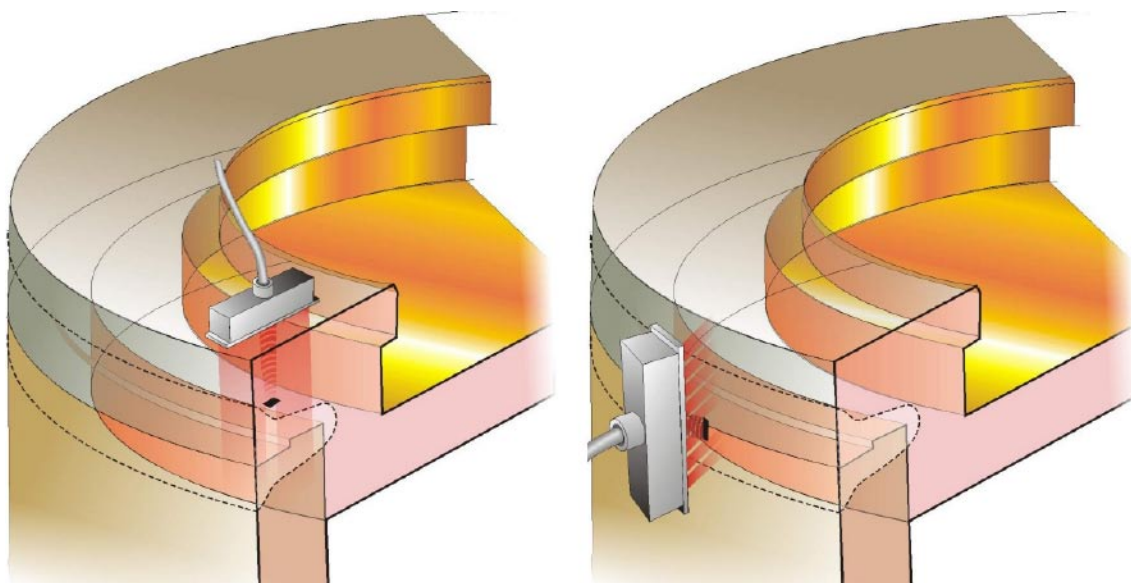
Mjukvaran som övervakar svetsprocessen loggar alla parametrar. Under svetsförloppet visas utvalda parametrar numeriskt och grafiskt för svetsoperatören, samt två videokameror visar och spelar in verktyget bakifrån och framifrån, se figur 3-6. Processövervakningen har förbättrats avsevärt sedan installationen av svetssystemet vilket beskrivs i kapitel 4.2.2.



Figur 3-6. Svetssystemets manöverpanel.

4 Process- och systemutveckling

Detta kapitel sammanfattar utvecklingen av svetsprocessen och svetsystemet på Kapsel-laboratoriet. Parallellt med svetsutvecklingen har oförstörande provningsmetoder (OFP) för FSW i 5 cm tjock koppar utvecklats /Ronneteg 2003/. Röntgen och ultraljudsprovning har använts, där ultraljudsprovningen, se figur 4-1, har visat sig mest lämpad för de diskontinuiteter som kan bildas med FSW i koppar. En viktig del i svetsutvecklingen har varit kvalitets-säkringen av svetsarna med hjälp av OFP samt förstörande provning.



Figur 4-1. Ultraljudsprovning av bearbetad locksvets.

4.1 Processutveckling

Som beskrivs i kapitel 1 har processutvecklingens mål varit att utveckla en tillförlitlig och reproducerbar svetsprocess som resulterar i ett svetsgods av hög kvalitet. En viktig slutsats från utvecklingsarbetet på TWI var att med de svetsparametrar som för närvarande används måste processen styras adaptivt.

4.1.1 Processtyrning

En viktig del av utvecklingsarbetet har varit att utveckla en enkel adaptiv svetsprocess för att öka reproducerbarheten jämfört med den avslutande locksvetsen på TWI, se bilaga 2.

Ett första steg var att utveckla en metod som enkelt kunde styra verktygstemperaturen inom ett specifikt intervall. Initialt skedde detta genom att manuellt ändra svetskraften 0,5 kN för att hålla verktygstemperaturen inom intervallet. Metoden utvecklades sedan ytterligare (lock 5–6) genom att ställa in ett intervall för spindelmomentet eller verktygstemperaturen så att mjukvaran automatiskt reglerade svetskraften.

Genom att accelerera svetshastigheten som en funktion av verktygstemperaturen har även den viktiga accelerationssekvensen till en viss del gjorts adaptiv för eventuella förändringar. Denna automatiska funktion ska alltså kompensera eventuella avvikelser i värmeförseln under accelerationssekvensen.

Den adaptiva svetsprocessen utvecklades ytterligare under parameterstudien och den efterföljande verifieringsfasen då det visade sig att spindelns rotationshastighet kunde styra verktygstemperaturen inom ett mindre intervall och med större tillförlitlighet än svetskraften.

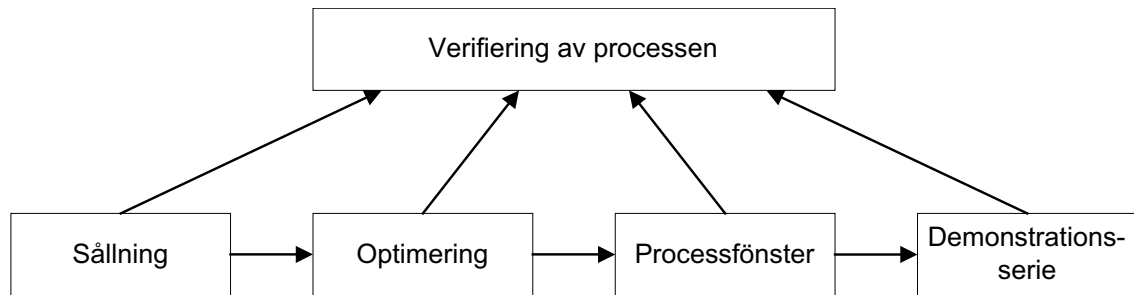
4.1.2 Svetsparametrar

Svetsprocessen har utvärderats med en statistisk metodik, som beskrivs utförligare i rapporten som redovisar tillförlitligheten vid förslutningsprocessen, med syfte att bli optimerad processen och fastlägga processfönstret, se figur 4-2.

Som tidigare beskrivet finns det fyra inmatningsparametrar som kan varieras och fyra resultatparameter. Efter att under flera locksvetsar (lock 7, 13 och 16) ha provat ett stort intervall av inmatnings- och resultatvärden (så kallad sållning) enligt tabell 4-1, så kunde en parameterstudie /Öberg 2004/ genomföras för att hitta de optimala inmatningsparametrarna inom intervallet. De optimala värdena verifierades sedan på tre locksvetsar (lock 19–21) då även processfönstret fastlades, se kapitel 5.1.5, innan de användes under demonstrationsserien (lock 22–41).

Tabell 4-1. Utforskat intervall av parametrar.

Inmatningsparameter	Enhet	Utprovat intervall	Resultatparameter	Enhet	Utprovat intervall
Svetshastighet	mm/min	60–130	Skulderdjup	mm	0–4
Spindelrotation	varv/min	350–500	Verktygstemp	°C	690–945
Svetskraft	kN	70–105	Spindelmoment	Nm	750–1 200
Verktygsvinkel	°	2–4	Verktygskraft	kN	25–70



Figur 4-2. Verifiering av svetsprocessen.

4.1.3 Starthålsutformning och placering

Vid utvecklingsarbetet på TWI användes ett 54 mm djupt cylindriskt borrhål med 20 mm diameter, se figur 4-3, som var placerat vid foglinjen. För att öka svetsprocessens säkerhetsmarginal flyttades starthålet ovanför foglinjen, se kapitel 2.3, redan vid den andra svetscykeln på Kapsellaboratoriet. Detta medförde att starthålet, som omöjligtvis kan lagas fullständigt av svetsprocessen ifall det är större än verktygstappen, bearbetas bort efter svetsning tillsammans med accelerationssekvensen och utgångshålet.

Eftersom att verktygstappens volym är cirka 12 cm³ visades sig det ursprungliga starthålets volym på 17 cm³ ofta resultera i ett för högt skulderdjup. För att förenkla accelerationssekvensen och minska risken för högt skulderdjup minskades starthålets volym i flera steg. Nuvarande starthålsvolym på 9 cm³ som erhålls med ett 15 mm borr, se figur 4-3, har visat sig möjliggöra en enklare accelerationssekvens med minimal risk för högt skulderdjup.



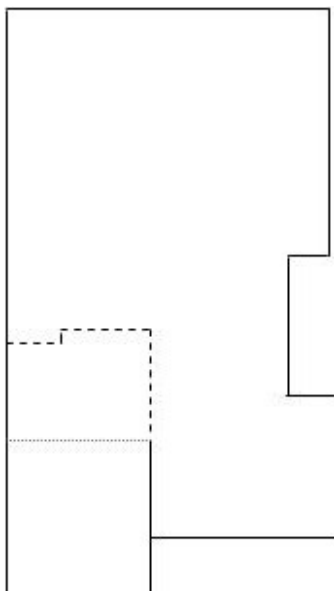
Figur 4-3. Ursprunglig och nuvarande borr med en diameter på 20 respektive 15 mm.

4.1.4 Fogutformning

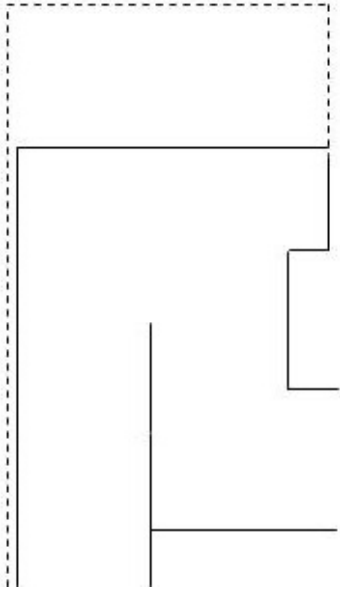
Ett problem som uppstod när riktiga lock istället för ringar skulle svetsas var för mycket skägg, se definition i figur 2-3, på rörsidan. Detta var ett resultat av olika faktorer; den stora massan koppar i locket, den stora termiska konduktiviteten hos koppar samt lockets kylklampar. Tillsammans orsakade dessa att röret blev varmare än locket. Eftersom att koppar har en hög termisk utvidgningskoefficient ($17,7 \cdot 10^{-6}$ per °C) expanderade röret mer än locket. Det extra skägget orsakade, genom friktion med verktyget, bildandet av över-skottsvärme vilket hade skadlig inverkan på stabiliteten hos svetsprocessen. Detta problem löstes genom att mekaniskt koppla locket och röret med en fals enligt figur 4-4. Denna modifiering används numera med framgång vid Kapsellaboratoriet. Foglinjen flyttades även till ett läge 40 mm högre upp i locket, enligt figur 4-4. Därmed minskar den asymmetriska uppvärmningen och utvidgningen av lock och rör, vilket ger en stabilare process. Förfarandet ger dessutom förbättrade kontrollmöjligheter med OFP.

Utformningen och placering av foglinjen har visat sig viktig för den resulterande skäggbildningen. För närvarande genereras lite mer skägg på rörsidan som med nuvarande rotationsriktning på verktyg och svetshuvud är den kritiska sidan beträffande diskontinuitetsgenerering. Det extra skägget medför dock att risken för diskontinuiteter minskar väsentligt.

Figur 4-5 visar lockets dimensioner före och efter bearbetning. Vid bearbetning tas 3 mm bort på radien (5 mm från och med lock 43) samt 55 mm från lockets höjd. Dessa 55 mm som bearbetas bort är till för att placera utgångshålet i, men på Kapsellaboratoriet utvecklades detta koncept ytterligare enligt kapitel 2.3 och 4.1.3. Svetsen startar ovanför foglinjen med avsikten att isolera eventuella diskontinuiteter som kan uppstå vid accelerationssekvensen, men också för att få en möjlighet att avbryta processen i ett tidigt skede om den inte konvergerar mot en stabil process. Det är möjligt att starta en svets i ett nytt starthål utan att kassera lock eller rör eftersom att det påverkade området bearbetas bort.



Figur 4-4. Foglinjeutformning och -läge.



Figur 4-5. Locket efter bearbetning.

4.2 Systemutveckling

Som beskrivs i kapitel 1 har systemutvecklingens mål varit att utveckla ett robust och tillförlitligt svetsssystem med hög tillgänglighet.

Sedan installationen av systemet i april 2003 har inga stora modifieringar av systemet varit nödvändiga förutom successiv utveckling av processövervakningen samt mjukvaran för den adaptiva svetscykeln. Dessa förändringar har oftast genomförts i samband med årlig service och kalibrering.

4.2.1 Svetsverktyg

En nickelbaserad superlegering, Nimonic 105, har använts som material i tappen, eftersom den visade sig kapabel att producera locksvetsar utan brott och synbart slitage och med mycket liten deformation. Skuldran tillverkas av en volframlegering, Densimet, som har de termiska egenskaper som krävs.

Figur 4-6 visar formen på de tappar och skuldror som använts på Kapsellaboratoriet. När en ny verktyghållare utvecklades för att förenkla fastspänningen av verktyget ersattes det gamla verktyget med ett nytt, vilket också resulterade i att en mindre volym av tapp och skuldermaterial används. Samtidigt hade två av de äldre tapparna från TWI gått sönder under svetsning, vilket ledde till en undersökning /Karlsson 2003/ samt utvecklingen av en tapp utan kantspår. Detta verktyg testades i tre locksvetsar (lock 7–9) eftersom det var i höjd med ett kraftigt kantspår som tapparna gått sönder. Vid undersökningen visade det dock att brotten orsakats av att tapparna inte hade värmebehandlats. Utveckling av tapparna utan kantspår, som genererade mindre friktionsvärme än tappar med kantspår, avslutades därmed.



Figur 4-6. Ny och gammal (till höger) utformning av tapp, skuldra och verktygshållare.

En ytbehandlingsmetod har med viss framgång använts för att öka ythården hos tapparna /Karlsson 2004/ och därmed minska föroreningshalten i svetsgodset. Ytan på tapparna har även visat sig ha betydelse för värmegenereringen och ytterligare utveckling och analys behövs för att optimera denna.

Verktystappens form har en väsentlig betydelse för värmegenereringen från verktyget och därmed också det resulterande skulderdjupet vid svetsning. Med kantspår ökar värmeförseln och högkvalitativa locksvetsar kan produceras med mindre skulderdjup och skäggbildning.

4.2.2 Processövervakning

Vid installationen användes mjukvaran E-View från Beijer Electronics som dataloggning med en samplingsfrekvens på 1 Hz. Denna funktion har förbättrats mångfaldigt med mjukvaran Citec från Beijer Electronics som har en samplingsfrekvens på 10 Hz, som också är möjlig att öka till 100 Hz vid behov. Detta medför att man inte missar viktiga händelser i svetscykeln på grund av för lågfrekvent loggning.

Som tidigare beskrivits har också förbättringar gjorts i mjukvaran för att öka processens automatiseringsgrad. Bl a så sker accelerationssekvensen som en funktion av verktygstemperaturen. Förutom accelerationssekvensen där svetshastigheten går upp till ett konstant värde som funktion av verktygstemperaturen sker all reglering av svetsprocessen (för närvarande genom ändringar av spindelrotationen och/eller svetskraften) manuellt av svetsoperatören. Vid vissa locksvetsar (bl a lock 5–6) kontrollerades dock spindelmomentet eller verktygstemperaturen automatiskt inom ett specifikt intervall med hjälp av ändringar av svetskraften. Som beskrivs i den framtida handlingslinjen i kapitel 6 är utvecklingen av en helautomatiserad svetsprocess en viktig milstolpe innan kvalificering av svetsssystem och svetsprocedur.

För att förbättra övervakningen av processen har de färgkameror som spelar in svetscykeln försetts med zoomfunktion och förbättrat ljus, se figur 3-6.

4.3 Locksvetsar

Mål, syfte och utfall från locksvetsarna finns beskrivet i individuella svetsrapporter. Här följer dock en sammanfattning av samtliga locksvetsar. En överskådlig tabell med OFP-resultat finns i bilaga 1.

För att öka den möjliga frekvensen på svetsförsöken och minska mängden förbrukad koppar har de flesta svetsförsöken utförts på icke fullstora kapslar. Svetsförsöken kan delas upp i:

- 1-meters rör; som har utförts med ett lock på ett kortare rör (drygt 1 m) som sedan sågats av och fogbearbetats för att kunna användas till ytterligare ett lock osv.
- Ringar; som har utförts med ett lock på en 20 cm ring som placerats på ett separat 1-meters rör.
- Separata svetscyklar; som har utförts efter en fullvarvsvets i den övre delen av locket som inte använts vid start eller parkeringssekvensen.

Svetsförsöken kan även delas upp i om de simulerar en locksvets eller bottenhets beroende på om en insats används eller inte. Lock och botten är dock identiskt utformade för närvarande.

Av de 49 lock- och bottenhetsarna är tre fullstora bottenhetsar, en fullstor locksvets, två 1-meters botten- och locksvetsar samt 15 bottenhetsar på ringar och 28 locksvetsar på ringar. Svetsning av lock på fullstora kapslar, 1-meters rör eller ringar med eller utan insats, med samma processparametrar, har inte visat någon noterbar skillnad för process, system eller svetskvalitet.

Lock 1–4: I lock 1, 2 och 3 provades en fals på 4, 3 respektive 5 mm för att undersöka effekten på skäggbildningen. Falsen på 4 mm hade mest likartad skäggbildning mellan lock- och rörsida, se definition och resultat i figur 2-3. I lock 4 höjdes också foglinjen till en mer symmetrisk placering, se figur 4-4, för att ytterligare jämna ut skäggbildning mellan lock- och rörsidan, samt förenkla för OFP.

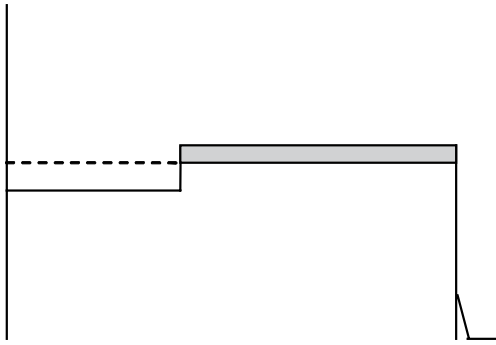
Den utvecklade processtyrningen, se kapitel 4.1.1, används i manuellt läge med god repeterbarhet.

I lock 2 testas också svetsprocessens lagningsförmåga när en maskinbearbetad defekt laddes in mellan locket och röret enligt figur 4-7. OFP-resultaten visar att den 2 mm breda och 32 mm djupa spalten inte påverkade svetsens kvalitet.

Efter en fullvarvsvets i lock 4 och OFP av denna genomfördes svetsprov ovanför foglinjen. Vattenglykolånga bildades vid dessa provsvetsar vilket resulterade i en mycket ren svetsyta, se figur 4-8. Den gamla verktyghållaren, se figur 4-6, testades med penetrant provning och sprickor detekterades, vilket förklarar orsaken till ångans förekomst. Vissa kanter på hållaren hade för liten radie och dessa kanter rundades av i den verktyghållare i lager som sedan monterades.

Lock 5–6: Processtyrningen utvecklades ytterligare genom inställning av önskat verktygstemperatur- (eller spindelmoments-) intervall så att processen kunde regleras automatiskt.

Efter en fullvarvsvets i lock 6 och OFP genomfördes svetsprov ovanför foglinjen där en ny starthålsutformning utvecklades. Ett cylindriskt borr med 20 mm diameter hade använts till och med lock 6, enligt kapitel 4.1.3. Volymen på starthålet var för stor vilket medförde att verktyget gick ner djupt i svetsgodset och accelerationssekvensen fick startas innan önskad temperatur hade uppnåtts. För att minska skulderdjupet vid uppvärmningssekvensen och möjliggöra en enkel och snabb accelerationssekvens minskades starthålets volym genom att använda borr med mindre diameter än 20 mm.



Figur 4-7. Foglinjeprofil med bearbetad (grå) spalt och verktygscentrering (streckad).



Figur 4-8. Yta vid svetsning med vattenglykolånga närvarande.

Lock 7 och 13: OFP-utvecklingen är beroende av att testa och utveckla provningsmetoder på diskontinuiteter. Eftersom att FSW hade producerat få diskontinuiteter så fanns behov av att producera ett antal diskontinuiteter, vilket kunde kombineras med sållningsförsöket enligt kapitel 4.1.2.

Vid lock 7 användes en ny utformning av tappens utan så kallade kantspår tillsammans med en ny verktygshållare, se figur 4-6.

Lock 8–9: Den kantspårslösa tappens testades ytterligare vid två fullvarvsvetsningar där svetsningen bl a utfördes vid hög temperatur för att undersöka tappens livslängd.

Lock 10–12 och 14: Eftersom att den kantspårslösa tappens inte uppnådde önskade resultat, se kapitel 4.2.1, återgick man till tappens med kantspår. Vid locksvets 1–9 svetsades ett lock på en 20 cm hög ring, som stod på en 1-meters rörstubbe. Men eftersom lock 10 och 11 var förberedelsesvetsar inför den fullstora kapseln så svetsades dessa lock direkt på rörstubben, ifall att det termiska flödet kunde påverkas. Lock 10 var förberedelse inför den fullstora botten svetsen, medan lock 11 var förberedelse inför den fullstora locksvetsen och svetsades därmed med gjutjärnsinsats. Lock 12 var den fullstora botten svetsen. Efter bearbetning lades en fullstor gjutjärnsinsats i kapseln som förslöts med lock 14.

Lock 15–18: Inför parameterstudien behövde först startsekvensen förenklas, vilket gjordes i lock 15. Sedan testades ett större intervall på inmatningsparametrarna i lock 16 för att kunna fastställa intervalltet inför parameterstudien. I lock 17 och 18 genomfördes parameterstudien med åtta separata 45-graders svetsar i vardera lock.

Lock 19–21: Inför demonstrationsserien behövdes de utvalda optimala parametervärdena och processtyrningen från parameterstudien verifieras. För att även fastlägga en övre nivå på processfönstret genomfördes ett livslängdstest på tappen i lock 20 och 21.

Lock 22–41: Demonstrationsserien påbörjades 2004-11-22 och 26 arbetsdagar senare, 2005-01-13, hade 20 locksvetsar med gjutjärnsinsats utförts.

Lock 42–47: Efter demonstrationsserien fokuserades utvecklingen på att minimera foglinjeböjningen (se kapitel 5.1.4 och bilaga 3 för beskrivning) genom att använda verktygstappar med optimal längd. Vid lock 45 användes även en verktygstapp med omvänd rotationsriktning.

Lock 48–49: Två fullskaliga bottensvetsar utfördes för att användas till SKB:s KBS-3H projekt.

5 Resultat och erfarenheter

Detta kapitel sammanfattar resultat och erfarenheter från de svetsförsök som gjorts på Kapsellaboratoriet sedan april 2003.

Efter 49 lock- och bottenhetsar bestående av 170 separata svetscyklar kan process och system summeras som robusta och stabila. Svetsförsöken har visat att repeterbarheten och tillförlitligheten i svetscykeln är mycket hög. Såväl process som system är emellertid inte färdigutvecklade när det gäller att fastställa svetsverktygets säkerhetsfaktor mot brott samt att fullständigt automatisera svetscykeln och därmed eliminera den mänskliga faktorn. Erfarenhet har dock visat att det går att svetsa med stor repeterbarhet och tillförlitlighet trots dessa begränsningar. Anledningen är det relativt stora processfönstret och trögheten mot förändringar i processen.

Som hjälpmedel vid utvärdering av svetsförsöken har svetsarna först undersökts med oförstörande provning i form av ultraljud och röntgen. För kartläggning av svetsgodsets egenskaper har metallografiprov, hållfasthetsprov, krypprov, korrosionsprov, restspänningsmätning och kemiska analyser utförts.

5.1 Svetsprocess

Svetsar utan betydande diskontinuiteter har producerats med regelbundenhet på Kapsellaboratoriet, se bilaga 1, och t ex redan den första locksvetsen, 2 arbetsdagar efter avslutat leveransprov, genomfördes utan påvisade diskontinuiteter. Oftast har dock några millimeters foglinjeböjning påvisats med OFP.

Ett viktigt resultat från utvecklingen är att svetsning av lock eller botten på fullstort rör, 1-meters rör eller 2-decimeters ring inte har resulterat i någon skillnad för processen.

5.1.1 Uppnådd kvalitet vid demonstrationsserien

Serien på 20 locksvetsar med insats verkställdes under 26 arbetsdagar. Inga provsvetsningar eller tester av utrustningen behövde genomföras vid sidan om locksvetsarna.

De oförstörande provningsresultaten, se bilaga 1, visar att inga diskontinuiteter förutom foglinjeböjning har påvisats. Foglinjeböjningen är endast noterbar vid överlappssekvensen och dess maximala värde varierar där mellan 3 och 4,5 mm i de 20 locksvetsarna med ett medelvärde på 3,8 mm. En omfattande analys av svetsresultatet vid demonstrationsserien kommer att presenteras i rapporten som redovisar tillförlitligheten vid förslutningsprocessen.

5.1.2 Uppnådd kvalitet vid fullskalig svetsning

En botten och ett lock svetsades på en fullstor kapsel med insats i mitten av 2004. Vid både botten- och locksvetsen påvisades inga diskontinuiteter förutom en foglinjeböjning på 2 mm vid överlappssekvensen. Ytterligare 2 fullskaliga bottenhetsar utfördes i mitten av 2005 med liknande resultat, inga diskontinuiteter förutom en foglinjeböjning på cirka 2 mm vid överlappssekvensen.

5.1.3 Uppnådd kvalitet vid övriga locksvetsar

I bilaga 1 sammanfattas samtliga locksvetsar utförda på Kapsellaboratoriet. Man kan se att processen regelbundet kan producera svetsar utan betydande diskontinuiteter. Svetsning med eller utan insats har inte medfört någon förändring av den uppnådda svetskvaliteten. Av de 49 locksvetsarna har 30 lock svetsats med och 19 lock svetsats utan insats.

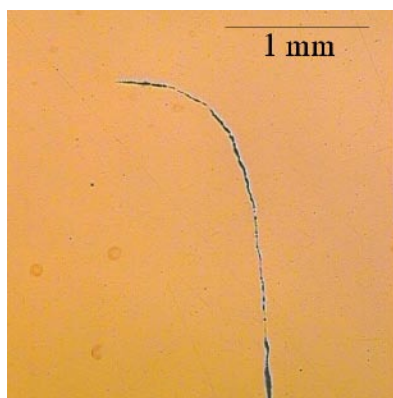
Processens lagningskapacitet har provats och visat att det är möjligt att reparera volumetriska defekter, se figur 4-7. En 2 mm bred spalt med ett djup på 32 mm lades in i foglinjen och svetsades utan att påverka svetsens kvalitet. Detta visar också att processen fungerar med stora toleranser.

5.1.4 Observerade diskontinuiteter

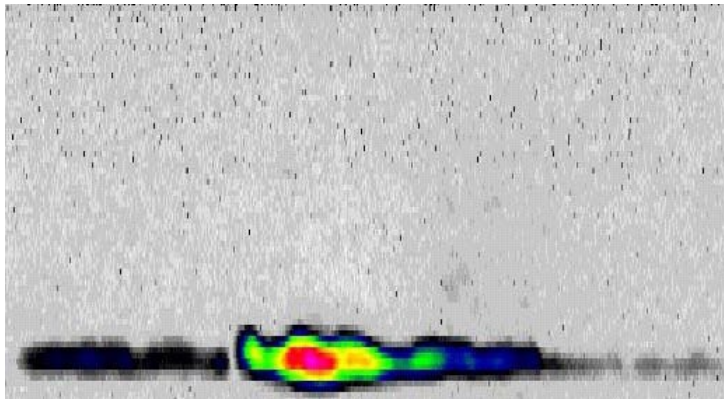
Både oförstörande och förstörande provning har genomförts för att fullständigt utvärdera integriteten hos locksvetsarna. I bilaga 3 beskrivs alla typer av diskontinuiteter som påvisats vid utvecklingsarbetena på TWI och Kapsellaboratoriet.

Endast en typ av diskontinuiteter har påvisats med regularitet i svetsarna. Det är en så kallad foglinjeböjning som uppstår när tappens spets går djupare in i materialet än 51,5 mm. Det är 51,5 mm ner till den lodräta skarven mellan lock och rör, se figur 4-4. Det är ofta vid överlappssekvensen som tappens spets överstiger detta djup och resultatet kan ses i figur 5-1 och 5-2. Denna diskontinuitet kan reduceras till en maximal storlek på cirka 2 mm med en kortare verktygstapp eller mindre skulderdjup vid överlappssekvensen. Prov har även visat att en omvänd svetsriktning eller verktygsrotation innebär att denna diskontinuitet reduceras till en maximal storlek på 1 mm eftersom foglinjen då inte böjs mot kapselytan. Omvänd svetsriktning eller verktygsrotation är dock inte optimalt för närvarande då detta skulle kunna leda till mer skägg på rörsidan och ökad risk för diskontinuitetsbildning.

En annan typ av diskontinuiteter som förekommit är en ytnära diskontinuitet vid nedgångssekvensen som beskrivs i bilaga 3 som maskhål. Den förekom dock endast vid en svetscykel med svetsparametrar nära processfönstrets gräns och dess position är utanför den radie på 5 cm som fungerar som korrosionsbarriär.



Figur 5-1. Foglinjeböjning.



Figur 5-2. Ultraljudsbild på foglinjeböjning.

5.1.5 Processfönster

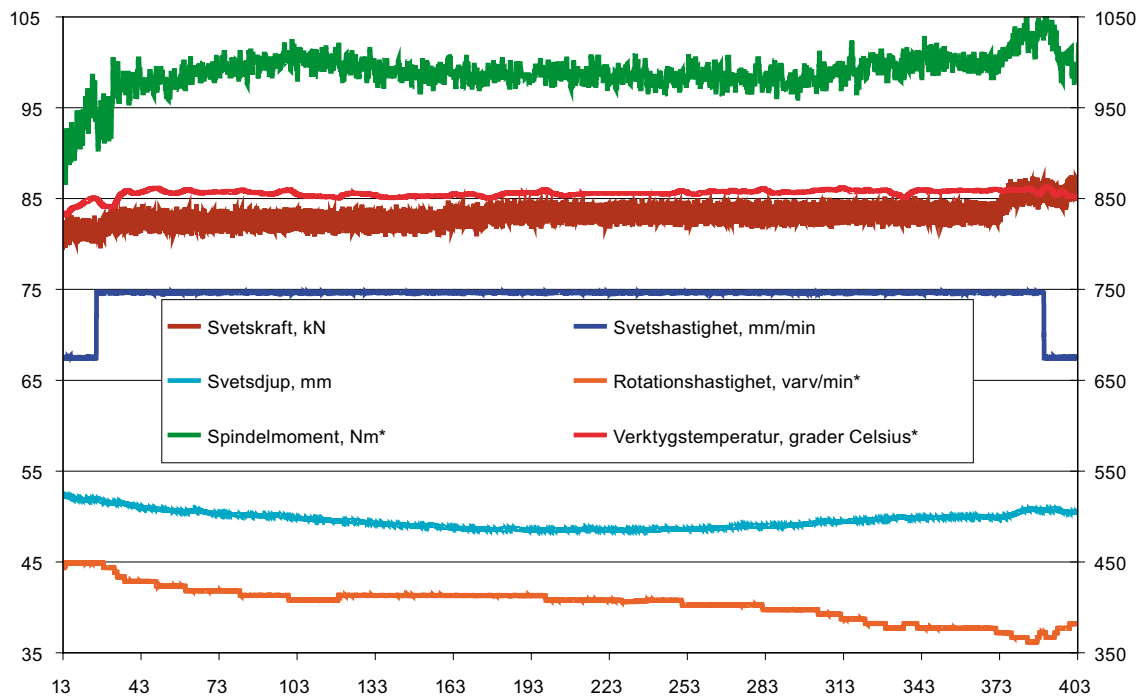
Efter avslutad parameterstudie /Öberg 2004/ fanns behov av att verifiera de optimala parametrarna och fastlägga ett processfönster. I tre lock, 19–21, genomfördes denna studie och resultaten visade att processfönstret är relativt stort med hänsyn till parametrarnas inställningsnoggrannhet. Tabell 5-1 visar det utprovade fönstret vid en svets hastighet på 74,3 mm/min. För svetskraften och rotationshastigheten är processfönstret lika med det utprovade intervallet så förmodligen är fönstret betydligt större än det som är angivet i tabell 5-1.

Som tabell 5-1 visar så är det utprovade processfönstret för verktygstemperaturen 790–910 °C. För att lägga fönstret i ett perspektiv kan man jämföra med svetsdata från locksvetsar. Figur 5-3 visar svetsdata från jämviktssekvensen dvs sekvens 2–5 i figur 2-3 vid locksvets 42, vilket motsvarar en sträcka på 390 grader eller 45 minuter. Verktygstemperaturen ligger mellan 835 och 860 °C dvs ± 12 °C jämfört med processfönstret på ± 60 °C.

Svårigheten att gå utanför processfönstret bekräftades också i locksvets 7 och 13. För att studera tillförlitligheten för OFP-processerna krävdes att referensdiskontinuiteter kunde genereras. Detta visade sig svårt i och med att processen visat sig stabil dvs svår att störa. Då processen forcerades för att generera diskontinuiteter fick försöken istället ofta avbrytas för att inte riskera skador på utrustningen.

Tabell 5-1. Nuvarande processfönster samt parametrarnas inverkan på processen.

Parameter	Enhet	Fönster	Vid högt värde	Vid lågt värde
Spindelrotation	varv/min	350–450	Risk för hög verktygstemp	–
Svetskraft	kN	78–98	Risk för hög verktygstemp	Risk för diskontinuiteter
Skulderdjup	mm	0,4–1,5	Risk för diskontinuiteter	Risk för diskontinuiteter
Verktygstemp	°C	790–910	Risk för verktygsbrott	Risk för diskontinuiteter



Figur 5-3. Svetsdata från locksvets 42. Lägre svets hastighet noterar nedgångs- och parkeringssekvens. *Noterar värde på höger y-axel.

5.2 Svetsssystem

Svetsssystemet på Kapsellaboratoriet har visat att de planerade systemen för botten svetsning och för förslutning svetsning i Inkapslingsanläggningen som bygger på samma konstruktionsprinciper kan förutspås vara tillgängliga för minst en botten- och locksvets per dag.

Systemet har uppvisat en jämn svetskvalitet vid locksvetsar med liknande svetsparametrar och vid svetsning före och efter service och underhåll.

5.2.1 Systemets tillgänglighet sedan installation

Systemet på Kapsellaboratoriet har haft nära 100 % tillgänglighet sedan installation. Några mindre fel har dock uppstått och dessa beskrivs nedan.

Systemets tillgänglighet vid demonstrationsserien var 100 %, men två komponentbyten, en kylpumpsslang och en PLC-modul, behövde genomföras.

Tidigt i utvecklingsarbetet (vid lock 4) uppstod en spricka i den ursprungliga verktyghållaren som innebar att kylvätska läckte igenom hållaren och vattenglykolånga fungerade som en skyddsgas under svetsning, se figur 4-8. Sprickan var ett resultat av för liten kantradie vid kritiska ställen i hållaren och nya hållare med större kantradie har inte visat någon antydning på sprickbildning. Detta problem medförde dock ingen reducerad tillgänglighet av maskinen eftersom de nya hållarna var tillverkade innan svetsning med den spruckna hållaren var avslutad. Den nya hållaren har använts på mer än 35 lock och 100 svetscyklar utan tecken på sprickbildning.

För närvarande utförs årlig kalibrering av ESAB AB som tar cirka en arbetsdag, men eftersom de utprovade parametrarna är hastigheter kan de även kontrolleras vid svetsning. Den enda parametern som måste kalibreras utanför svetsning är svetskraften. Kalibrering av svetskraften i produktion kommer förmodligen att finnas vid verktygsbytestationen.

5.2.2 Svetsverktyg

Under de 49 lock- och bottenhetsarna bestående av 170 separata svetscyklar har inga verktygsbrott skett under normala driftförhållanden. Eftersom t ex flera svetscyklar utförts med tidigare använda och syratvättade verktygstappar har dock verktygsbrott inträffat vid fem tillfällen på Kapsellaboratoriet.

Två tappar gick sönder efter att ha använts vid flera svetsar när maskinen testades vid leveranstestet i mars 2003. En undersökning genomfördes /Karlsson 2003/ som visade att dessa tappar inte värmebehandlats vilket också bekräftades vid en kvalitetskontroll på TWI.

Efter genomförd och OFP-provad fullvarvssvetsning i lock 5 och 8, utfördes svetsutveckling med använda tappar som blivit rengjorda från koppar med koncentrerad syra. Två syratvättade tappar gick sönder, en i varje lock.

Efter avslutad parameterstudie skulle ett processfönster färdigställas inför seriesvetsningen vilket innebar att maximal tillåten verktygstemperatur testades. Vid 912 °C gick tappen sönder. Det bör dock tilläggas att tappar vid andra svetsförsök har varit uppe i 945 °C under kortare perioder utan att gå sönder.

Utgående från dessa erfarenheter beträffande återanvändning, syratvättning och värmebehandling har en kvalitetsplan för tillverkning och användning av verktygstappen utarbetats.

5.3 Svetsgodsets materialegenskaper

Diverse tester har genomförts på locksvetsar utförda vid Kapsellaboratoriet för att bedöma svetsarnas långtidsegenskaper. FSW är en så kallad ”oförstörande svetsmetod” vilket innebär att svetsgodsets egenskaper i många fall liknar grundmaterialets.

5.3.1 Metallografisk undersökning

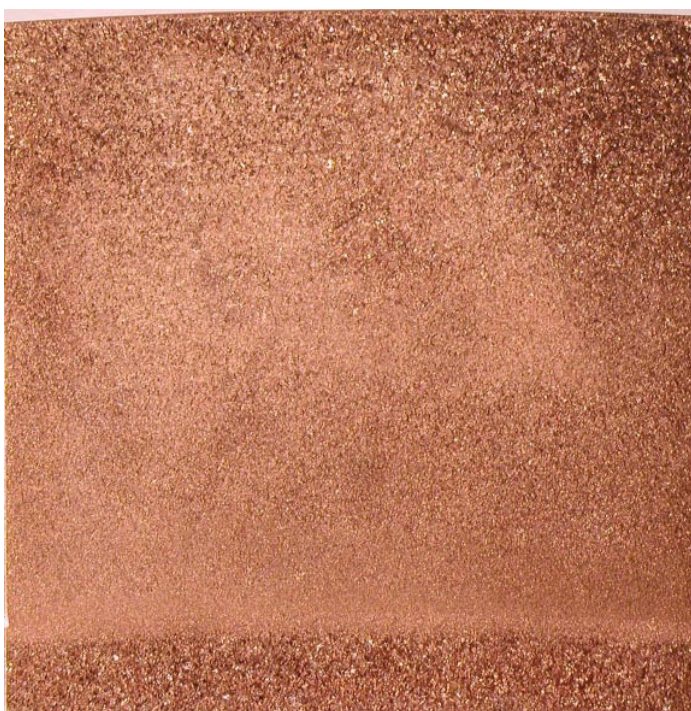
Svetsgodsets struktur med fokus på kornstorlek har undersökts i ett 40-tal makrosnitt, se figur 5-4 och 5-5. Samtliga makrosnitt har en finkornig rekristalliserad struktur med en kornstorlek på cirka 75 µm /Andersson 2004/. Kornstorleken är i nivå med grundmaterialet eller till och med något finare.

5.3.2 Krypegenskaper

Krypprovning med olika belastning och temperatur visar att svetsgodset har liknande krypegenskaper som grundmaterialet /Andersson 2004/. Alla provstavar har haft över 30 % krypduktilitet och jämn förlängning.



Figur 5-4. Tvärsnitt från locksvets 2.



Figur 5-5. Längdsnitt från locksvets 2.

5.3.3 Hållfasthetsegenskaper

Dragprovning har utförts på 45 och 20 mm breda plattprovstavar samt runda provstavar med en diameter på 10 mm /Claesson 2005/. Resultatet visar att svetsar utförda med FSW har liknande hållfasthetsegenskaper som grundmaterialet, brottgräns (206–209 MPa), sträckgräns (68–82 MPa) eller brottförlängning (48–53 %). Provstavar som varit uttagna ur både överlappssekvensen och foglinjesvetsningen från flera locksvetsar, har gått till brott i den värmepåverkade zonen utanför svetsen.

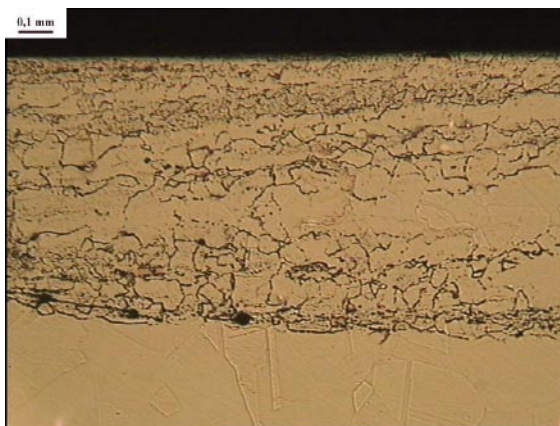
Runda provstavar med en diameter på 10 mm från locksvets 21 har även testats vid 100 °C vilket resulterade i en brottgräns på 193–202 MPa, sträckgräns på 69–70 MPa och en brottförlängning på 45 %.

5.3.4 Föroreningar

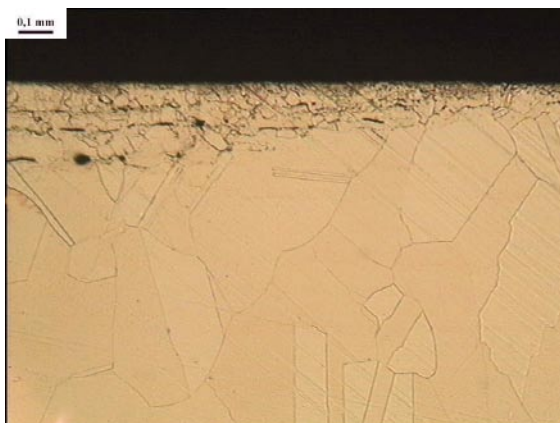
Kemiska analyser och mikroskopisk provning av svetsgodset har utförts på flera locksvetsar.

Flera olika positioner från flera locksvetsar har undersökts i ljusmikroskop och svepelektronmikroskop i polerat och etsat tillstånd /Samuelsson 2005/. Mindre partiklar och bristningar, upp till en storlek på cirka 5–6 µm, hittades i korn och korngränser. I ett prov uppmättes dock en bristning till 60 µm nära ytan av kapseln.

Föroreningsprov genomfördes på både överlappssekvensen och foglinjesvetsning i lock 8 med väteförspädningstest och kemisk analys /Salonen 2004/. Väteförspädningstest är ett forcerat prov där kopparen värms upp till 950 °C i vätgas för att kopparoxid skall reagera enligt $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. Undersökningarna visade på ytnära oxidbildning vid både foglinjesvetsningen och överlappssekvensen, enligt figur 5-6 och 5-7. Detta område bearbetas dock bort när kapseln får sina slutgiltiga dimensioner. Oxidhalt på upp till 20 ppm har hittats i roten av svetsgodset vid överlappssekvensen. Förutom ytan och roten vid överlappssekvensen påvisades ingen oxidhalt över 10 ppm. I den kemiska analysen hittades spår av nickel från verktygstappen på upp till 20 ppm.



Figur 5-6. Ytnära oxid i överlappssekvens.



Figur 5-7. Ytnära oxid i foglinjesvetsning.

Ytterligare kemiska analyser kommer att genomföras på locksvetsar för att få mer övergripelig information om svetsgodsets kvalitet beroende på verktygstemperatur, verktygs-material och ytbehandling. Föroreningarnas påverkan på svetsgodsets långtidsegenskaper i slutförvaret kommer att undersökas och kartläggas. En ansats för att eliminera oxidbildning är att använda skyddsgas vilket planeras att genomföras 2006.

5.3.5 Restspänningar

Restspänningsmätning har utförts på en locksvets /Jaensson 2005/. De högsta dragrestspänningar som noterats uppgår till 39 MPa dvs väl under sträckgränsen för svetsgodset.

5.3.6 Korrosion

Korrosionsprovning har utförts på en locksvets /Gubner 2004/. Provet visar ingen tendens till korngränskorrosion eller spänningskorrosion på grund av restspänningar. Ett program för ytterligare korrosionsprovning skall dock påbörjas under 2006 för att få en klarare bild över svetsgodsets korrosionsegenskaper.

6 Framtida utvecklingsmöjligheter och behov

Trots att locksvetsarna på Kapsellaboratoriet har varit av mycket hög kvalitet finns det flera möjligheter och behov att utveckla processen och systemet. Utvecklingsarbetet kommer att fokuseras på att produktionsanpassa process och system för bottensvetsning och för förslutningssvetsning i Inkapslingsanläggning.

6.1 Svetsprocess

- Processens reparationskapacitet har provats och visat att det är möjligt att reparera volumetriska defekter, se figur 4-7. Svetsprocessens reparationspotential bör dock undersökas ytterligare. Dessutom kommer en metod för att starta processen i ett utgångshål vid foglinjen att utvecklas.
- Föroreningarnas inverkan på svetsgodsets egenskaper kommer att undersökas och kartläggas ytterligare. Prov med modifierad verktygstapp och argongas som skydd mot oxidation i svetsgodset kommer att genomföras för att undersöka om förekomsten av föroreningar kan reduceras.

6.2 Svetssystemet

- Processens adaptiva styrning regleras för närvarande manuellt av svetsoperatören. Mjukvaran bör utvecklas så att detta kan ske automatiskt eftersom det skulle innebära att man eliminerar den mänskliga faktorn från processen samt att en mjukvara skulle kunna reagera på förändringar snabbare och mer exakt.
- En givare av verktygstemperaturen i form av en infraröd kamera har provats med bra resultat. Kameran mäter temperaturen på skuldran och ger en ytterligare indikation på processens status. Installation och driftsättning av en infraröd kamera kommer att göras för att bli en öka redundansen i svetssystemet.
- Tappen av Nimonic 105 har en övre tillåten temperaturgräns på cirka 910 °C vilket innebär vissa begränsningar när det gäller svetsutvecklingen, bli krävs kontroll av verktygstemperaturen. Utvecklingsarbete för att öka den övre temperaturgränsen och därmed också öka säkerhetsfaktorn kommer att utföras. Som möjliga åtgärder har ny tappdesign, ytbehandling och/eller nytt tappmaterial kartlagts. Ett intressant material är Nimonic 115 som är en utvecklad variant av Nimonic 105 med en högre maximal användningstemperatur på 1 010 °C jämfört med 950 °C för Nimonic 105 /Special Metals 2004/. Dessa extra 60 °C kan innebära att verktygstemperaturen eventuellt inte behöver kontrolleras, samt en högre säkerhetsfaktor mot verktygsbrott.

7 Slutsatser

Efter 49 locksvetsar bestående av 170 separata svetscyklar kan processen och systemet summeras som robusta och stabila. Processen är emellertid inte färdigutvecklad när det gäller att fullständigt automatisera processen och därmed eliminera den mänskliga faktorn. Erfarenhet har dock visat att det går att svetsa med stor repeterbarhet och tillförlitlighet trots denna begränsning. Anledningen är det relativt stora processfönstret och trögheten i processen.

En mycket viktig egenskap i den framtida produktionen med en botten- och locksvets per dag är systemens tillgänglighet. Systemet på Kapsellaboratoriet har haft nära 100 % tillgänglighet sedan installation. Erfarenheten från Kapsellaboratoriet är att flera kapslar kan förslutas per dag.

Eftersom processens och systemets tillförlitlighet och robusthet har visat sig mycket hög och processfönstret stort finns det inget som tyder på att man behöver kassera kapslar svetsade med FSW i den framtida produktionen annat än i undantagsfall. I dessa eventuella undantagsfall kan dock processens reparationskapacitet komma till nytta. Det relativt stora processfönstret underlättar också kvalificering av svetsproceduren.

Verktygstappen av Nimonic 105 har en maximal tillåten temperatur på 910 °C, vilket betyder att en maximal temperatur på 890 °C rekommenderas. Förändring av tappens geometri, ytbehandling och/eller material kan eventuellt öka den tillåtna verktygstemperaturen över den maximalt möjliga temperaturen som kan uppnås vid FSW av koppar.

Svetsning av lock på fullstora kapslar, 1-meters kapslar eller 2-decimeters ringar med eller utan insats har inte inneburit någon noterbar skillnad för processen.

Accelerationssekvensen är den viktigaste sekvensen som påverkar skäggbildningen och kvaliteten under hela svetscykeln.

Svetsar utan betydande diskontinuiteter har producerats med regelbundenhet. Till exempel har inga diskontinuiteter förutom foglinjeböjning påvisats i demonstrationsserien.

Svetsgodsets egenskaper beträffande hållfasthet, kryp, kornstorlek, restspänningar och korrosion är mycket goda. Däremot har oxid och föroreningar från verktygstappen noterats.

Referenser

Andersson H, 2004. Creep testing of thick-wall copper electron beam and friction stir welds at 75, 125 och 175°C. Swedish Institute for Metals Research, Report IM-2004-110.

Andrews R E, 2004. Friction stir welding – an alternative method for sealing nuclear waste storage canisters. SKB TR-04-16. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Claesson S, 2005. Tensile tests on copper material for encapsulation of nuclear waste, summary report. Dokument 1045935. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Fud 2004, 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gubner R, 2004. Grain boundary corrosion of copper canister weld material. Swedish Corrosion Institute AB, Report 80019.

Jaensson B, 2004. X-ray diffraction measurement of residual stresses in welded copper canister lids. CSM Materialteknik AB, Technical report TEK04-0643.

Karlsson S-Å, 2003. Failure Analysis of Probes for Friction Stir Welding-Status Report. CSM Materialteknik AB, Technical report TEK03-0372.

Karlsson S-Å, 2004. Heat Treatment and Surface Engineering of FSW Probes. CSM Materialteknik AB, Technical report TEK03-0709.

Ronneteg U, 2003. Inkapslingsteknik Lägesrapport 2002 Oförstörande provning. SKB R-03-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Salonen T, 2004. Hydrogen embrittlement test, chemical and gas analysis of FS- and EB-weldments. Posiva Oy Encapsulation Technology, Memo.

Samuelsson K-G, 2005. Bedömning av FSW-prover. CSM Materialteknik AB, Meddelande MED05-0222.

Special Metals Corporation, 2004. Nimonic 105. Publication number SMC-081. <http://www.specialmetals.com/documents/Nimonic%20alloy%20105.pdf>

Svensk standard, 2002. Svetsning och besläktade förfaranden – Klassificering av diskontinuiteter och formavvikelser i metalliska material – Del 2: Trycksvetsning. International Organization for Standardization, standard 6520-2:2001.

Öberg T, 2004. SKB Canister Laboratory: Evaluation of process experiments with friction stir welding. TOMAS ÖBERG KONSULT AB, MEMO-2004/5.

Sammanfattning av locksvetsar

Tabell A-1. Datum, syfte och OFP-resultat vid locksvetsar utförda på Kapsel-laboratoriet.

Lock	Datum	Huvudsyfte	OFP-resultat
1	030415	Prova foglinjeutförning med 4 mm fals	Inga diskontinuiteter
2	030602	Prova 3 mm fals och laga 2×32mm spalt	Startdiskontinuiteter, osvetsat vid foglinjen
3	030806	Prova foglinjeutförning med 5 mm fals	Inga diskontinuiteter vid foglinjen
4	030908	Prova 4 mm fals och höjd foglinje (40 mm)	Inga diskontinuiteter vid foglinjen
5	030916	Spindelmomentskontroll	Inga diskontinuiteter vid foglinjen
6	031106	Spindelmomentskontroll	Inga diskontinuiteter vid foglinjen
7	031216	Producera referensdis., tapp utan kantspår	Referensdiskontinuiteter för OFP-projekt
8	040116	Prova tapp utan kantspår vid fullvarv	Inga diskontinuiteter (över 2 mm)
9	040203	Livslängdstest av tapp utan kantspår	Utgånghål, startdiskontinuiteter (ovanför)
10	040223	Förberedelse inför fullskalig bottensvets	Inga diskontinuiteter (2 mm foglinjeböjning)
11*	040312	Förberedelse inför fullskalig locksvets	Inga diskontinuiteter (2 mm foglinjeböjning)
12	040406	Fullskalig bottensvets	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)
13*	040426	Producera referensdiskontinuiteter	Referensdiskontinuiteter för OFP-projekt
14*	040503	Fullskalig locksvets	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)
15*	040517	Förenkla startsekvens	Inga diskontinuiteter
16*	040615	Förstudie/sällning inför parameterstudie	Referensdiskontinuiteter för OFP-projekt
17*	040901	Parameterstudie	Referensdiskontinuiteter för OFP-projekt
18*	040921	Parameterstudie	Referensdiskontinuiteter för OFP-projekt
19*	041015	Verifiera parameterval	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)
20*	041026	Verifiera parameterval, livslängdstest tapp	Startdiskontinuiteter, verktyg och osvetsat
21*	041112	Verifiera parameterval, livslängdstest tapp	Inga diskontinuiteter (2 mm foglinjeböjning)
22*	041122	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)
23*	041123	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4,5 mm foglinjeböjning)
24*	041125	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)
25*	041126	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)
26*	041129	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)
27*	041130	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)
28*	041203	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
29*	041207	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
30*	041209	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
31*	041210	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
32*	041213	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)
33*	041214	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
34*	041215	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
35*	041215	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4,5 mm foglinjeböjning)
36*	041216	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
37*	041217	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)
38*	041217	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
39*	041220	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)
40*	050111	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (3,5 mm foglinjeböjning)

Lock	Datum	Huvudsyfte	OFP-resultat
41*	050113	Demonstrationsserie	Inga diskontinuiteter (4 mm foglinjeböjning)
42	050202	Minimera foglinjeböjning	Inga diskontinuiteter
43	050301	Minimera foglinjeböjning	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)
44	050308	Minimera foglinjeböjning	Inga diskontinuiteter (2 mm foglinjeböjning)
45	050411	Minimera foglinjeböjning	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)
46	050518	Minimera foglinjeböjning	Inga diskontinuiteter
47	050522	Minimera foglinjeböjning	Inga diskontinuiteter
48	050602	Fullskalig bottensvets	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)
49	050622	Fullskalig bottensvets	Inga diskontinuiteter (3 mm foglinjeböjning)

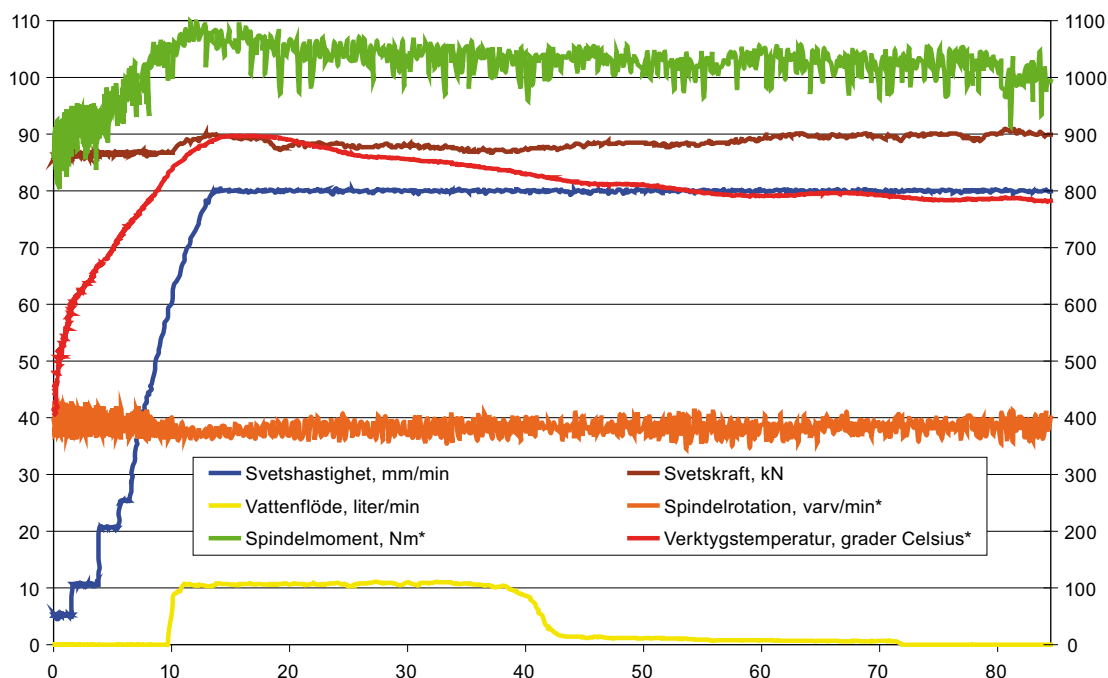
* efter locknummer innebär svets utförd med insats.

Resultat vid locksvets på TWI

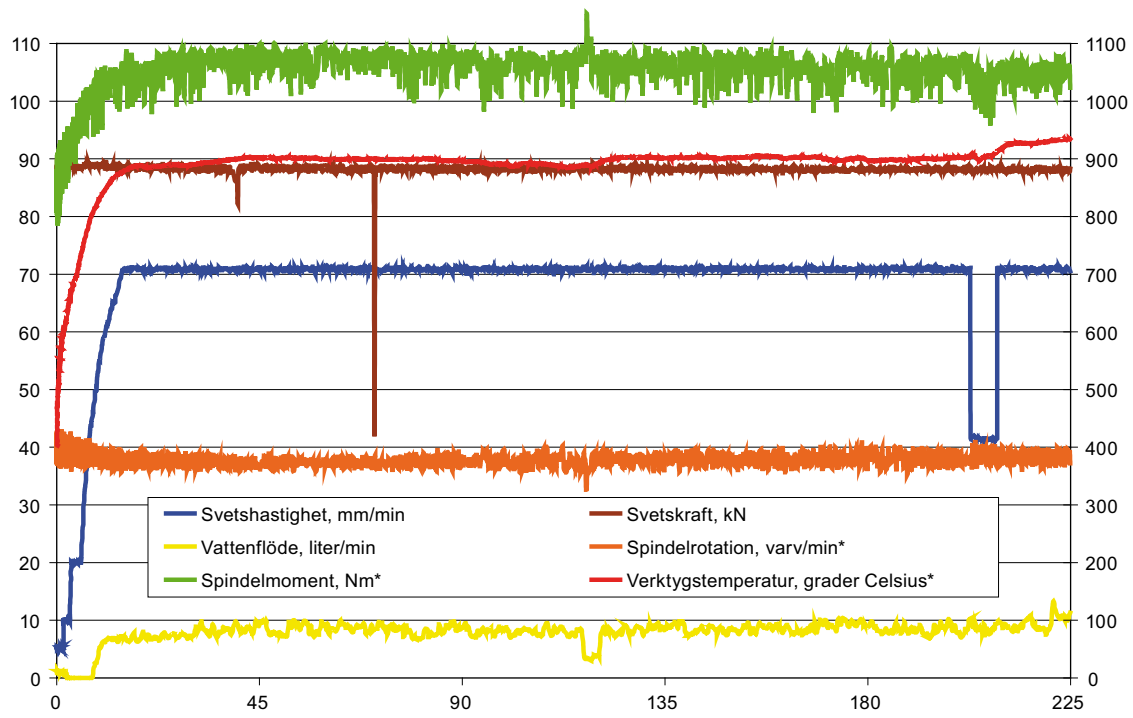
Vid den enda och avslutande locksvetsen vid TWI fick den första svetscykeln avbrytas efter 84,5 grader i X-led då verktygstemperaturen låg på 782 °C eftersom en synlig längsgående diskontinuitet bildats. Vid den andra svetscykeln modifierades svets hastigheten från 80 till 70 mm/min och svetskraften från 86 till 89 kN för att få en varmare svets och resultatet blev en maximal verktygstemperatur på 935 °C efter 225 grader i X-led.

Svetsresultatet visar att den process som utvecklats på TWI inte kan användas med konstanta inmatningsparametrar under hela svetscykeln, utan att en adaptiv svetsprocess är nödvändig.

En annan slutsats är att den så kallade ”thermal management facility”-funktionen som skulle kontrollera verktygstemperaturen med hjälp av att ändra vattenflödet igenom verktygshållaren /Andrews 2004/ inte visar sig kunna påverka processen. Istället är det spindelmomentet multiplicerat med spindelrotationen som utgör värmeförseln och därmed styr verktygstemperaturen. En intressant iakttagelse för den experimentella maskinen på TWI är att man tydligt kan se att kapaciteten för maskinen ligger på 40 kW eftersom spindelrotationen minskar från 400 varv/min när spindelmomentet går över 950 Nm, enligt; kapacitet = $950 \text{ Nm} \cdot 400 \text{ varv/min} \cdot 2\pi \text{ rad/varv} \cdot 1 \text{ min}/60 \text{ sec} = 40 \text{ kW}$.



Figur B-1. Svetsdata från första svetscykeln vid locksvetsen på TWI. * noterar värde på höger y-axel.



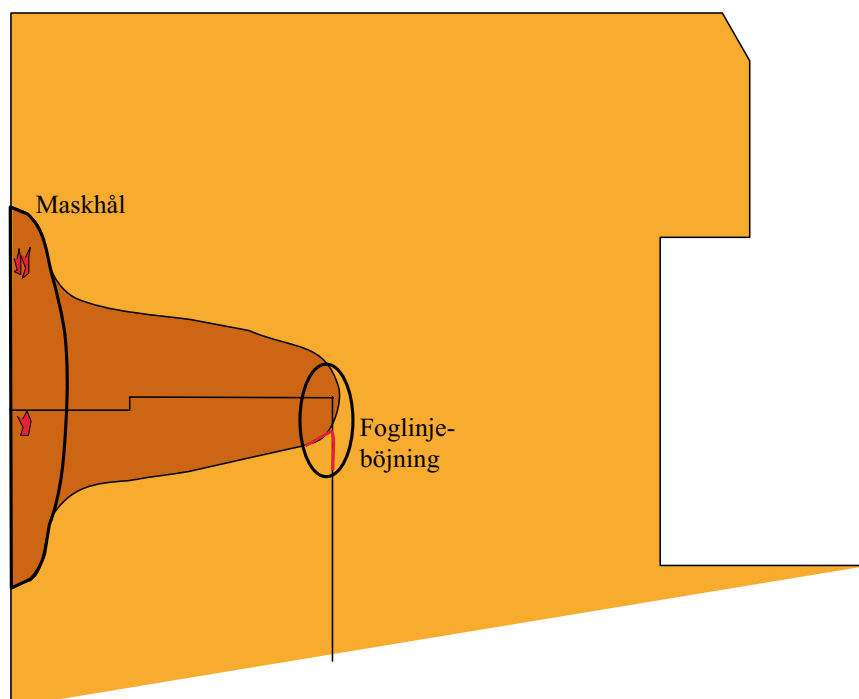
Figur B-2. Svetsdata från andra svetscykeln vid locksvetsen på TWI. * noterar värde på höger y-axel.

Påvisade diskontinuiteter

Detta är en sammanfattning av de diskontinuiteter som påvisats vid svetsning i 5 cm tjock koppar med FSW vid utvecklingsarbetena på TWI och Kapsellaboratoriet. Vissa av de diskontinuiteter som påvisats uppstår endast under påtvingade och extrema betingelser och vissa uppstår under normala svetsförhållanden. För att kartlägga de möjliga diskontinuiteterna har flera angreppssätt använts:


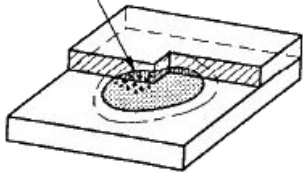
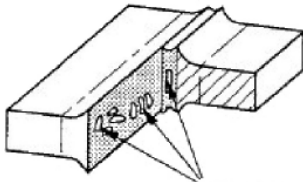
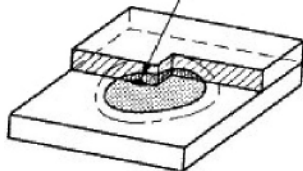
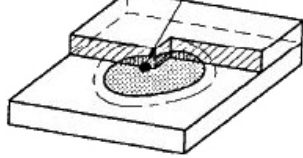
- Indikationer från OFP av svetsar utförda vid Kapsellaboratoriet har undersökts likväl som svetsar från utvecklingsarbetet vid TWI. Indikationerna har verifierats genom metallografiska undersökningar.
- Undersökningar av områden där svetsprocessen har varit utanför processfönstret. I utvalda områden har delar kapats ur ut för vidare undersökning med framförallt röntgen och slutligen med metallografi.
- Områden med indikationer från OFP och även slumpmässigt utvalda prov har undersökts med mikrofokusdatortomografi och i vissa fall kompletterat med avslutande metallografiska undersökningar.
- Vidare har flera metallografiska undersökningar av oberoende laboratorier gett information om framförallt mycket små diskontinuiteter eller andra avvikelser som inte påvisas vid OFP.

De påvisade diskontinuiteterna har klassificerats i tabell C-1 enligt Svetsning och besläktade förfaranden – Klassificering av diskontinuiteter och formavvikelser i metalliska material /Svensk standard 2002/.



Figur C-1. Exempel på lokalisering av diskontinuiteter i svetsar.

Tabell C-1. Klassificering av diskontinuiteter.

Referensnummer SS-EN-ISO 6520	Benämning och förklaring	Illustration
P 4013	Bindfel Ofullständig bindning i svetsförbandet.	 4013
P 2013	Porsamling En grupp porer med godtycklig geometrisk fördelning.	 P 2013
P 2016	Maskhål Rörformig hålighet i svetsgodset, i allmänhet samlade klungor och fördelade i ett fiskbensmönster.	 P 2016
P 303	Oxidineslutning Tunna metalliska oxidineslutningar i svetsen (isolerade eller samlade i klungor).	 P 303
P 304	Metallineslutning Partikel av en främmande metall innesluten i svetsgodset.	 P 304

Foglinjeböjning (bindfel) ISO 6520-2:2001 P. 4013

Beskrivning: Den vertikala skarven mellan rörets insida och locket böjs mot verktygsskuldern på grund av materialflödet runt verktygstappen, se figur C-1.

Storlek: Upp till 5,5 mm utbredning i radiell ledd har noterats. Normalt har foglinjeböjning en tangentiell utbredning på någon/några decimeter vid överlappssekvensen. I extremfall kan de dock finnas längs hela svetsvarvet.

Lokalisering: I svetsroten.

Karakteristik: Tät sprickliknande diskontinuitet (figur C-2) med utbredning i radiell ledd med en spalt på $< 10 \mu\text{m}$.

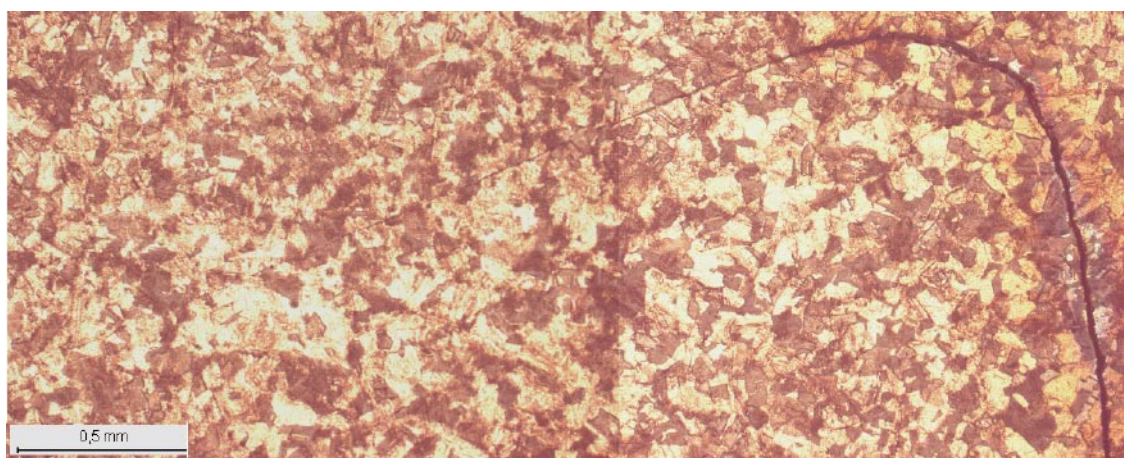
Förekomst: Vid överlappssekvensen i samtliga locksvetsar.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Reducerar korrosionsbarriären.

Orsak: Materialflödet leder till att den vertikala obundna delen av foglinjen dras ut i horisontell ledd. Storleken på foglinjeböjningen är kopplad till verktygstappens penetrering.

Åtgärd: Minska materialflödet i det aktuella området genom att minska verktygstappens inträngningsdjup alternativt ändra materialets flödesriktning genom att ändra svetsriktningen eller rotationsriktningen på verktyget.

Provningsmetod: Ultraljudprovning från locket ovasida.



Figur C-2. Makroprov av foglinjeböjning.

Inre hålighet (maskhål) ISO 6520-2:2001 P. 2016

Beskrivning: Ytnära diskontinuitet som uppstår vid verktygets skärande sida, vilken även kan vara ytbrytande vid accelerationssekvensen.

Storlek: Upp till 10 mm har noterats vid ogynnsamma svetsparametrar. I tangentiell ledd är utbredningen mindre än 10 mm, dock kan kluster av diskontinuiteter ge en betydligt större tangentiell utbredning.

Lokalisering: Har påvisats från ytan ned till ett djup av 10 mm.

Karakteristik: Oftast bestående av kluster med täta diskontinuiteter i tangentiell ledd med primär utbredning i radiell/axiell ledd, ibland sammanväxta till volymetriska diskontinuiteter. Oregelbunden form med ojämna ytor.

Förekomst: Större diskontinuiteter påträffades tidigt i utvecklingen av svetsprocessen medan endast mindre diskontinuiteter (< 3 mm) har indikerats i senare svetsar.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Reducerar korrosionsbarriären.

Orsak: Svetsparametrar utanför processfönstret, framför allt för lite svetsdjup och för låg svetstemperatur.

Åtgärd: Svetsparametrar inom processfönstret.

Provningsmetod: Visuellt vid ytbrytande diskontinuiteter och ultraljud från lockets ovan-sida vid icke-volymetrisk inneslutna diskontinuiteter. Endast påvisbar vid radiografering i extremfallet då den formar en volymetrisk diskontinuitet.



Figur C-3. Makroprov av inre hålighet.

Porsamling ISO 6520-2:2001 P. 2013

Beskrivning: Enstaka porer eller porstråk.

Storlek: Stråk på upp till 9 mm har observerats. Porerna är storleksordning 0,1–0,5 mm.

Lokalisering: Har påträffats i alla områden av svetsen.

Karakteristik: Se figur C-4.

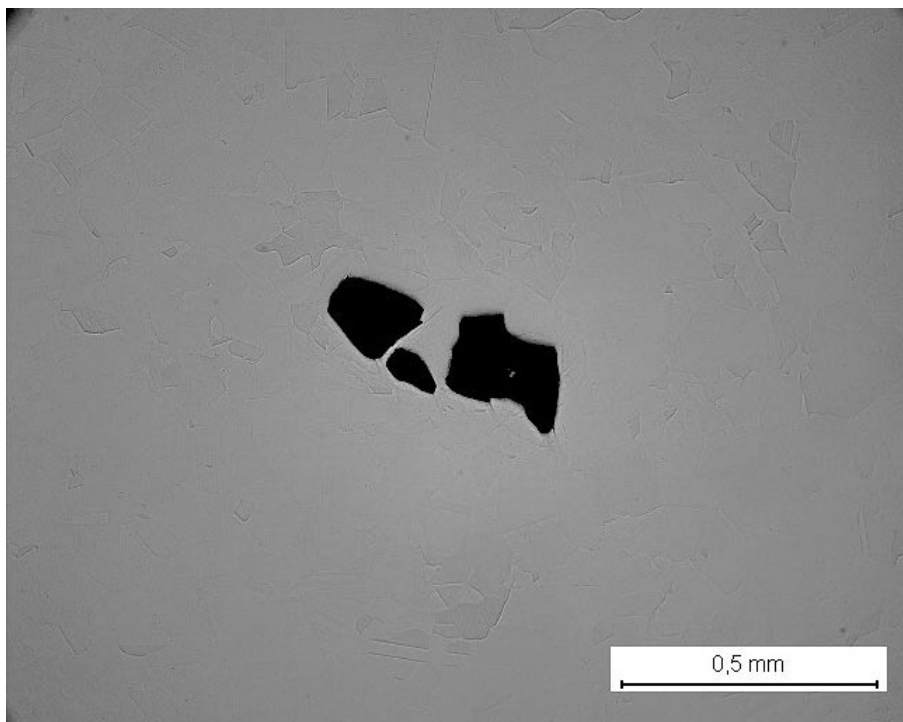
Förekomst: Vid svetsning inom processfönstret har endast enstaka små porer observerats.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Vid svetsning inom processfönstret har de liten inverkan på den effektiva korrosionsbarriären.

Orsak: Uppstår då en eller flera svetsparametrar är utanför processfönstret speciellt vid för litet skulderdjup vid överlappssekvensen.

Åtgärd: Kräver ingen ytterligare åtgärd än att tillse att svetsprocessen drivs inom processfönstret. Yttnära porsamlingar bearbetas ofta bort när locket får sina slutliga dimensioner.

Undersökningsmetod: Kan endast påvisas vid metallografiska undersökningar.



Figur C-4. Porsamling i överlappszonen på locksvets 35.

Oxidineslutning

Beskrivning: Kopparoxid, se figur C-5.

Storlek: Oxider med utbredning < 300 µm har påträffats.

Lokalisering: Vanligast förekommande nära ytan i ett område som bearbetas bort.

Karakteristik: Se figur C-5.

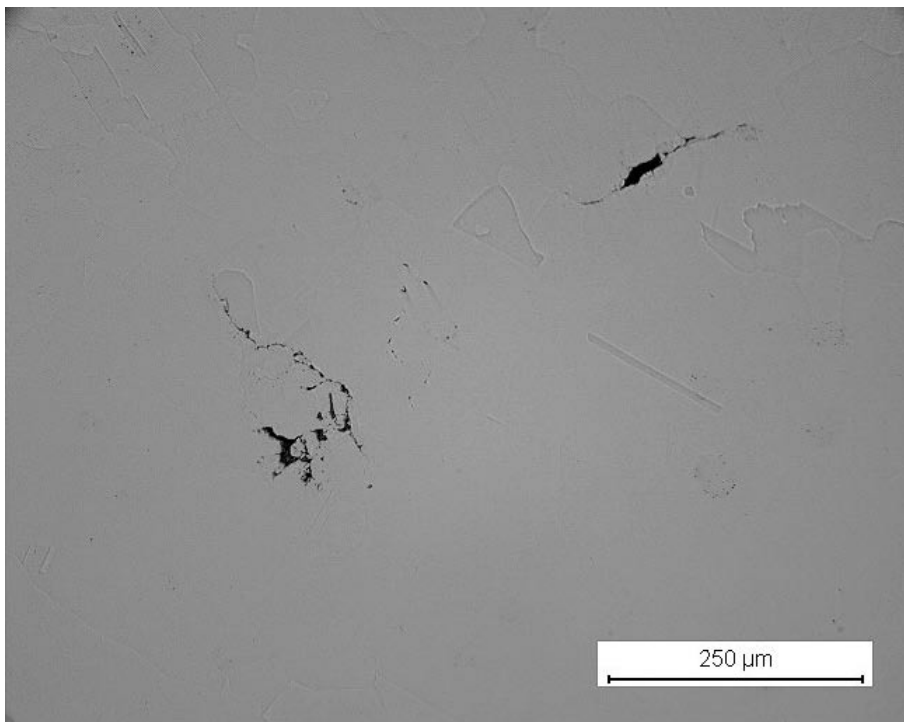
Förekomst: Förekommer i samtliga undersökta locksvetsar, vanligen i överlappssekvensen.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: Mycket liten inverkan på den effektiva korrosionsbarriären.

Orsak: Om svetsningen sker i atmosfär (syre närvarande) oxiderar koppar snabbt och oxiden rörs in i svetsgodset.

Åtgärd: Prov är planerade där svetsning ska ske i skyddsgas (argon).

Undersökningsmetod: Kan endast påvisas vid metallografiska undersökningar.



Figur C-5. Ansamling av oxiderade partiklar i överlappszonen på locksvets 36.

Metallinneslutning

Beskrivning: Spår av verktygsmaterial i svetsgodset.

Storlek: Partiklar med utbredning < 300 µm har påträffats.

Lokalisering: Kan förekomma i hela svetsgodset, dock vanligen nära ytan.

Karakteristik: Se figur C-6, dessa inneslutningar bearbetas dock bort när kapseln får sina slutgiltiga dimensioner.

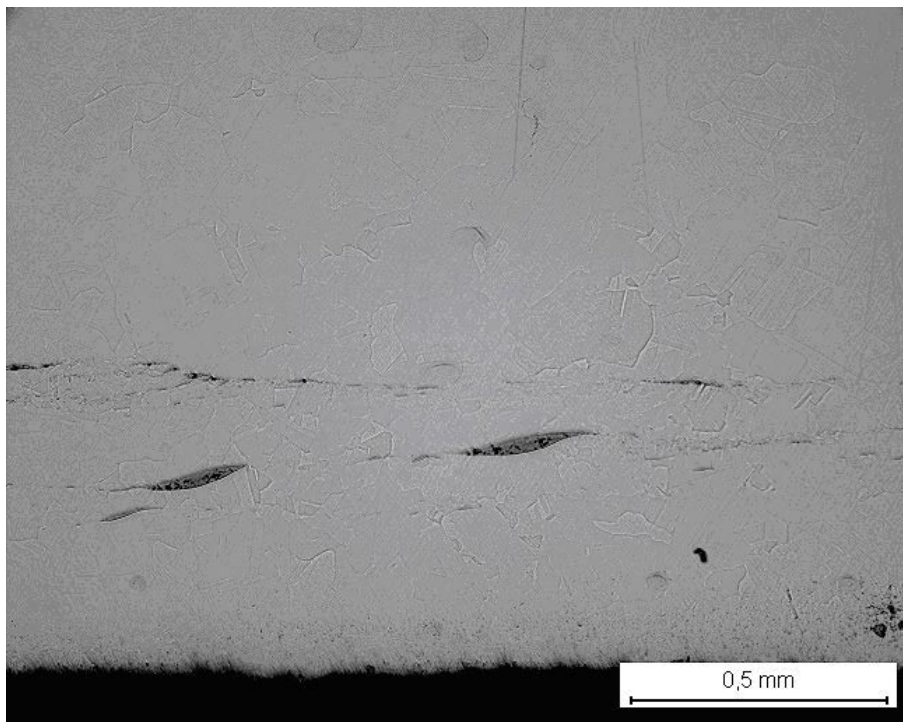
Förekomst: I samtliga locksvetsar.

Betydelse för egenskaper i svetsgodset: På grund av den lilla partikelstorleken bedöms de inte påverka korrosionsbarriären.

Orsak: Nötning av verktyget.

Åtgärd: Kräver vidare utredning, eventuellt nytt tappmaterial och/eller ytbehandling.

Undersökningsmetod: Kan påvisas med högkänslig röntgen på urkapade objekt eller via kemisk analys av svetsgodset som förhöjd halt av främmande metaller.



Figur C-6. Spår av främmande material (W och O) vid kapselytan i locksvets 20.