

R-03-31

Inkapslingsteknik

Lägesrapport 2002

Oförstörande provning

Ulf Ronneteg, Bengt Moberg
Svensk Kärnbränslehantering AB

December 2003

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-03-31

Inkapslingsteknik

Lägesrapport 2002

Oförstörande provning

Ulf Ronneteg, Bengt Moberg
Svensk Kärnbränslehantering AB

December 2003

Sammanfattning

I SKB:s system för deponering av använt kärnbränsle (KBS-3 metoden) utgör kopparkapseln en viktig barriär. Kopparkapseln är konstruerad som en yttre korrosionsbarriär medan insatsen av segjärn är konstruerad för att upprätthålla kapselns mekaniska egenskaper.

För optimering av kapselns tillverkningsprocesser bedriver SKB provtillverkning av kapselns komponenter vid ett flertal leverantörer samt utveckling av förslutningsprocessen vid Kapsellaboratoriet. Oförstörande provning är ett viktigt verktyg för optimering av dessa processer och kommer även ha en viktig roll i arbetet med att säkerställa kapselns integritet i en framtida inkapslingsanläggning.

En första kartläggning över de erfarenheter som erhållits inom oförstörande provning av kapselkomponenter har utförts i samarbete med SKB:s leverantörer. Utifrån denna kartläggning har fortsatta aktiviteter inom området för oförstörande provning identifierats. Dessa aktiviteter kommer huvudsakligen inriktas mot optimering av provningsmetoder och harmonisering av dessa hos respektive leverantör samt se över behovet av automatiserad provning.

SKB har byggt Kapsellaboratoriet för att testa, utveckla och demonstrera utrustning för hantering, svetsning och oförstörande provning av kopparkapslar. För oförstörande provning av förslutningssvetsen har utrustning för digital radiografering, ultraljudprovning (phased array teknik) samt induktiv provning anskaffats. Den oförstörande provningen har visat sig fungera väl som ett instrument för att ge svetsutvecklingsprocessen en snabb återkoppling av uppnådda resultat. Dessutom utnyttjas Kapsellaboratoriet för optimering och utveckling av befintliga metoder för oförstörande provning av förslutningssvetsen samt för att ta fram underlag för verifiering av OFP-metodernas prestanda.

Innehåll

1	Inledning	7
2	Bakgrund – krav på kapselkvalitet	9
3	Utveckling – strategi, arbetssätt	11
4	Kopparkapseln	13
4.1	Gjuten insats	13
4.2	Kopparlock och kopparbotten	14
4.3	Kopparcylinder	15
4.4	Locksvets kopparkapsel	15
4.5	Bottensvets kopparkapsel	18
5	Provmeter	19
5.1	Provning av kopparkomponenter	19
5.1.1	Vallourec & Mannesmann Tubes	19
5.1.2	Wyman Gordon Ltd	20
5.2	Provning av insatsen och dess komponenter	21
5.2.1	Åkers Sweden AB	21
5.2.2	Guldsmedshytte Bruks AB	22
5.2.3	Metso Paper Karlstad AB	23
5.3	Provning av förslutningssvetsen	24
5.3.1	Processutveckling EBW	24
5.3.2	Digital radiografering (RT)	25
5.3.3	Phased array ultraljud (UT)	29
5.3.4	Induktiv provning (ET)	31
5.3.5	Prestandaanalys av kapsellaboratoriets OFP-metoder	32
6	Tillämpad utveckling	35
6.1	Utveckling av provningsteknik av kapselns komponenter	35
6.2	Utveckling kopplad till provning av förslutningssvetsen	35
6.2.1	Mätning av ljuddämpning i koppar	35
6.2.2	Djuppenetrerande induktiv provning för inspektion av kopparkapsel	36
6.2.3	Framtagning av utrustning för automatiserad induktiv provning	37
6.2.4	Implementering av filtreringsalgoritmer vid Kapsellaboratoriet	37
7	Forskning inom oförstörande provning	39
8	Kommentarer	41
8.1	Provning av komponenter	41

1 Inledning

SKB:s huvudlinje för omhändertagande av använt kärnbränsle är deponering i den svenska berggrunden enligt KBS-3-metoden.

En viktig länk i KBS-3-systemet utgörs av inkapslingen av använt kärnbränsle i kapslar som består av en yttre korrosionsbarriär i form av en kopparkapsel och en bärande insats av segjärn. Kapseln skall innesluta det använda kärnbränslet och förhindra spridning av radioaktivitet till omgivningen både under hantering före deponering och under den åsatta livslängden på förvaret.

Under forsknings, utvecklings och demonstrationsfasen studerar SKB olika utformningar av kapseln och olika metoder för tillverkning och förslutning av kapslar. Genom detta arbete erhålls nya kunskaper som kommer att påverka den slutliga utformningen och tillverknings-tekniken för kapseln. Målet är att uppnå en tillförlitlig och effektiv teknik för tillverkning med så liten miljöpåverkan som möjligt.

Redovisningen i detta dokument är en första kartläggning av de erfarenheter och kunskaper som vunnits inom området oförstörande provning (OFP). Denna provning är en viktig del av kontrollen av kapslarnas kvalitet i en framtida process där kapslarna tillverkas och försluts seriemässigt enligt specificerade kvalitetskrav.

Rapporten är utarbetad för att sammanställa de erfarenheter som erhållits vid utveckling av inkapslingstekniken inom området för oförstörande provning men även för att ge en bakgrund för framtida aktiviteter. Rapporten omfattar tidsperioden september 1998–december 2002. Tyngdpunkten är lagd mot verksamheten vid Kapsellaboratoriet och inom Tillverknings teknik men även forskning och utveckling vid Uppsala Universitet berörs översiktligt.

De objekt som behandlas är den gjutna insatsen och kopparhöljet till SKB:s kapsel för förvar av använt kärnbränsle. Förslutningssvetsen är den enskilda del av kapseln där de största insatserna inom OFP koncentrerats. Huvudsakligen har kapslar förslutna med elektronstrålesvetsning (EBW) studerats, men initiala studier har även utförts på material svetsat med ”friction stir welding” (FSW). För kapselns komponenter har aktiviteter inom oförstörande provning främst gjorts på kopparröret och insatsen. Dock har inga konkreta åtgärder utförts på mindre detaljer som exempelvis kopparlock/botten, kanalrör och stållock med tillhörande centrumbult.

2 Bakgrund – krav på kapselkvalitet

Arbetet med att ta fram detaljerade, kvantitativa krav på kapseln sker med utgångspunkt från de funktions- utformnings- och utförandekrav som redovisas i de övergripande konstruktionsförutsättningarna. Av dessa kan nämnas att kopparhöljet skall vara tätt och att speciellt förslutningssvetsen, men även kopparhöljet i övrigt, skall ha tillräcklig hållfasthet för att kunna lyfta den fyllda och förslutna kapseln i locket och motstå hanteringen under deponeringsfasen. Vidare skall kopparhöljet motstå de korrosionsprocesser som förekommer i djupförvaret såväl under den initiala fasen med förhöjd syrehalt som under de långsiktiga förhållanden med lägre syrehalt som förväntas råda i djupförvaret.

Insatsen skall stå mot det yttre övertryck som uppstår i djupförvaret orsakat av svälltryck från bufferten samt vattentrycket på förvarsdjup och även det ökade tryck som kan komma att uppstå under en istid.

De kvantitativa kraven för kapseln är under utarbetande och kommer i en första version att fastställas under 2003. Dessa innefattar definierade krav på materialkvalitet, dimensioner och toleranser samt gränser för tillåtna/otillåtna diskontinuiteter som kan uppstå vid tillverkning och förslutning. Parallellt med detta revideras det befintliga kvalitetssäkringssystemet. Inom ramen för det ställs krav på hur de specificerade kvantitativa kraven ska uppfyllas och redovisas. Kvalitetssäkringssystemet omfattar bland annat rutiner, tekniska specifikationer, ritningar och kvalitetsplaner samt krav på testmetoder och till dem hörande acceptanskriterier.

De kvalitetsmål som ställts upp för utvecklingen av olika processer inom tillverkning, förslutning och kontroll har baserats på en mycket konservativ bedömning i ett tidigare utvecklingsskede och kommer att revideras i samband med att de kvantitativa kraven fastläggs.

3 Utveckling – strategi, arbetssätt

Utvecklingsarbetet inom oförstörande provning drivs utefter flera linjer. Vid Kapsellaboratoriet är arbetet inriktat mot provning av kapselns förslutningssvets medan utvecklingen av OFP av kapselns komponenter utgår från de olika leverantörernas provningsverksamhet.

Kapsellaboratoriet utgör centrum för utveckling och demonstration av inkapslingstekniken. Verksamhetens huvudsakliga syfte är att utveckla och verifiera processerna som krävs för svetsning och OFP samt ta fram underlag för produktionsanpassning och integrering av system och utrustningar för en framtida inkapslingsanläggning.

Processdelen i Kapsellaboratoriet är i princip utformad på samma sätt som planeras i en framtida inkapslingsanläggning. Erfarenheterna från Kapsellaboratoriet används i projekteringsfasen av inkapslingsanläggningen. Eftersom två svetsmetoder utvecklas, elektronstrålesvetsning (EBW) och en variant av friktionssvetsning (friction stir welding, FSW), sker anpassningar av OFP till de olika svetsmetoderna.

Inom området för tillverkning av komponenter har i ett första skede aktiviteter gjorts för att inventera vilka utrustningar, provmetoder samt vilken kompetens som de olika leverantörerna av komponenter förfogar över för oförstörande provning. Utgående från den första inventeringen diskuteras behov av förbättringar med respektive leverantör för att klargöra vad som bör göras och om befintlig kompetens är tillräcklig för detta arbete.

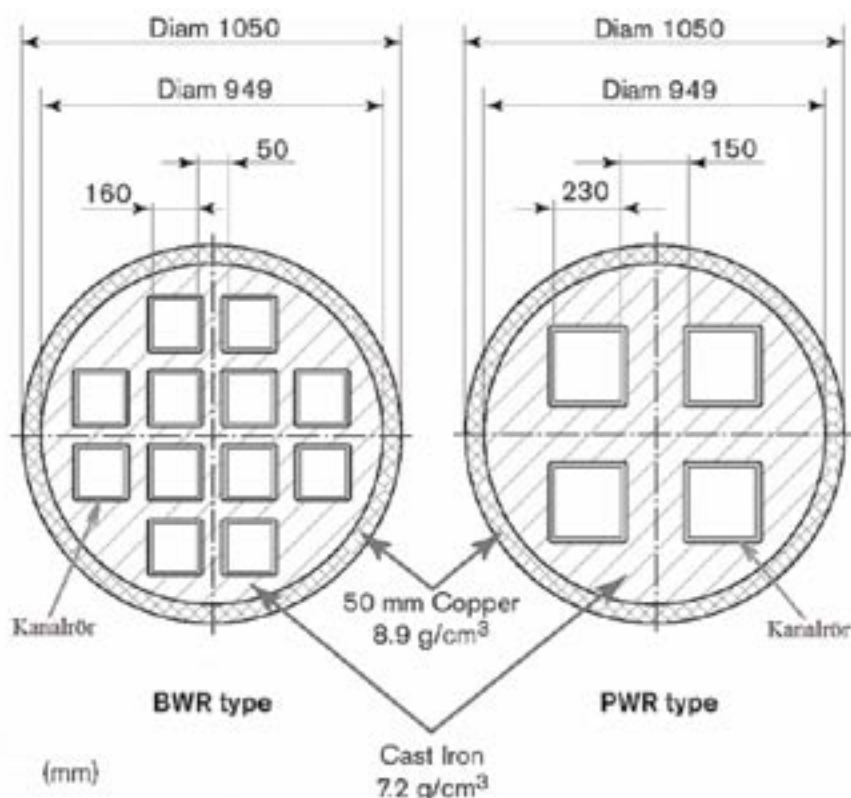
4 Kopparkapseln

I detta kapitel beskrivs de olika komponenterna för att ge en överskådlig bild över vilka objekt som behandlas med avseende på oförstörande provning. För mer detaljerad information hänvisas till senaste rapporten inom Tillverkningsteknik [3].

4.1 Gjuten insats

Detta objekt består i princip av tre olika delar: kassett för bränsleelement, den gjutna omslutande delen samt ett stållock med tillhörande centrumbult. I figur 4-1 nedan visas ett tvärsnitt av kapseln. Insatsen för BWR-element innehåller 12 kanaler medan insatsen för PWR-element innehåller 4 kanaler. Kanalerna är stålror med fyrkantprofil som antingen är heldragna eller svetsade, där den svetsade typen har borttagen invändig svets råge/rot för att säkerställa släta invändiga ytor. De enskilda kanalerna sammanfogas (svetsas) sedan ihop till en kassett.

Kassetten placeras i gjutformen och profilrören fylls med packad sand för att inte deformeras av trycket från smältan vid gjutningen. Gjutsystem och formsättning varierar beroende på tillverkare. De formsättningar som används har varit sandformar och kokiller. Vidare har även två olika fyllnadsmetoder använts: fallande gjutning och stigande gjutning.



Figur 4-1. Tvärsnittet för 12 BWR-element eller 4 PWR-element för kapslar med 50 mm kopparkölje.

Vid fallande gjutning fylls smältan på från toppen rakt ned i formen och vid stigande gjutning leds smältan genom en kanal ned till botten av formen och stiger sedan uppåt inuti formen. Ingen direkt skillnad i kvalitet har varit möjlig att påvisa mellan de olika gjutmetoderna. Speciella tolkar används sedan för att verifiera kanalernas rakhet. Slutligen sker sedan en grovsvarvning av den yttre ytan innan ultraljudsprovning kan utföras.

Insatsens lock maskinbearbetas utgående från en valsad plåt. Materialet är S235JRG2.

Vilket tidigare nämnts, används ett segjärn som material i insatsen. Detta material utvärderas utifrån mekaniska egenskaper genom dragprovning av provstavar som tagits ut på olika platser på insatsen (vidgjutna provstavar). SKB har tagit fram en teknisk specifikation för tillverkningen av dessa segjärnsinsatser. I den nya aktuella standarden SS-EN 1563 motsvaras detta segjärn av EN-GJS-400-15U, vilket är ett segjärn med enbart ferritisk grundmassa. Specificerade mekaniska egenskaper skall uppfylla kraven för godstjocklek $60 < t \leq 200$ mm ($R_m > 370$ MPa, $R_{p0.2} > 240$ MPa, $A > 11$ %).

Följande företag har levererat gjutna insatser:

- Åkers Sweden AB, <http://www.akers.se>
- Guldsmedshytte Bruks AB, <http://www.guldsmedshyttebruk.se>
- Metso Paper Karlstad AB, <http://www.metso.com>

4.2 Kopparlock och kopparbotten

Lock och botten maskinbearbetas utgående från ämnen som förformats genom varmsmide. Tekniken reducerar den efterföljande maskinbearbetningen och ger en relativt finkornig men inte helt homogen kornstruktur som varierar i olika områden av locket. Smidesprocessen görs i en konventionell smidespress och för att optimera denna process pågår studier med avseende på kornstorleksfördelning i lock/botten.

Kornstorleken påverkar materialets ljuddämpning och ur ultraljudprovningssynpunkt är en homogen och fin struktur att föredra.

Som tidigare nämnts har koppar valts som barriär mot korrosion i den miljö som råder i djupförvaret. Valet av barriärskydd har hög prioritet vilket också har resulterat i att SKB sammanställt tekniska specifikationer med krav på kopparmaterialet. Någon direkt motsvarighet till detta kopparmaterial finns dock inte i svensk eller internationell standard. Materialet skall uppfylla kraven i EN 1976:1988 för CuOFE eller Cu OF1 med följande tilläggskrav: O < 5 ppm, P 30–70 ppm, H < 0,6 ppm, S < 8 ppm samt att kornstorleken i smidda ämnen ej får överstiga 360 µm.

Lock och botten har levererats av:

- Scana Steel Björneborg AB, <http://www.scana.se>
- Outokumpu, <http://www.outokumpu.com>

4.3 Kopparcylinder

Kopparcylindern tillverkas av material med samma specifikationer som för lock och botten med en ytterdiameter 1,05 m och en längd på ca 4,7 m (varierar som en följd av använd förslutningsmetod).

SKB har i ett tidigt skede använt tre metoder för provtillverkning av cylindern, rullformning och längssvetsning av valsad plåt, extrudering och dornpressning. Sedan 1998 har provtillverkningen varit fokuserad på varmformningsmetoderna (extrudering och dornpressning). Extruderingen utförs av Wyman Gordon Ltd och dornpressningen av Vallourec & Mannesmann Tubes. För att kravet på kornstorlek skall uppfyllas måste deformationsgraden av materialet och temperaturen vara anpassade såväl för extrudering som för dornpressning.

Under det senaste året har även försök att tillverka rör genom smide utförts vid Scana Steel Björneborg AB.

Extruderingen utförs i två steg: I steg 1 (stukning) placeras götet stående i en mindre press där det under varmformning trycks samman (stukas) till kortare längd och större diameter. Därefter pressas den till en cylinder i en form genom att det görs ett hål rakt igenom centrum med hjälp av ett dorn (hålning). I steg 2 (extrudering) placeras det rörformade ämnet i extrusionspressen där extruderingen sker i ett steg till slutlig dimension.

Även dornpressning utförs i steg: Stukningen i steg 1 utförs som vid extruderingen med undantag att botten behålls vid hålningen, då denna utgör ett stöd för dornarna i den fortsatta formningen. I steg 2 (dragning) placeras dornar i ämnet, vilka pressas mot botten så att materialet dras ut. Denna formning sker oftast i flera steg.

Försök pågår med dornpressningen där målet är att erhålla en integrerad botten med tillräcklig kvalitet och därigenom kunna eliminera den efterföljande svetsningen av botten.

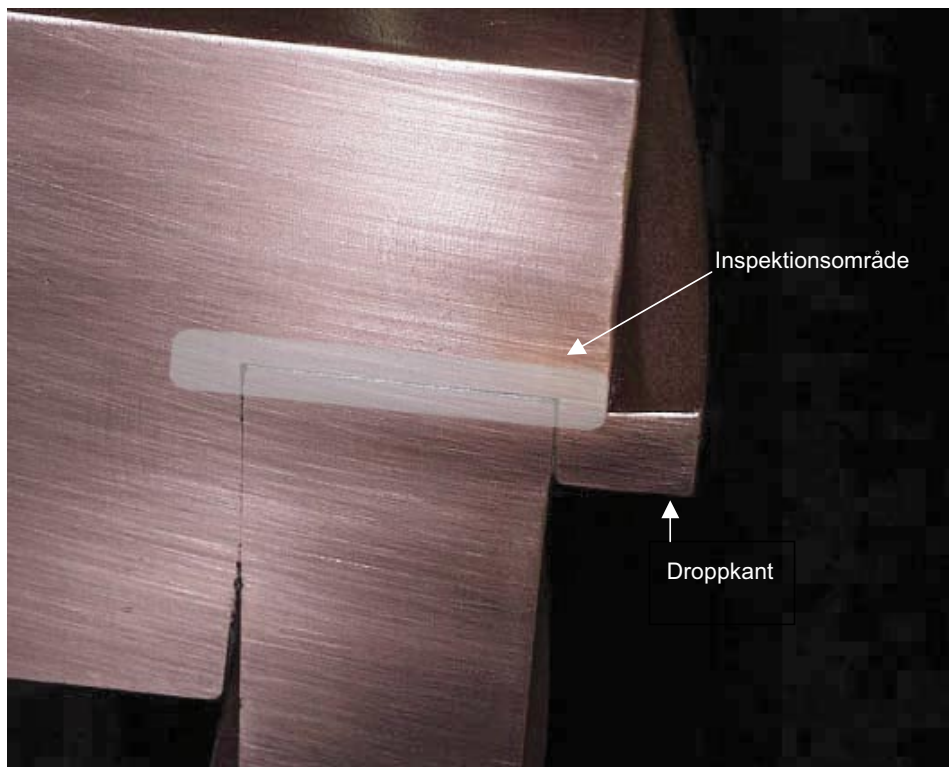
Följande företag har levererat kopparcylindrar:

- Vallourec & Mannesmann Tubes, <http://www.vmtubes.com>
- Wyman Gordon Ltd, <http://www.wyman-gordon.com>
- Scana Steel Björneborg AB, <http://www.scana.se>

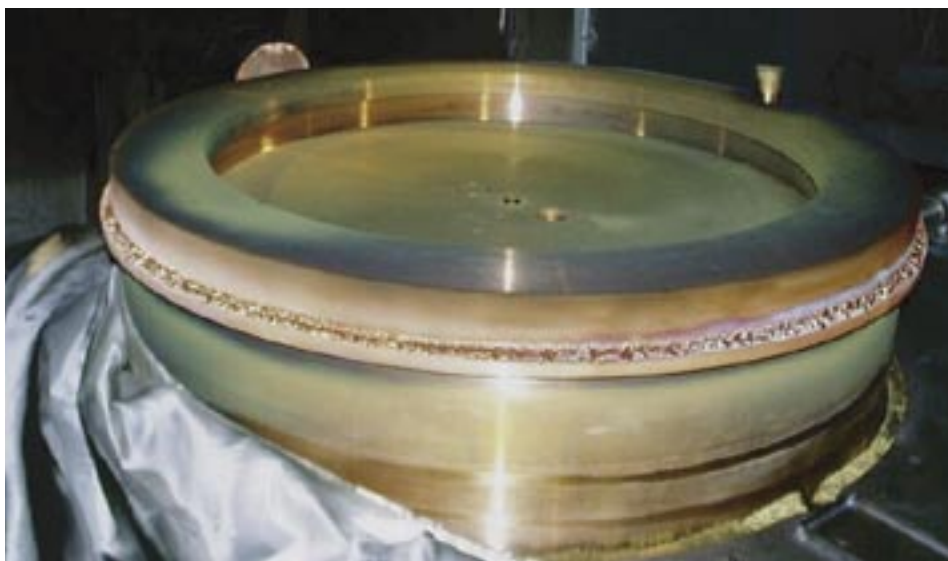
4.4 Locksvets kopparkapsel

En kritisk operation i inkapslingsprocessen är förslutningssvetsningen som fogar kopparlocket till kopparröret. Dels för att svetsning i sig är en komplicerad process, men framför allt för att denna svetsning kommer att utföras på kapslar innehållande använt bränsle. Svetsfogen optimeras för respektive svetsmetod, elektronstrålesvetsning (EBW) och "friction stir welding" (FSW).

Fogutformningen för svetsning av kopparlocket med EBW framgår av figur 4-2. Vid svetsning riktas elektronstrålen horisontellt mot kapseln och strålen penetrerar först genom den yttre delen av locket (7,5 mm), sedan genom fogytan lock/cylinder (50 mm) och slutligen ytterligare ca 10 mm in i locket. Den yttre kanten på locket (fronting bar) fungerar som en droppkant som förhindrar svetsmältan från att rinna under svetsningen. Figur 4-3 visar en elektronstrålesvets före slutbearbetning. Efter svetsning maskinbearbetas svetsens yta och locket till samma mått som cylinderns ytterdiameter.

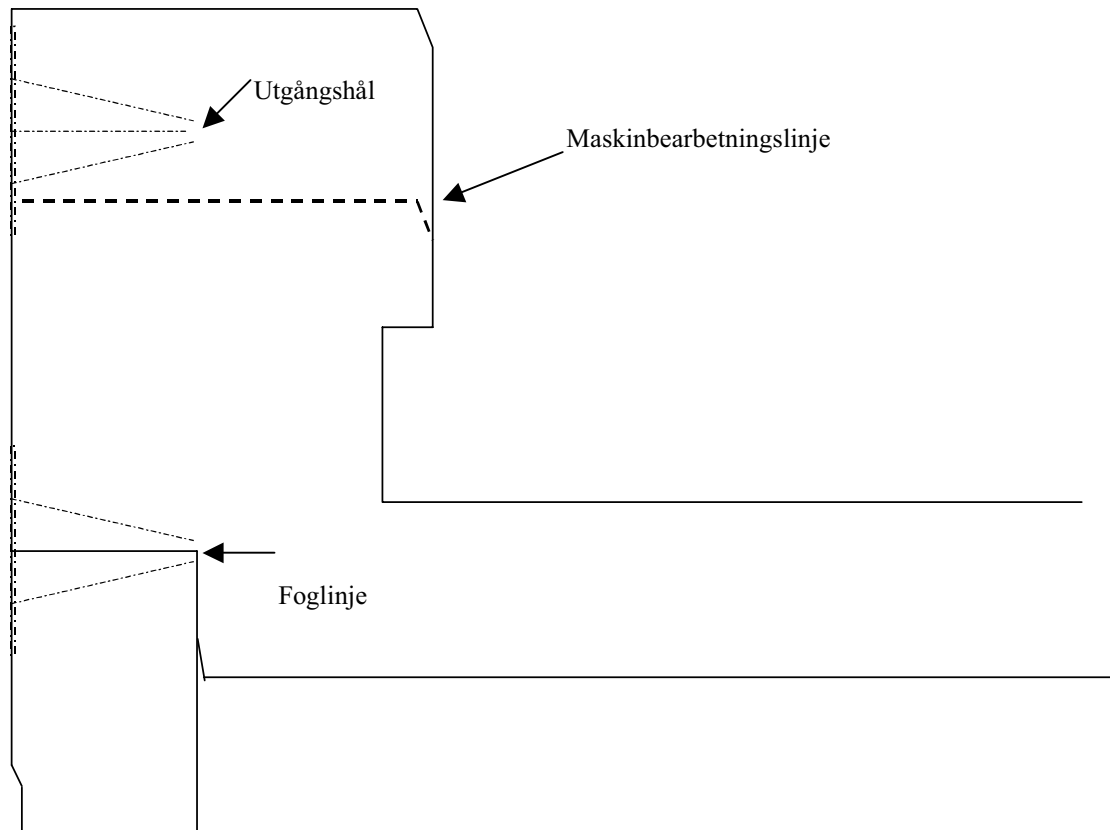


Figur 4-2. Snitt genom fog för elektronstrålesvetsning.

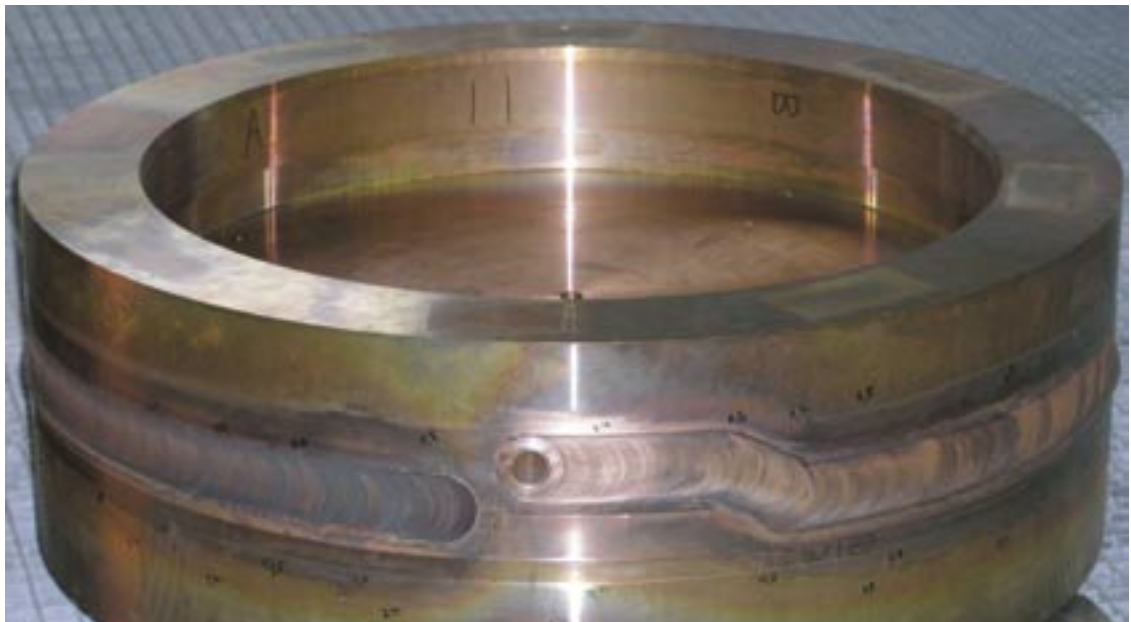


Figur 4-3. Elektronstrålesvetsad kapsel utförd vid Kapsellaboratoriet.

Fogutformningen för FSW skiljer sig från den för EBW huvudsakligen på två punkter, se figur 4-4. Den ena är att droppkanten på locket är borttagen eftersom materialet ej smälts vid svetsningen. Detta medför en stor fördel genom att fogen är synlig vid svetsningen. Den andra är att fogen är flyttad till 100 mm från locket ovankant (60 mm för EBW) för att kunna utnyttja de centrala delarna av locket som mothåll för de krafter som används vid friktionssvetsningen. Dessutom har locket ursprungliga höjd ökat med ytterligare 55 mm för att möjliggöra att svetsverktygets utgångshål kan bearbetas bort. Figur 4-5 visar en FSW svets med utgångshål.



Figur 4-4. Skiss över fogutformning för "friction stir welding".



Figur 4-5. Lock svetsat med "friction stir welding" vid TWI.

4.5 Bottensvets kopparkapsel

Bottensvetsen utförs för närvarande med elektronstrålesvetsning. Jämfört med locksvetsen är denna enklare att utföra och kontrollera då den utförs i ett tidigare tillverkningsskede utan vare sig kapselinsats eller bränsleelement. Fogutformningen är likvärdig med locksvetsen med undantag från att droppkanten är borttagen eftersom kapseln svetsas liggande, vilket innebär en fördel då man har en synlig fog vid svetsningen. Det bör nämnas att alternativa metoder för botten kan komma att användas.

5 Provmetoder

Detta avsnitt behandlar dels de oförstörande provningsmetoder som används inom ramen för tillverkningsteknik av kapselkomponenter och dels de metoder som används vid kapsellaboratoriet för provning av locksvetsen.

5.1 Provning av kopparkomponenter

Här nedan beskrivs den provning som görs på kopparröret och på den integrerade botten som erhålls vid dornpressningen vid Vallourec & Mannesmann. Däremot behandlas inte övriga kopparbottnar och lock då det för närvarande inte görs någon oförstörande provning av dessa. Detta kommer dock att behandlas i det fortsatta arbetet med de oförstörande provningsmetoderna där erfarenheterna från Kapsellaboratoriet kommer att utnyttjas.

5.1.1 Vallourec & Mannesmann Tubes

Vid Vallourec & Mannesmann Tubes (V&M) har den oförstörande provningen demonstrerats i samband med tillverkning av en kapsel med integrerad botten.

Normalt tillverkar V&M grova stålrör och för provning av dessa finns en mekaniserad anläggning för ultraljudsprovning. Denna utrustning är framtagen av Mannesmanns forskningsinstitut för drygt 10 år sedan. Instrumenten är av fabrikatet Karl Deutsch och eftersom den börjar bli gammal planerar V&M att byta ut instrument och styrelektronik. Provningsmetoden som V&M normalt gör på stålrör utförs enligt Stahl Eisen Prüfblatt, SEP 1915/94, 1918/92 och 1919/77.

Provningsmetoden utförs genom att de maskinbearbetade rören roteras på rullbockar medan provningsstationen med ultraljudsökarna löper utefter röret. Ultraljud med 1 MHz frekvens sänds i fem olika riktningar, medsols, motsols, framåt och bakåt med vinkelsökare (45° i stål) samt i radiell riktning med raksökare. Samtidigt som provningen utförs i radiell riktning utförs tjockleksmätning av rörväggen.

Utöver den mekaniska provningen utförs även manuell inspektion av botten delen då den mekaniserade anläggningen ej är anpassad för denna typ av objekt. Inspektionen utförs med en ultraljudsapparat typ Krautkramer USIP11 med rak- och vinkelsökare (45° i stål) med 1 MHz frekvens.

För att ställa in rätt känslighet, samt för att få en uppfattning av vilken detekterbarhet som kan uppnås vid provningen har behovet av en referens i kopparkomponenter diskuterats. Posiva i Finland har tillhandahållit en referensring med samma diameter som kopparcyklindern och med en längd av 340 mm, se figur 5-1, i vilken V&M har tillverkat referensfel förslagna av SKB och Posiva. Dessa fel består av spår på ut- och insidan samt av borrarade flatbottnade hål. På insidan är två längsgående spår (axiell riktning) med 0,75 respektive 1,20 mm djup tillverkade medan det på utsidan finns två spår med 0,6 respektive 1,10 mm djup. Fyra tvärgående spår (tangentiell riktning) är tillverkade, två på insidan och två på utsidan med 0,60 mm respektive 1,15 mm djup. På insidan finns två flatbottnade hål $\varnothing 4$ mm på 46,0 mm respektive 39,8 mm djup samt två med diametern $\varnothing 6$ mm på 46,0 mm och 39,9 mm djup.



Figur 5-1. Provning av V&M referensring i den mekaniserade ultraljudanläggningen.

Ultraljudprovningens detekterbarhet har studerats genom undersökning av referensringens artificiella fel genom såväl manuell som automatiserad provning med 1 MHz sökare. Dessa undersökningar visade att samtliga referensfel detekterades.

Hittills har inga indikationer på diskontinuiteter erhållits med den automatiserade provningen av rör. Däremot har ett flertal diskontinuiteter indikerats i den integrerade botten med manuell provning.

5.1.2 Wyman Gordon Ltd

Wyman Gordon Ltd har tillverkat ca 10 stycken kopparrör. För oförstörande provning av dessa används en mekaniserad utrustning för provning av grova rör. Objektet som provas läggs upp på rullar och roteras medan provningsstationen med ultraljudsökare går på räls utefter rörets längd.

Exempel på använda provningsinstruktioner är: Automatic ultrasonic inspection of pipe MPI No QL 562 vilken bygger på ASTM E213 och Final Inspection Pipe MPI No QL 536 som bygger på MC 2330, MV2100.

Utrustningen består av en Krautkramer KB 6000 ultraljudapparat med 5 kanaler. Till denna är en bildskärm kopplad där kanalerna kan visas separat eller samtidigt. För dokumentation av resultatet används en skrivare som är kopplad till systemet. Enheten för sökarna innehåller sammanlagt fem sökare. Fyra vinkelsökare som riktas både axiellt och radiellt, två i vardera riktningen. Den femte sökaren är en raksökare, vilken används för radiell

avsökning vinkelrät cylinderns tangent. Kopplingen mot ytan görs med en så kallad gap-avsökning. Gap-avsökningen utförs genom att en vattenspalt på ca 0,4 mm åstadkoms mellan sökare och provobjekt.

Tillverkade SKB-rör har provats i denna automatiserade anläggning, dock har enbart ultraljudsprovning varit möjlig att utföras i radiell ledd med raksökare som en följd av en icke maskinarbetad yta. Detta är för tillfället något som inte går att påverka då Wyman Gordon inte har några möjligheter till maskinbearbetning. Vid provningen används en 5 MHz sökare med förstärkning inställd på två fulla bottenekon från rörets insida. Vid denna provning har endast några små ytflagor upptäckts.

Wyman Gordon Ltd har ingen referensring i koppar och den som används vid V&M är för kort för att kunna användas i den automatiserade anläggningen. För att en referensring skall kunna användas krävs en minsta längd på 450 mm. Som referens används i stället stålrör med rätvinkliga spår med ett djup av 5 % av godstjockleken. De raksökare som används är Ø0,5" med frekvens på 5 MHz.

5.2 Provning av insatsen och dess komponenter

Följande kapitel beskriver den provning som görs på den gjutna insatsen vid respektive leverantör. För närvarande görs ingen oförstörande provning på övriga insatskomponenter (kanalrör och stållock med tillhörande centrumbult). Detta kommer dock att behandlas i det fortsatta arbetet med de oförstörande provningsmetoderna.

5.2.1 Åkers Sweden AB

Åkers har tillverkat fem insatser varav fyra har levererats till SKB. Ur dessa har provskivor skickats till Kockums i Malmö för att kontrollera att tillräcklig mekanisk hållfasthet erhållits.

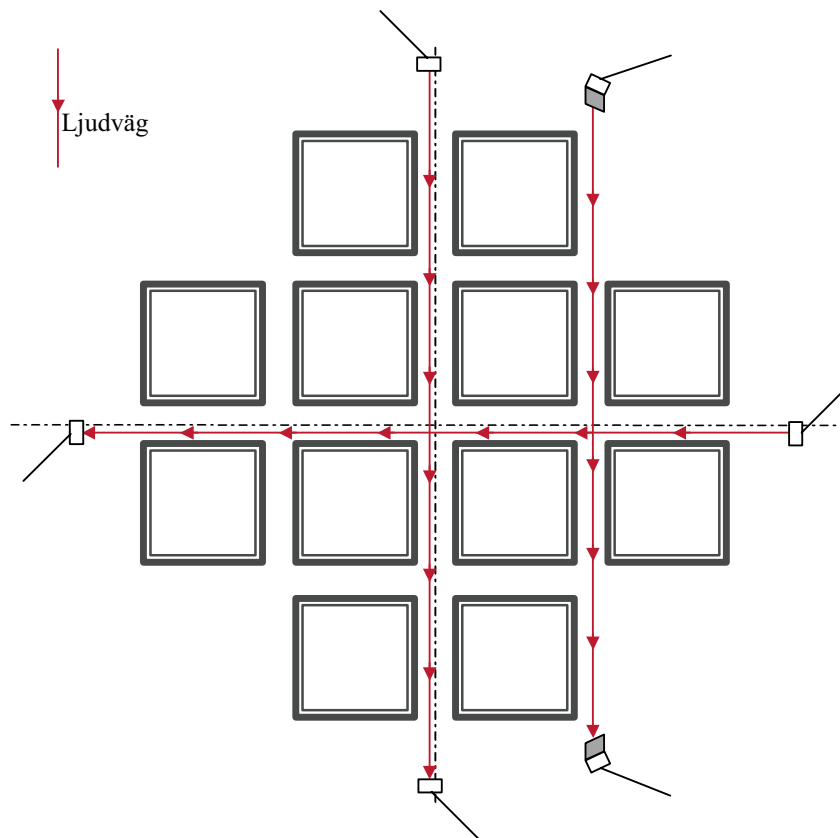
Ultraljudsprovningen av insatserna utförs genom manuell inspektion med ett digitalt instrument (Krautkrämer USM 25) tillsammans med följande sökare:

- Panametrics A6025; 1 MHz Ø1" enkristall.
- Krautkramer K 1 SM; 1 MHz Ø24 mm enkristall.
- Karl Deutsch SE 18/25 PW2; 2 MHz dubbelkristall.
- Karl Deutsch SE 18/16 PB4; 4 MHz dubbelkristall.

Insatserna provas dels i ytzone och dels mellan bränslekanalerna. För inspektion av ytzone har dubbelkristallsökare visat sig vara mest lämpade medan enkristallsökare används för området mellan bränslekanalerna. Det bör kommenteras att ytzone i områden vid hörnen på bränslekanalerna endast är 33–35 mm.

I ytzone har mindre sugningar detekterats med dubbelkristallsökare. Dessa indikationer var relativt tydliga då de gav både felekon samt reducerat botteneko från bränslekanalerna.

Provning av området mellan bränslekanalerna utförs med transmissionsteknik (en sändare och mottagare placerad på var sida om insatsen), se figur 5-2 nedan. Dock har endast de områden som går igenom insatsens centrum provats på detta sätt, då det för övriga områden



Figur 5-2. Principskiss över ultraljudprovning (transmissionsteknik) av områden mellan kanaler.

krävs speciella kilar av exempelvis plexiglas för att rikta ultraljudet i önskad riktning. Det bör dock kommenteras att denna metodik inte är fullt utprovad och kräver vidare utprovning för att vara fullt anpassad. Dessutom kan nämnas att metoden enbart är relevant för relativt stora fel.

Vid Åkers finns en ultraljudsutrustning för provning av yt-zonen på valsar. Denna borde vara möjlig att anpassa till de gjutna insatserna. Utrustningen behöver då modifieras, t ex behövs kraftigare uppläggningsrullar, manipulator med positioneringsutrustning för ultraljudsökarna samt någon form av registreringsutrustning anskaffas.

En sak som bör påpekas är att det för tillfället inte finns någon referens kropp i samma material som insatsen. Detta delvis som en följd av avsaknaden av acceptanskrav för den oförstörande provningen. Dessa krav håller dock på att arbetas fram och i och med detta bör provkroppar kunna tas fram med felstorlekar som uppskattas ligga i närheten av de krav som kan förväntas.

Utöver ultraljudprovning finns även möjlighet att inspektera insatsen yta med magnetpulverprovning och penetrantprovning.

5.2.2 Guldsmidshytte Bruks AB

Guldsmidshytte Bruk har tillverkat fyra insatser varav två har levererats till SKB medan de övriga enbart har används för diverse prov. Ur dessa har provskivor skickats till Kockums i Malmö för att kontrollera att tillräcklig mekanisk hållfasthet erhållits. De hållfasthetskrav som var ställda på gjutningen var godkända med undantag för vissa förlängningskrav.

Guldsmidshytte Bruks AB har utrustning för ultraljudsprovning enligt följande:

- Krautkramer typ USN52.
- Karl Deutsch typ KD1014.
- Karl Deutsch typ KD1024.
- Panametrics 25 DL-HP, tjockleksmätningssinstrument.

Olika typer av ultraljudsökare av olika fabrikat används vid provning:

- Panametrics; 0,5–1 MHz, Ø1" enkristall.
- Krautkramer SEB 2–0°; 2 MHz Ø20 mm dubbelkristall.
- Krautkramer MSEB 2; 2 MHz Ø10 mm dubbelkristall.
- Karl Deutsch SE 18/26 PW2; 2 MHz dubbelkristall.
- Karl Deutsch S 24 W2; 2 MHz enkristall.

Provningsen med ultraljud utförs genom att insatsen roteras i en stor svarv medan sökaren hålls för hand och avsöker insatsen från utsidan. Detta innebär att områdena mellan kanalerna ej provas. Då provning utförs med dubbelkristallsökare har mindre sugningar indikerats genom såväl reducerat botteneko samt felekon.

För transmissionsprovning av materialet mellan kanalerna bör någon typ av positioneringsutrustning införskaffas. Dessutom bör den delvis mekaniserade provningen kompletteras med någon form av registreringsutrustning för att säkerställa att provningen utförs med god kvalitet.

Vid provningen har hittills inga referensroppar i segjärn använts. Dock har denna typ av provroppar med flatbottenhål beställts för att kunna användas vid kommande provningar.

Utöver ultraljudprovning finns även möjlighet att inspektera insatsen yta med magnetpulverprovning och penetrantprovning.

5.2.3 Metso Paper Karlstad AB

Metso Paper har tillverkat fem till sex insatser som har levererats för diverse prov. Även ur dessa har provskivor skickats till Kockums i Malmö för kontrollera att tillräcklig mekanisk hållfasthet erhållits.

Företaget använder delvis inhyrd personal samt till viss del även inhyrd utrustning. För den oförstörande provningen finns följande utrustning tillgänglig:

- Krautkramer typ USD10 och USM25 med tillhörande lämpliga sökare. Notera att felstorleksbestämning med AVG ofta utförs.
- Utrustning för magnetpulver- och penetrantprovning.
- Utrustning för radiografisk provning, vilken hyrs in vid behov.

De insatser som tillverkats har hittills provats för hand i ytzone. Här finns möjlighet att använda både ultraljud-, magnetpulver- och penetrantprovning för att provning yt-skiktet. Som referens för ultraljudprovningen används en referensropp tillverkad i segjärn med flatbottnade hål.

Metso Paper förfogar över en mekaniserad utrustning för ultraljud och denna sätts upp i en svarv för avsökning av stora cylindrar. Utrustningen är nyligen moderniserad med ett nytt Windowsbaserat datorprogram. I fortsättningen är det tänkt att denna utrustning ska användas vid ultraljudprovningen av segjärnsinsatserna.

Vissa försök har också, enligt uppgift, utförts för att prova områdena mellan kanalerna. Men för att möjliggöra en tillförlitlig provning måste någon form av utrustning anskaffas för positionering och manövrering av sökarna.

5.3 Provning av förslutningssvetsen

SKB har byggt Kapsellaboratoriet för att testa, utveckla och demonstrera utrustning för hantering, svetsning och oförstörande provning av kopparkapslar. För oförstörande provning av förslutningssvetsen har utrustning för radiografering, ultraljudprovning samt induktiv provning anskaffats. Dessa utrustningar kan dock efter vissa modifieringar till viss del även användas på andra kapselkomponenter. Inriktningen på det arbete som utförs inom OFP vid kapsellaboratoriet kan beskrivas enligt följande:

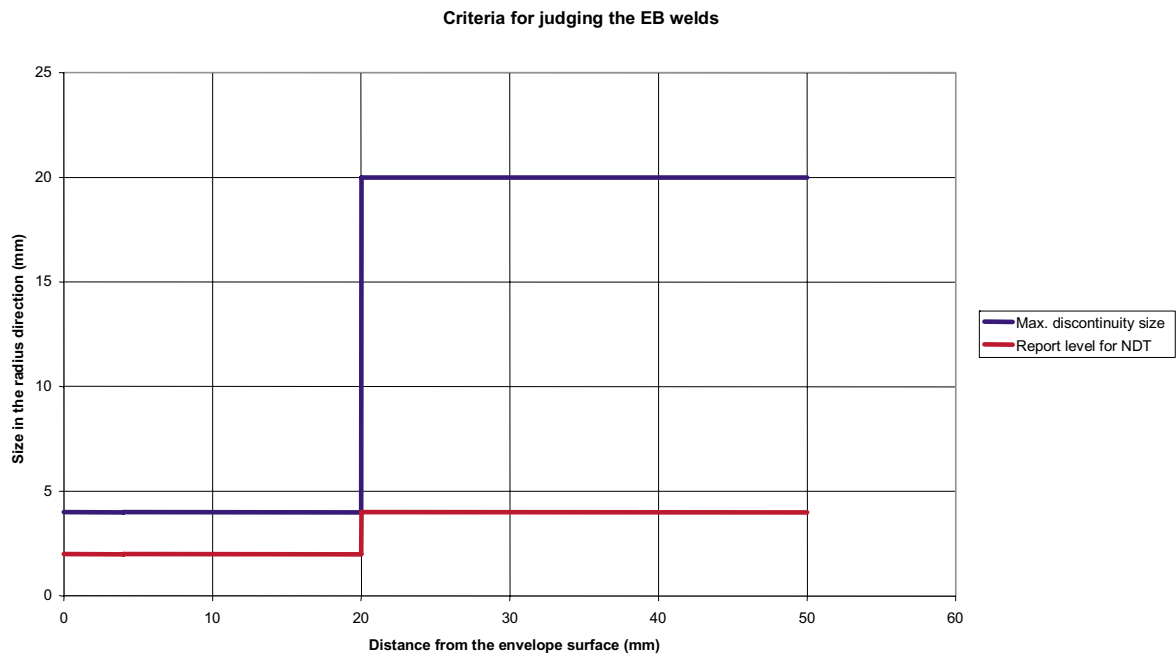
1. Ge snabb återkoppling till svetsutvecklingsprocessen. Idag består denna enbart av projekt EBW men i början av 2003 innefattar den även projekt FSW.
2. Testa och utveckla befintliga metoder för oförstörande provning av förslutningssvetsen.
3. Verifiera OFP-metodernas prestanda.

Kommande kapitel beskriver stödprocessen mot svetsprojekten samt de befintliga OFP-systemen på Kapsellaboratoriet med avseende på tekniska specifikationer och på dess funktionalitet.

5.3.1 Processutveckling EBW

En viktig del av arbetet med OFP vid Kapsellaboratoriet är att ge svetsutvecklingsprojektet EBW effektiv återkoppling av uppnådda svetsresultat. Detta genom att med OFP kartlägga svetsade komponenter inför fortsatta svetsförsök. Eftersom projekt EBW är inriktat på utveckling av en ny relativt komplicerad process har försöken resulterat i svetsar av varierande kvalitet, vilket har bidragit till att goda erfarenheter har erhållits över de befintliga OFP-systemens prestanda. Totalt har tjugotal locksvetsar undersökts med både röntgen och ultraljud, såväl före som efter maskinbearbetning. Dessutom har ett hundratal provblock undersökts med röntgen.

Konsekvent bedömning av svetsresultaten med god spårbarhet säkerställs genom skriftliga rutiner för provning med röntgen och ultraljud. Dessutom har även preliminära utvärderingskriterier för utveckling av svetsprocessen etablerats. Dessa kriterier baseras på konservativa bedömningar av tillåtna diskontinuiteter i svetsen samt genom undersökningar över OFP-metodernas förmåga att detektera och storleksbestämma diskontinuiteter. Huvudprinciperna för dessa kriterier för svetsutvecklingsarbetet vid Kapsellaboratoriet visas i figur 5-3 nedan. Den röda linjen representerar rapportnivån för den oförstörande provningen medan den blå linjen representerar maximal acceptabel defektstorlek i svetsen. Det bör påpekas att en del av svetsförsöken har utförts för utprovning av parametrar medan en del har haft som huvudmål att uppfylla dessa kriterier.



Figur 5-3. Bedömningskriterier för svetsutvecklingsprocessen vid Kapsellaboratoriet.

5.3.2 Digital radiografering (RT)

Våren 1999 driftsattes det system för digital radiografering som levererades hösten 1998 till Kapsellaboratoriet av BIR (Bio-Imaging Research Inc.). Syftet med detta system för radiografering var huvudsakligen att inspektera locksvetsar med avseende på porer. Vid upphandlingen av detta system var det krav som var dimensionerande att det skulle kunna detektera 1 mm stora porer i 100 mm koppar. För att kunna innehålla dessa kriterier identifierades att ett konventionellt system för radiografering ej skulle vara tillräckligt och att man då även skulle kunna få problem med svärtning av film som en följd av att den laddade kapseln avger strålning. Ett annat dimensionerande krav var att inspektionstiden ej skulle vara begränsande för processen i inkapslingsanläggningen.

Systembeskrivning

Kapsellaboratoriets system för digital radiografering består av följande huvudkomponenter (figur 5-4):

1. 9 MeV linjär accelerator.
2. Detektorsystem.
3. Manipulator.
4. Mjukvara för parameterinställning och utvärdering av resultat.

BIR verkade som systemleverantör genom att för egen del utföra design och montering. Linjär acceleratoren är dock en standardiserad industriprodukt från Varian Medical systems som BIR integrerat med sitt eget system. Denna accelerator har exceptionell prestanda med avseende på att generera röntgenstrålning med hög energi och hög dosrat. Den höga dosrat på upp till 3000 krad/min som acceleratoren kan generera kräver mycket speciella skyddsanordningar, exempelvis består röntgenkammaren av upp till 1,8 m tjocka betongväggar som kompletteras av 0,3 m stål i strålgången för att förhindra läckage.



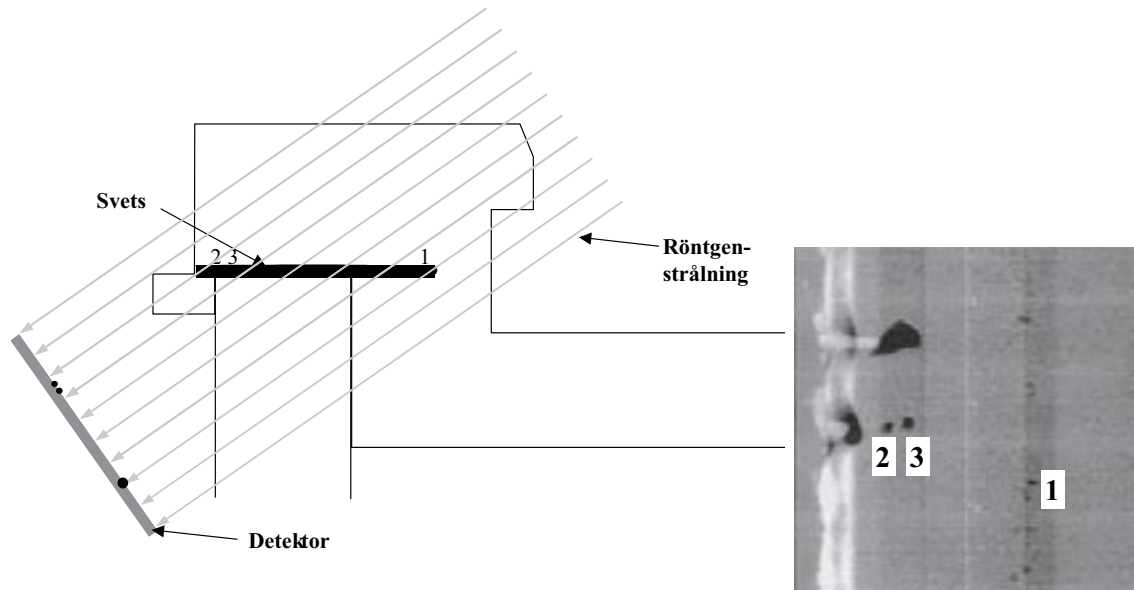
Figur 5-4. Röntgenutrustning för provning av elektronstrålesvetsat kopparlock.

Metodik

För att säkerställa att god och repeterbar kvalitet uppnås vid radiografering av kapselns locksvets har rutiner för detta fastställts. Dessa omfattar parameterinställningar, mekaniska inställningar, referensmaterial samt utvärderingskriterier.

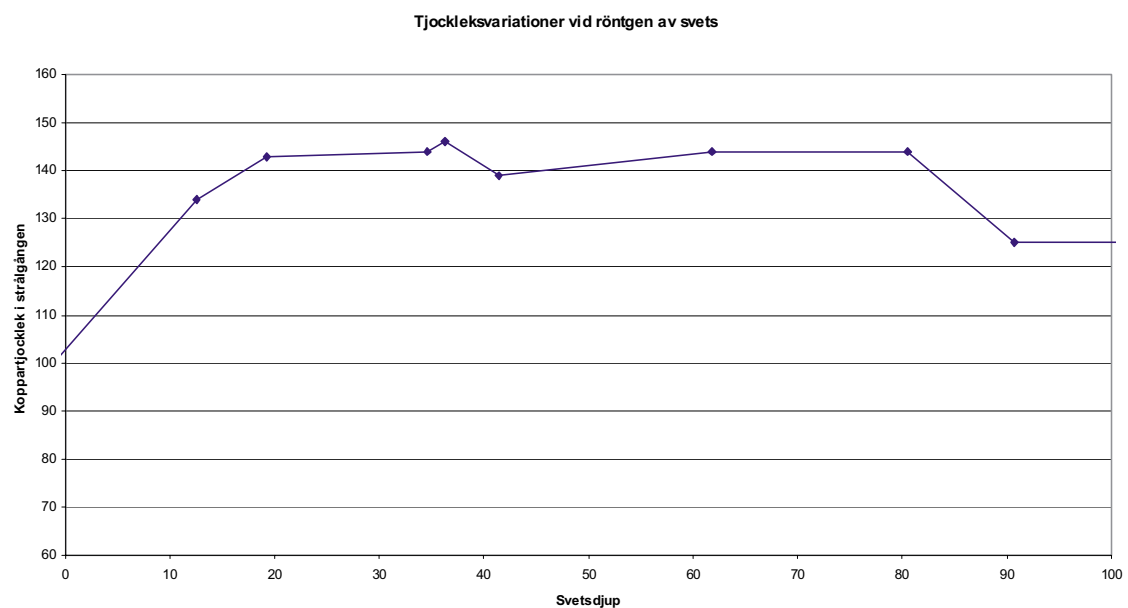
Huvudprincipen för metodiken innebär att kapseln roterar medan acceleratorn pulserar röntgenstrålning genom svetsen med 35° infallsvinkel (se figur 5-5a nedan). Den transmitterade strålningen detekteras av en linjär detektor (100 mm hög) placerad vinkelrätt mot strålriktningen med 0,4 mm upplösning (kanalbredd) i vertikal ledd. I horisontell ledd uppnås samma upplösning genom att en kollimator fokuserar strålningen och för varje 0,4 mm rotation av kapseln (beräknat på en kapseldiameter på 1000 mm) töms detektorn på data och av dessa detektorlinjer byggs röntgenbilden upp (se figur 5-5b nedan).

Siffrorna i figuren ovan visar var indikationerna i röntgenbilden till höger är lokaliserade i svetsen. Det vita mönstret till vänster i röntgenbilden är en effekt av svetsytans struktur och den vertikala axeln representerar svetsriktningen med nollpunkten i ovankant.



Figur 5-5a. Skiss över radiografisk provning av EB svets.

Figur 5-5b. Röntgenbild.



Figur 5-6. Tjockleksvariationer vid radiografering av lock EB-svetsat före maskinbearbetning.

För kompensering av de kraftiga tjockleksvariationer (se figur 5-6) som framför allt provning före maskinbearbetning innebär, utförs en medelvärdeskalibrering. Denna görs genom att delar av kapselns omkrets scannas i ca 500 mätpunkter och att medelvärdet för varje detektor kanal beräknas. Vid provningen utnyttjar sedan systemet dessa medelvärden som referens.

För att säkerställa den radiografiska känsligheten vid provningen används 1 och 2 mm kopparpenetratorer som uppfyller krav enligt ASME SEC V ART. 22 SE 1025/ASTM E1025/ASTM E142.

Erfarenheter – prestanda

Arbetet med digital radiografering vid Kapsellaboratoriet har medfört att ett antal såväl instrumentrelaterade som metodrelaterade erfarenheter vunnits.

De instrumentrelaterade av betydelsefull vikt är:

- Det levererade kylsystemet för detektorn havererade och ersattes med ett mer modernt system som dock var underdimensionerat för befintlig slanglängd. Detta medförde att kylaren fick placeras nära detektorn i röntgenkammaren med följd att extra strålskärning fick byggas.
- Ett detektorhaveri på grund av att elektronikkomponenter utsatts för kondens från kylsystemet inträffade under år 1999. Detta åtgärdades av leverantören med bättre isolering av elektronikkomponenterna och sedan dess har detta inte varit något problem.
- Under slutet av år 2000 började intermittenta fel uppkomma vid provning. Efter diverse felsökningar skickades detektor och dess kontrollenhet till leverantören. Det visade sig vara några lödningar i kontrollenheten som ej hade fullständig kontakt som gav upphov till dessa fel. Efter fullständig genomgång av samtliga lödningar har detektorsystemet fungerat utan problem.
- Under år 2000 havererade en axelkoppling i manipulatorn vilken ersattes med en standardkomponent.
- I början av år 2002 inträffade ett stort haveri på systemets accelerator. Det var delar av kylsystemet i RF-systemet som brast. Med åtföljd av att hela RF-systemet blev vattenfyllt och flertal av komponenterna förstördes. Efterräkningarna från detta haveri är inte helt klargjorda än då det finns viss risk att accelerators primära komponent kan behöva bytas ut, vilket är en mycket stor reparation. Detta kommer att utredas under början av 2003 och om reparation krävs kommer detta göras vid lämplig tidpunkt för projekten vid Kapsellaboratoriet.
- Bortsett från de rena komponenthaverier som inträffat har systemet (dator/mjukvara/styrssystem) fungerat utan några problem.

De metodrelaterade av betydelsefull vikt är:

- Metoden har visat sig vara ett mycket bra verktyg i svetsutvecklingsprocessen då den ger en tydlig överskådlig bild av svetskvaliteten.
- Kapselns kast och ovalitet är kritisk för radiograferingens kvalitet och för lägesbestämning av diskontinuiteter i kapselns radiella ledd.
- Lägesbestämning av diskontinuiteter i kapselns radiella ledd behöver troligtvis förbättras.
- Sprickliknande diskontinuiteter med liten utbredning i kapselns axiella ledd är svåra att detektera.
- För att få en mer säker bedömning av diskontinuiteter i framtiden krävs ett bättre system för utvärdering av indikationer.

5.3.3 Phased array ultraljud (UT)

I slutet av 1998 driftsattes det system för Phased Array Ultraljudprovning levererat av RD/Tech. Den ursprungliga upphandlingen av systemet gjordes dock med NDT Systems, men i och med att de fick finansiella problem slutfördes leveransen med RD/Tech. Syftet med detta Phased Array system var huvudsakligen att inspektera elektronstrålesvetsade lock. Vid upphandlingen av detta system var det krav som var dimensionerande att det skulle kunna detektera 1 mm stora porer i 100 mm koppar, dessutom fanns önskemål om en kort inspektionstid. För att kunna innehålla dessa kriterier identifierades användning av Phased Array ultraljud som lämplig teknik.

Systembeskrivning

Kapsellaboratoriets system för phased array ultraljudprovning består av följande huvudkomponenter (figur 5-7):

1. All-In phased array system.
2. 80 elements ofokuserad arraysökare med 2,7 MHz centerfrekvens.
3. Dataprogram
 - Astus Configuration (generering av fokuseringsinställningar),
 - Astus Acquisition (inställning av ultraljudparametrar och datainsamling),
 - Astus Exploitation (utvärdering av resultat).
4. Manipulator med system för generering av vattenspalt som kopplingsmedel.



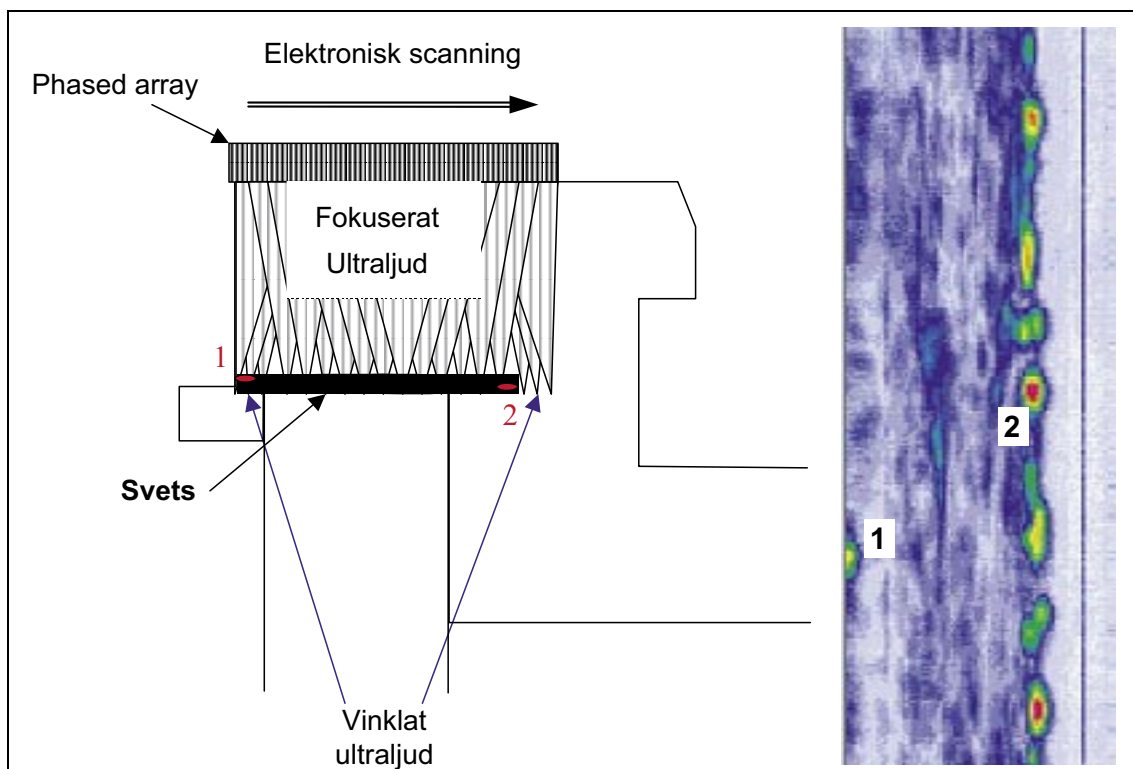
Figur 5-7. Ultraljudutrustning för inspektion av elektronstrålesvetsat kopparlock.

Metodik

För att säkerställa att god och repeterbar kvalitet uppnås vid ultraljudprovning av kapselns locksvets har rutiner för detta fastställts. Dessa omfattar parameterinställningar, referensmaterial samt utvärderingskriterier.

Huvudprincipen för metodiken innebär att kapseln roterar medan ett 80 elements phased array elektroniskt scannar i kapselns radiella ledd (se figur 5-8a). Som kopplingsmedel används en tunn vattenfilm som erhålls genom att vatten pumpas i spalten mellan arrayet och lockets ovansida. För att täcka hela EB-svetsen vid provningen används en array konfiguration. Denna består av en sekvens med vinklat ultraljud mot kapselns mantelyta, fokuserat ultraljud i mitten och vinklat ultraljud mot kapselns inre kant. Då ultraljudet vinklas används 16 element för fokusering medan det i mitten av svetsen används upp till 32 element för fokusering. Resultatet från provningen presenteras sedan som ett C-scan bestående av maximala amplituden för respektive indexpunkt.

I figur 5-8b visas ett C-scan med svetsytan till vänster medan det ljusare området till höger indikerar området innanför svetsen i locket. Grundmaterialet i locket har finare kornstruktur än det svetsade materialet, vilket kan användas för bestämning av svetsdjupet. Bildens vertikala ledd följer kapselns rotationsriktning.



Figur 5-8a. Skiss över ultraljudprovning av EB svets.

Figur 5-8b. C-scan ultraljudbild.

Erfarenheter – prestanda

Arbetet med phased array ultraljudprovning vid Kapsellaboratoriet har medfört att följande erfarenheter vunnits:

- I och med att RD/Tech inte själva står bakom All-In systemet och att de själva har egna phased array system, har de som företag inte visat något större intresse för vidare utveckling av systemet. Detta har framför allt medfört en del svårigheter då mjukvaran innehar flertal buggar som försvårar arbetet och till och med innebär förvanskning av viss data.
- Fixturen för arrayet som medföljde leveransen var mycket instabil och näst intill omöjlig att använda. Detta medförde att en ny konstruerades och tillverkades, vilken fungerar tillfredställande.
- För att kunna utföra en mer heltäckande provning genom att använda varierande phased array konfigurationer krävs ett mer modernt system.
- För provning av FSW objekt identifierades att ett mer flexibelt system krävs. Upphandlingen av detta startades under våren 2002 och det levererades av Technology Design Ltd under slutet av året.
- Ultraljudprovningen av elektronstrålesvetsade lock har visat sig fungera väl som ett redskap i svetsutvecklingsprocessen. Dels har den varit ett bra komplement till radiograferingen då oklarheter vid tolkning av indikationer uppkommit men den har även indikerat på andra typer av fel, t ex då svetsen missat fogen (bindfel). Den har även fungerat mycket väl för bestämning av svetsdjupet då den grova svetsstrukturen indikeras mycket väl.

5.3.4 Induktiv provning (ET)

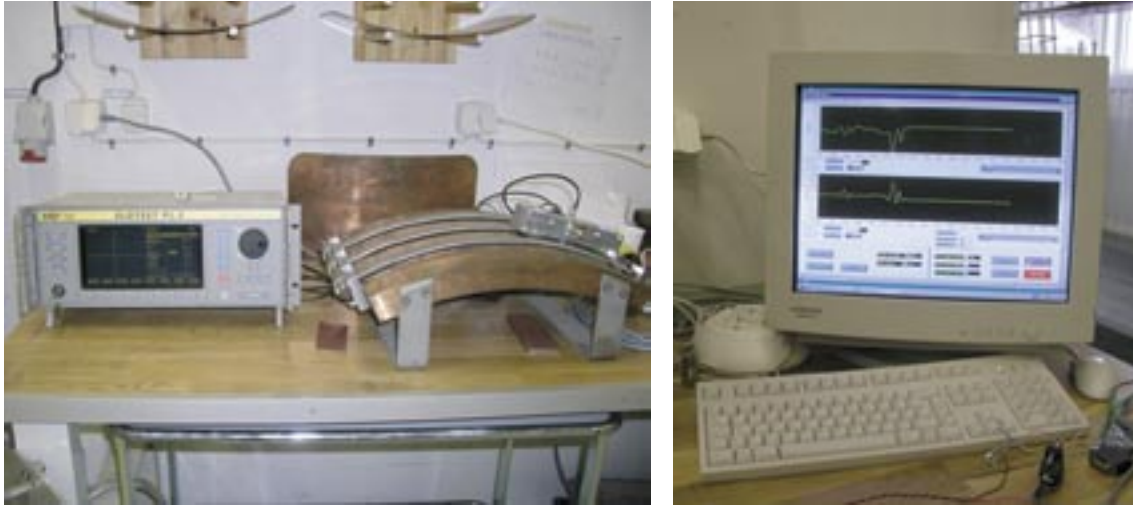
I de preliminära bedömningskriterierna fanns ett krav på god detekterbarhet av ytnära diskontinuiteter. Därför anskaffades utrustning för induktiv provning i form av två instrument från Rohmann (Elotest PL.E.) under slutet av 1999. Ett av instrumenten placerades på Uppsala Universitet (Signaler och System) för forskningsändamål och det andra på Kapsellaboratoriet.

Ett projekt startades under 2000 i samarbete med TSonic i Uppsala för optimering av spolar och provinställningar för att studera metodens möjliga prestanda på artificiella fel. Etapp 2 av detta projekt pågår och förväntas slutföras under första halvan av 2003. På Kapsellaboratoriet har endast initiala försök utförts. Dessa klargjorde ett stort behov av datainsamlingsutrustning till ET-instrumentet för att kunna göra vidare framsteg. Ett sådant system anskaffades under 2002 från TSonic och beräknas bli driftsatt i början av 2003.

Systembeskrivning

Kapsellaboratoriets system för induktiv provning består av följande huvudkomponenter (figur 5-9):

1. ET-instrument Elotest PL.E. (Rohmann).
2. Lågfrekvent multidifferentiell ET-probe.
3. National Instruments datainsamlingskort.
4. LabView baserad programvara för datainsamling och utvärdering av signaler levererat av TSonic.



Figur 5-9. System för induktiv provning.

Metodik

Metodik är under framtagning men provningen beräknas ske genom att kapseln roterar medan spolen avsöker ytan och såväl X- som Y-signalen från ET-instrumentet registreras. Det är ännu oklart hur många indexeringar i kapselns axiella ledd som krävs för att täcka svetsen.

Erfarenheter – prestanda

Som en följd av att systemet ej fullt ut är driftsatt är erfarenheterna från induktiv provning av svetsar ytterst begränsade. Dock har en del erfarenheter erhållits i projektet i Uppsala som visar på möjligheten att detektera 1 mm diskontinuiteter ner till 4 mm djup. Försöken visar även på goda möjligheter att lokalisera och storleksbestämma dessa med undantag för utbredningen i kapselns radiella ledd. Det bör dock observeras att dessa försök endast är utförda på artificiella diskontinuiteter i ren koppar. Vidare försök på mer verklighetstroga fel i svetsad struktur pågår i nuvarande projekt. Dessutom kommer produktionsmässig provning troligtvis startas under första halvåret 2003 på verkliga objekt, vilken förväntas ge en hel del erfarenheter av metodens prestanda och tillförlitlighet.

5.3.5 Prestandaanalys av kapsellaboratoriets OFP-metoder

I och med att kopparkapselns elektronstrålesvets är ett specifikt provobjekt och de OFP-metoder som används vid Kapsellaboratoriet baseras på relativt ny teknik är det svårt att förutse provmetodernas prestanda utan att göra praktiska försök. För att få en första indikation över metodernas prestanda har ett antal indikationer undersökts makroskopiskt.

Undersökningarna har utförts enligt följande:

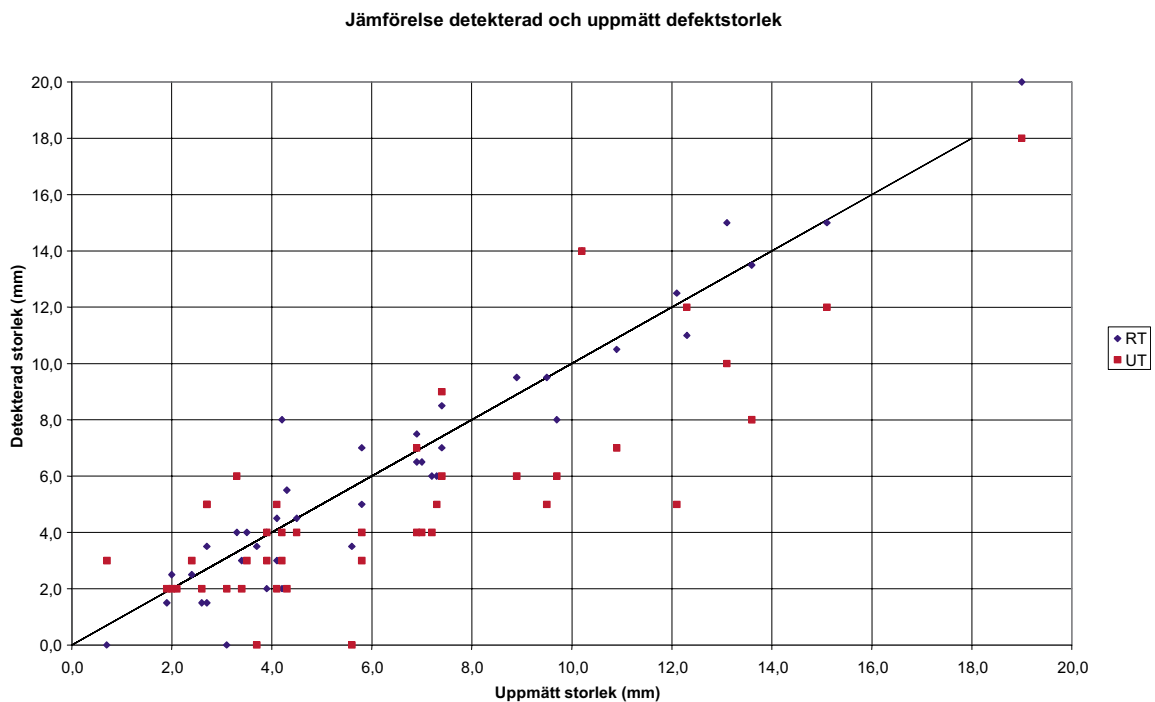
- Intressanta indikationer från radiografering och ultraljudprovning av tio locksvetsar har identifierats och markerats.
- Vid respektive indikation har borrhärnor tagits ut i kapselns radiella ledd.
- Borrhärnorna har sedan undersökts med röntgen såväl tvärs svetsen som i svetsens tangentiella ledd för att lokalisera diskontinuiteterna tillräckligt noggrant för att kunna bearbeta fram dessa med god tillförlitlighet.

- Diskontinuiteterna har sedan bearbetats fram genom fräsning från borrhårens ovkant och ner i svetsen. I området där diskontinuiteterna förväntas vara lokalisering har bearbetning utförts med 0,1–0,2 mm/skär för att möjliggöra bestämning av utbredningen i radiell ledd.
- Slutligen har diskontinuiteternas storlek och läge uppmätts med hjälp av mikroskop.

Resultatet av dessa undersökningar indikerar på goda prestanda då 95 % av de undersökta diskontinuiteterna detekterats med såväl ultraljud som radiografisk provning. I övrigt kan dessa undersökningar kommenteras enligt följande:

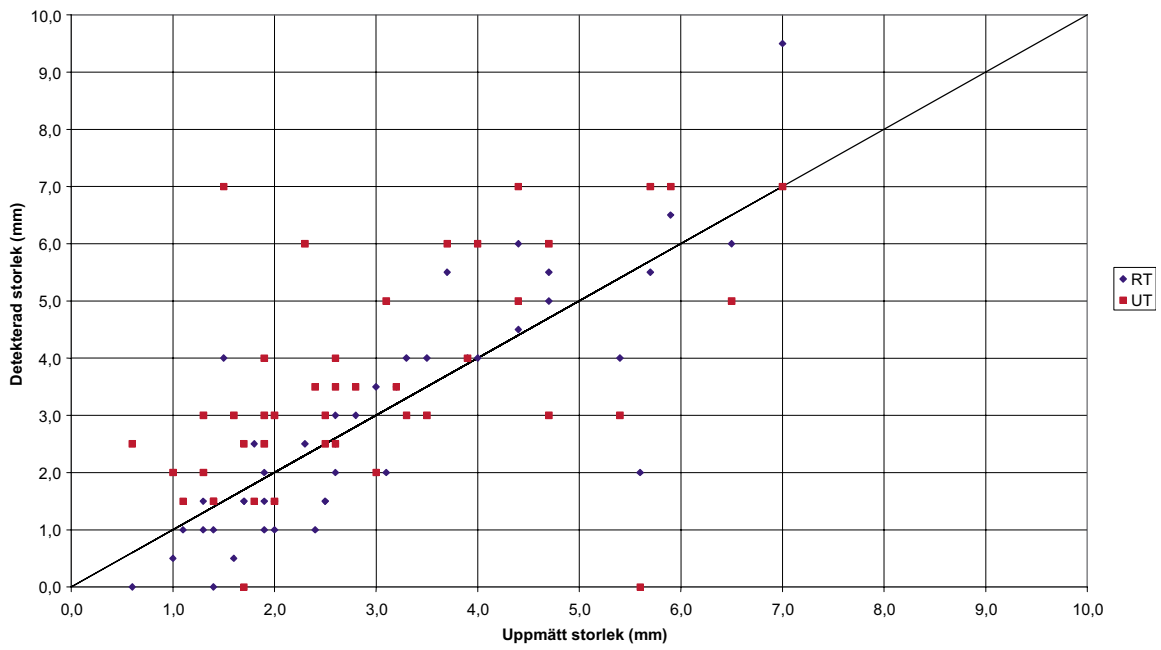
- Röntgen visar på bättre noggrannhet än ultraljud angående storleksbestämning, se figur 5-10 och 5-11. För röntgen storleksbestämdes närmare 90 % av diskontinuiteterna inom 2 mm från uppmätt värde medan motsvarande värde för ultraljud är ca 50 %.
- Angående bestämning av diskontinuiteternas avstånd från ytan visar undersökningarna på liknande resultat för båda metoderna dvs omkring 75 % av diskontinuiteterna bestämdes med en noggrannhet bättre än 2 mm, se figur 5-12.

Syftet med dessa undersökningar har varit att ge en första indikation av metodernas prestanda. Däremot är de inte optimerade för bestämning av metodernas detekteringsförmåga eftersom urvalet av undersökta diskontinuiteter gjorts slumpmässigt och att icke detekterade diskontinuiteter har undersökts.



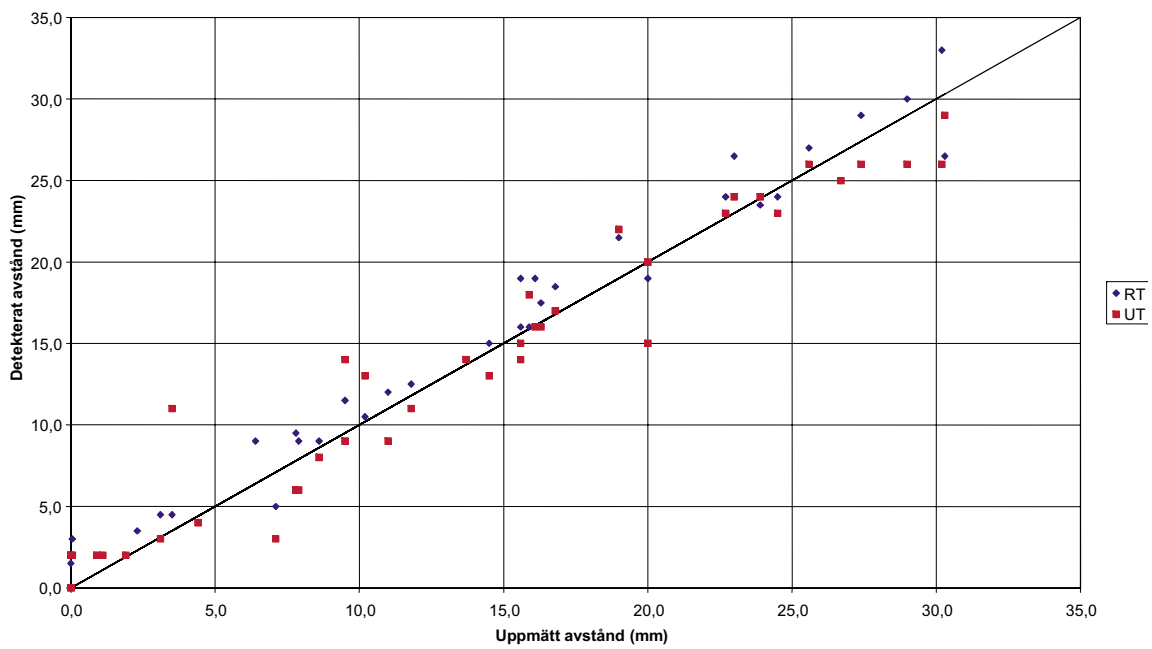
Figur 5-10. Storlek i tangentiell ledd.

Jämförelse detekterad och uppmätt defektstorlek



Figur 5-11. Storlek i radiell ledd.

Jämförelse detekterad och uppmätt avstånd från ytan



Figur 5-12. Avstånd till ytan.

6 Tillämpad utveckling

Detta avsnitt behandlar de utvecklingsinsatser som har utförts och som pågår för närvarande inom oförstörande provning av kapselns komponenter och förslutningssvets.

6.1 Utveckling av provningsteknik av kapselns komponenter

Den fundamentala kunskapen om provning av koppar som ackumuleras genom utvecklingsinsatserna för förslutningssvetsen anses även täcka utvecklingsbehoven för kopparkomponenterna. Beträffande insatsen och dess komponenter planeras aktiviteter i ett senare skede. Dock påbörjas under början av 2003 studier för att utveckla metodik för nodularitetskontroll av segjärnet.

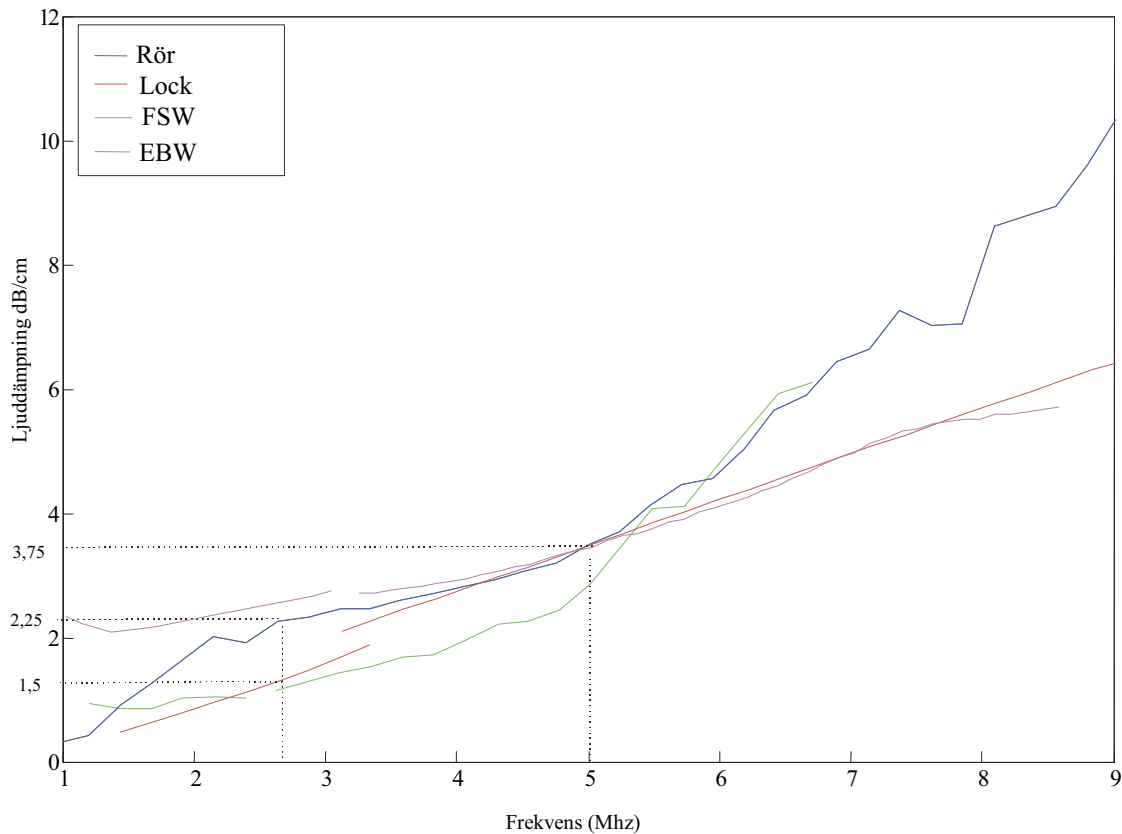
6.2 Utveckling kopplad till provning av förslutningssvetsen

Vid Kapsellaboratoriet har den viktigaste utvecklingsinsatsen varit att ta fram fungerande provningsprocedurer för huvudsystemen för UT och RT. Detta arbete har inneburit modifieringar och olika förbättringsarbeten, framtagning av skriftliga instruktioner och bedömningskriterier etc. Större mer sammanhållna aktiviteter som bedömts som viktiga är.

- Mätning av ljuddämpning i koppar.
- Utveckling av djuppenetrerande induktiv provning för inspektion av kopparkapsel.
- Framtagning av datainsamlingsutrustning för automatiserad induktiv provning.
- Implementering av utvecklade filtreringsalgoritmer vid Kapsellaboratoriet.

6.2.1 Mätning av ljuddämpning i koppar

Syftet med denna aktivitet var huvudsakligen att klarlägga lämpliga frekvenser för ultraljudprovning av svetsar utförda med FSW, men även att klarlägga lämpliga frekvenser för inspektion av övriga kopparkomponenter. Två metoder har använts vid försöken ”FB1B2 method” och ”Normalised Amplitude Spectrum, NAS” som utfördes vid CSM Materialteknik AB i Linköping. Exempel på resultat från dessa undersökningar visas i figur 6-1 nedan där det indikeras att 5 MHz kan vara lämplig frekvens för inspektion av FSW objekt.



Figur 6-1. Ljuddämpningskurvor för rör, lock, FSW och EBW.

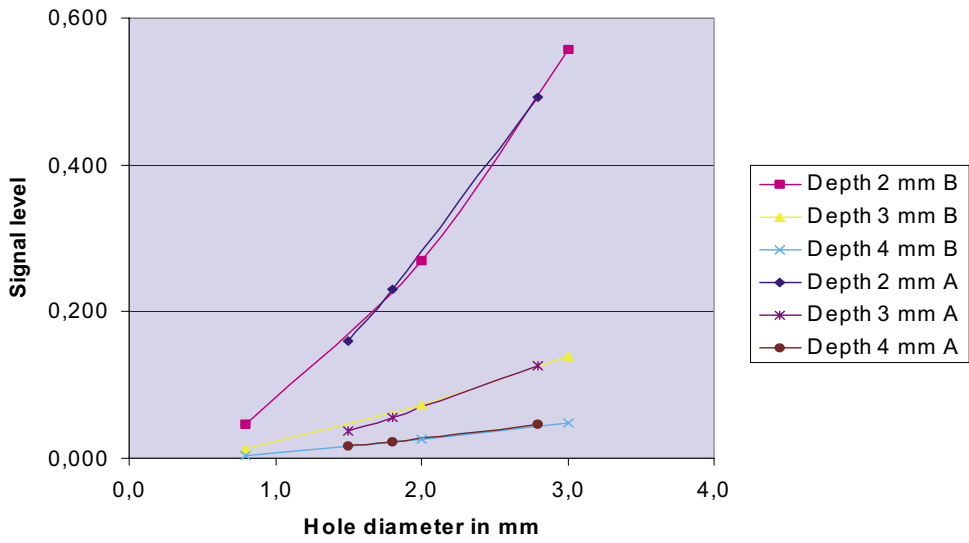
6.2.2 Djuppenetrerande induktiv provning för inspektion av kopparkapsel

Detta projekt är inriktat på att ta fram och optimera induktiva givare och metodik för induktiv provning av locksvetsen i kopparkapseln. Etapp 2 av detta projekt pågår för tillfället och drivs av TSonic i Uppsala. Etapp 1 som avslutades i början av 2001 visade på lovande resultat.

Följande slutsatser noterades i etapp 1:

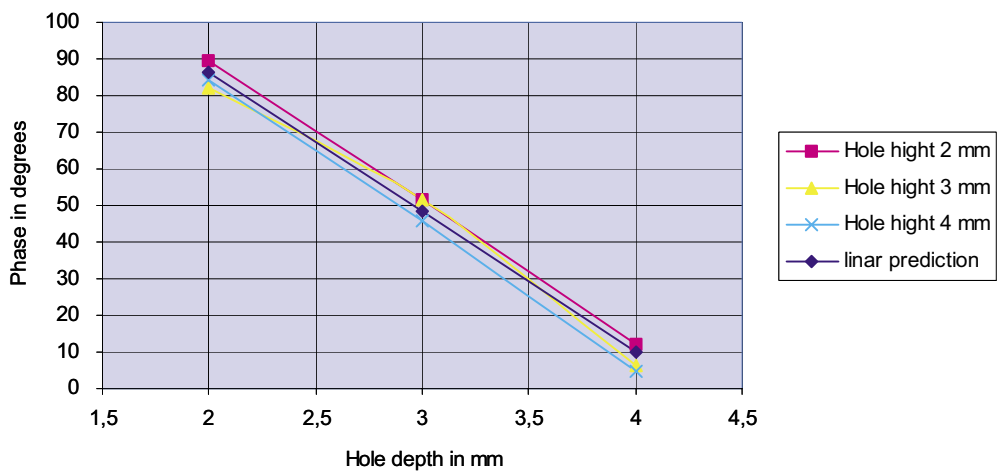
- Detektering av diskontinuiteter med diameter större än 1 mm är möjligt med S/N (signal/brusförhållande) bättre än 6 dB ner till 4 mm djup.
- Lokalisering och storleksbedömning av diskontinuiteter från induktiv provning anses möjligt, se figur 6-2 och 6-3.
- Diskontinuiteters utbredning i djup riktningen är ej möjligt att bestämma med ET.
- En enskild ET frekvens anses tillräckligt för detektering och karakterisering av diskontinuiteter.
- För effektiv och noggrann karakterisering av defekter krävs anpassad mjukvara för signalbehandling samt ett anpassat kalibreringsförfarande.
- För en noggrann karakterisering krävs flera indexsteg vid scanning alternativt multipla spolar.

**Signal level as a function of hole diameter
(hole height 2 mm)**



Figur 6-2. Signalstyrka i förhållande till defektstorlek.

Phase angles for scan B



Figur 6-3. Fasvinkel i förhållande till defektavstånd till ytan.

6.2.3 Framtagning av utrustning för automatiserad induktiv provning

Under 2002 har ett system för datainsamling av ET-signaler tagits fram i samarbete med TSonic. Detta består av lägesgivare, datainsamlingskort samt mjukvara för datainsamling. Systemet planeras att drifställas fullt ut under första halvan av 2003. Under 2003 beräknas även vissa funktioner för karakterisering av diskontinuiteter implementeras i mjukvaran.

6.2.4 Implementering av filtreringsalgoritmer vid Kapsellaboratoriet

Inom ramen för det forskningsprojekt vid Uppsala Universitet som beskrivs i nästa kapitel har olika signalbehandlingsalgoritmer för brusreducering tagits fram. För att implementera dessa i verksamheten vid Kapsellaboratoriet bedrivs ett examensarbete vid Uppsala Universitet under hösten 2002 med avsikt att implementera valda delar vid Kapsellaboratoriet under början av 2003.

7 Forskning inom oförstörande provning

Vid avdelning Signaler och System vid Uppsala Universitet har forskning och utveckling med inriktning mot inspektion av kopparkapseln med ultraljud pågått sedan 1994. Projektets huvudmål har varit att demonstrera möjligheten att använda phased array ultraljudteknik för inspektion av kopparkapselns locksvets samt att bygga upp en kunskapsbank för att möjliggöra framgångsrik applikation av tekniken i en framtida inkapslingsanläggning.

Forskningen inkluderar teoretiska aktiviteter som exempelvis modellering av vågutbredning och experimentella undersökningar som exempelvis karaktärisering och kalibrering av ultraljudsystemet (ALL-IN). Andra viktiga områden som studerats är karaktärisering av material- och kornstorlekar, signalbehandling av ultraljudsignaler och visualisering av ultraljuddata. Arbetet inkluderar såväl utveckling av nya metoder (exempelvis, ljudfältsmodellering och sökarkaraktärisering) som applicering av kända tekniker (exempelvis, uppskattning av ljuddämpning och ljudhastighet).

Sett över hela tidsperspektivet har projektet varit framgångsrikt genom att åtminstone första delen av huvudmålet har uppnåtts. Detta genom att phased array ultraljudtekniken används framgångsrikt vid Kapsellaboratoriet som stöd för utveckling av svetsmekaniken samt att vidareutveckling av tekniken pågår. Angående den andra delen av huvudmålet är denna obegränsad i sin natur och kräver ständig utveckling. Detta innebär att Signaler och System ämnar fortsätta utvecklingen av metoder för förbättring av befintlig array teknik för att erhålla ökad detekteringsförmåga och högre tillförlitlighet.

Förbättringar av teknik för utvärdering av ultraljudresultat kan möjliggöras genom exempelvis "harmonic imaging", "synthetic aperture focusing technique" (SAFT) och "deconvolution". SAFT är en teknik där objektet avsöks och samtliga vågformer lagras i en dator. Genom att i efterhand sammanfoga och tidsfördröja signalerna kan man simulera t ex phased array provning eller en sökare med en viss karakteristik. Fördelen med tekniken är att det finns i stort sett obegränsade möjligheter att simulera olika provningar. Nackdelen är att efterprocessningen tar lång tid och kräver en hel del datakapacitet. SAFT har vid en preliminär studie visat på goda resultat, vilket medför att fortsatt arbete kommer vara inriktat på att kombinera fysisk och syntetisk fokusering.

Harmonic imaging bygger på att ljudvågen distorderas av materialet den utbreder sig i och att olika övertoner genereras som kan kopplas till olika materialegenskaper. Tekniken benämns ibland "non linear ultrasonics" Vid Uppsala Universitet har initiala studier utförts med resultat som uppmuntrar till vidare studier.

Dessutom har en omfattande studie som gjorts inom Signaler och System med inriktning på förbättrad tidsupplösning av ultraljudsignaler.

8 Kommentarer

Här nedan sammanfattas de viktigaste kommentarer som kommit fram inom området för oförstörande provning av kopparkapseln.

8.1 Provning av komponenter

Flera olika typer av åtgärder utförs parallellt för att förbättra den befintliga provningsverksamheten. Alla tillverkare, såväl av kopparcylindrar som av segjärnsinsatser, har någon form av tänkt förbättring för att möta kraven på detekterbarhet. Konkreta åtgärder som har utförts redovisas nedan.

Kopparkomponenter

Vid Vallourec & Mannesmann Tubes är det huvudsakligen två åtgärder som utförts för att öka förståelsen samt förbättra ultraljudsprovningen av kopparcylindern.

- En referensring har tillverkats och används vid provningen. Referensringen är viktig då det gäller att kontrollera utrustning samt se vilken detekterbarhet som är möjlig att erhålla. Till exempel kan nämnas att vid ultraljudsprovning med vinkelsökare och frekvens 2 MHz detekterades ej referensfelen, men efter ett byte av sökare till 1 MHz erhöles tillräcklig detekterbarhet.
- Vallourec & Mannesmann Tubes har också utfört vissa mätningar av materialets ljuddämpning. Mätningarna är tänkta att fungera som indikation på vilken kornstorlek som erhållits i godset. Dessa undersökningar har dock varit svåra att jämföra med tidigare utförda, då olika enheter för ljuddämpning angivits. Kompletterande mätningar genomfördes dock vid ett besök av SKB. Dessa mätningar gjordes på samma sätt som på ett lock vid Scana Björneborg. Av resultatet framgår att dämpningen i cylindervägg och lock är jämförbara, medan den i cylinderns botten är betydligt större, vilket tyder på större kornstorlek.

Det kan konstateras att ultraljudsprovning av kopparcylindern kräver en maskinbearbetad yta för att den ska kunna anses vara relevant och utförd med tillräcklig kvalitet. Då Wyman Gordon ej har möjlighet att maskinbearbeta rören kan endast provning i radiell riktning genomföras, vilket medför att relativt låg känslighet erhålls. Detta bör beaktas i fortsättningen för att klargöra om provning ska utföras efter maskinbearbetning och i så fall var detta kan utföras. För att säkerställa provningen vid Wyman Gordon bör även någon form av referens kropp tas fram.

Beroende på vilka acceptanskrav som slutligen kommer att ställas på ytskiktet hos kopparcylindern kanske ultraljudmetoden ej är tillräckligt känslig just i detta område. Induktiv provning skulle då kanske kunna vara en lösning, vilket dock kräver ytterligare utredning och laborativa försök.

För övrigt bör det nämnas att stora erfarenheter av provning av koppar finns vid Kapsellaboratoriet och att det är viktigt att dra nytta av dessa erfarenheter vid provning av övriga kopparkomponenter.

Komponenter till insats

En övergripande kommentar angående provning av insatserna är att en harmonisering av den oförstörande provningen vid gjuterierna bör göras. Detta för att på ett rättvist sätt möjliggöra jämförelse av insatsernas uppnådda kvalitet.

Försök med provning av områden mellan kanalerna har utförts hos två olika tillverkare: Metso Paper Karlstad AB och Åkers Sweden AB. De inre delarna av insatsen som provats har varit de som går genom centrum då detta har varit möjligt med befintlig transmissionsutrustning (ultraljud). Dock bör vidare studier utföras för att påvisa vilken detekterbarhet som kan erhållas. Rent praktiskt bör också hjälpmedel tas fram för att styra sökarna i rätt position samt för att möjliggöra provning av övriga områden mellan kanalerna.

För övrigt kan nämnas att Metso Paper Karlstad AB har moderniserat sin mekaniserade provningsutrustning, avsedd för stora gjutna cylindrar, för att fungera i Windowsmiljö. Denna utrustning planeras i fortsättningen användas vid provning av deras insatser.

Angående övriga komponenter till insatsen (kanalrören och stållocket med tillhörande bult) har inga insatser inom området för oförstörande provning utförts.

8.2 Provning av förslutningssvetsen

Vid Kapsellaboratoriet har arbete med oförstörande provning av kapselns förslutningssvets pågått sedan mitten av 1998. Framst har elektronstrålesvetsar utförda vid Kapsellaboratoriet inspekterats, men försök har även utförts på elektronstrålesvetsar utförda vid TWI och av Posiva samt FSW svetsar utförda vid TWI. Detta har på ett naturligt sätt bidragit till att en stor mängd erfarenheter har vunnits, vilka sammanfattas här nedan:

En begränsande faktor vid arbetet med OFP har varit avsaknaden av tydliga krav över vilken prestanda som krävs av metoderna. Detta har medfört problem att sätta upp tydliga mål över vad den oförstörande provningen ska uppfylla. Dessa krav "Acceptanskriterier för kapseln" är dock under framtagning och förväntas vara färdigställda i en första utgåva under första halvåret 2003.

Angående utrustningarna anses bristen på flexibilitet som starkt begränsande för utveckling av den oförstörande provningen vid Kapsellaboratoriet. Systemen är designade för en i förväg bestämd provningsmetodik som kräver relativt stora omkonstruktioner för att möjliggöra att enkla försök med modifierad metodik kan utföras. Det bör dock kommenteras att för den befintliga svetsutvecklingsprocessen för elektronstrålesvetsning har systemen kunnat utnyttjas mycket väl för att ge goda indikationer över svetskvaliteten. Under detta arbete har även behovet av flera inspektionsmetoder för utvecklingsfasen verifierats, då olika typer av fel har indikerats med ultraljud och radiografering.

I och med att utrustningarna är uppbyggda av relativt komplicerade system kan bristen på upparbetade serviceavtal med de befintliga leverantörerna i vissa fall medföra tillgänglighetsproblem. Dock har leverantörerna av röntgensystemet (BIR och Varian) överlag kunnat åtgärda problem inom rimlig tid. Det bör dock kommenteras att det faktum att BIR finns i USA har inneburit vissa kommunikations- och fraktproblem.

I fallet med ultraljudssystemet så har stödet från leverantören (RD/Tech) varit svagt som en följd av att systemet ej är deras egen produkt utan ärvd från NDT Systems som inkorporerades i RD/Tech efter att SKB inköpt systemet.

I samband med att Kapsellaboratoriet utförde oförstörande provning av de första provsvetsarna med FSW från TWI belystes att det befintliga ultraljudsystemets prestanda inte var tillfredställande. Detta i kombination med att systemet är gammalt och omodernt samt att det även kan uppstå problem som en följd av att leverantören inte kan garantera tillgänglighet på reservdelar. Som resultat av detta anskaffades ett nytt Phased array ultraljudsystem i slutet av 2002 från Technology Design Ltd.

Utgående från de befintliga metodernas prestanda som beskrivs i kapitel 5.4.1 har det identifierats att en mer utförlig och strukturerad studie bör utföras inom detta område för att bestämma metodernas prestanda på ett optimalt sätt.

9 Framtida handlingslinje

I detta kapitel kommenteras aktiviteter som SKB planerar att utföra eller beakta vid det fortsatta arbetet inom området för oförstörande provning av kopparkapseln. En central aktivitet är den pågående förstudien angående kvalificering av provmetoderna. Kvalificeringskraven som inte är helt klarlagda i dagsläget kommer att ha stor påverkan på de framtida aktiviteterna inom OFP området.

9.1 Provning av komponenter

Energimyndigheten stöder ett projekt som drivs av Jernkontoret och Mefos kallat STEM 4495/99 "Oförstörande bedömning av materialegenskaper" inom Stålindustrins värmnings- bearbetnings- och materialpaket 1999–2003. Erfarenheter från detta projekt bör bevakas för att eventuellt kunna användas i samband med kapseltillverkningen.

Flera olika tillverkare är inblandade i den utveckling av tillverkningsprocesser som pågår. Utvecklingsmässigt pågår olika åtgärder, dessutom är att vissa planerade att utföras för att förbättra de oförstörande provningsmetoderna. Dessa åtgärder redovisas nedan för respektive komponent.

Kopparkomponenter

Provningen av kopparcyldern hos tillverkaren är i hög grad beroende på i vilket stadium i tillverkningen cylindern befinner sig vid leveransen. En grov yta från varmformningen begränsar exempelvis möjligheten för ultraljudprovning kraftigt.

Enligt Wyman Gordon kan endast en radiell avsökning med måttlig känslighet utföras på denna grova yta. För att göra en fullständig ultraljudavsökning i fem olika riktningar, erfordras en maskinbearbetad avsökningsyta. Detta innebär att om en framtida maskinbearbetning kommer att ske i en kapseltillverkningsfabrik i Sverige, bör den slutliga oförstörande provningen genomföras där. Detta förfarande förutsätter materialfelsproblem på en mycket låg nivå och att någon form av provning hos leverantören krävs för att minimera mängden kasserade färdigbearbetade kapslar.

Vid Wyman Gordon Ltd återstår vissa problem att lösa då provningen inte går att utföra fullt ut på grund av att inte kopparcyldern är maskinbearbetad vid provningen. Vidare kan inte den befintliga referensringen användas i Wyman Gordons Ltd mekaniska ultraljudsutrustning då den inte har tillräcklig axiell utbredning, minsta längd på provobjekt är 450 mm.

Vallourec & Mannesmann Tubes har utrustning för maskinbearbetning av rören samt en fungerande mekaniserad provningsutrustning för provning av kopparcyldern. Utrustningen klarar av att detektera samtliga fel i referensringen. Dock bör det utredas om dessa fel är relevanta med avseende på feltyp samt om defektstorlekarna kan härledas ur de kommande acceptanskriterierna. V&M har däremot inga möjligheter att utföra automatisk provning av botten i denna utrustning. Provningen görs i stället genom manuell avsökning.

För att erhålla bästa möjliga känslighet behöver sökare och dess frekvens optimeras med hänsyn till den dämpning som den grova strukturen i materialet utgör samt de defektstorlekar som ska detekteras.

Som en följd av att kraven på att kunna detektera små diskontinuiteter i ytskiktet på kopparcylindern eventuellt kan förväntas vara höga, kommer sannolikt induktiv provning (virvelströmsprovning) användas för inspektion av detta område. Detta bör beaktas i det fortsatta arbetet.

Angående provning av lock och botten görs idag ingen provning av dessa. Inom detta område bör arbete utföras för att klargöra vilken typ av provning som krävs samt utveckla och applicera denna metodik.

Insatsen och dess komponenter

Angående provning av gjutna insatser så är det främst en harmonisering av de olika tillverkarnas oförstörande provning som anses viktig. Detta för att säkerställa att den jämförelse som görs av tillverkningskvaliteten med OFP är relevant. Överlag kan nämnas att de metoder och utrustningar som används behöver anpassas för att möjliggöra en mer rationell och säker provning. Dessa insatser kommenteras för respektive tillverkare nedan:

Vid Åkers Sweden AB finns en mekaniserad provningsutrustning för provning av valsar. Principen för den provningen kan utan vidare användas för att prova ytskiktet på den gjutna insatsen. Detta skulle emellertid innebära en hel del modifieringar. Det krävs kraftigare uppläggningsrullar och annan manipulator för ultraljudsökarna. Vidare bör någon form av hjälpmedel användas för positionering och förflyttning av sökarna vid transmissionsprovningen. För dokumentation av provningarna krävs även att utrustningen kompletteras med registreringsutrustning. För provning mellan kanalerna erfordras framtagning av metodik för provningen samt framtagning av referensproppar för säkerställa vilken detekterbarhet som kan förväntas.

Vid Guldsmedshytte Bruks AB planerar man höja kompetensen inom oförstörande provning genom utbildning av personal. Dessutom bör den mekaniserade provningen förbättras för serietillverkning och kompletteras med någon form av registrering av felindikationer. För provning av området mellan kanalerna krävs att någon form av hjälpmedel för att positionering och manövrering av sökarnas anskaffas.

Den befintliga mekaniserade utrustningen vid Metso Paper Karlstad AB avses att kunna användas vid serietillverkning. Dock behöver utrustning för positionering och manövrering av sökare anskaffas för provning av områden mellan kanalerna.

Utöver ovanstående diskuteras för närvarande möjligheten att med hjälp av ultraljud bestämma gjutgodsets nodularitet. För att studera detta kommer de kommande insatser som gjuts att undersökas med såväl ultraljud som med förstörande prov.

På kanälrör, stållock och stålbulst görs idag ingen provning. Inom detta område bör arbete utföras för att klargöra vilken typ av provning som krävs samt utveckla och applicera eventuell metodik.

9.2 Provning av förslutningssvetsen

En viktig ny uppgift blir att utveckla och etablera provningsteknik för förslutningssvetsar utförda med FSW. Då denna svetseteknik är ny jämfört med EBW, finns inte samma erfarenheter av provning och vilka defekttyper som kan uppstå i svetsprocessen. Vid Kapsellaboratoriet planeras utöver det fortlöpande arbetet med stöd till svetsprocesserna ett antal större/mindre aktiviteter inom området för oförstörande provning. Bland de första är att driftsätta det nyligen anskaffade ultraljudsystemet för provning av elektronstrålesvetsade lock. Om de kommande acceptanskriterierna för kapseln innehåller hårdare krav för ytzone av kapseln planeras den utvecklade metodiken för induktiv provning att driftsättas.

Utgående från de befintliga metodernas prestanda som beskrivs i kapitel 5.4.1 har det identifierats att en mer utförlig och strukturerad studie bör utföras inom detta område. I början av 2003 planeras ett flerårigt projekt startas upp tillsammans med BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) med inriktning på detekterbarhet (POD, ROC) samt optimering av röntgenmetodik.

10 Referenser

1. **Ehrnström T, aug 2001.** Comparison of Electron Beam Welding and Friction Stir Welding for Sealing SKB:s Copper Canisters, Uppsala Universitet, Materialvetenskap.
2. **Stepinski T, Ping Wu, Lingvall F, 2002.** Inspection of copper canisters for spent nuclear fuel by means of ultrasound. Review of the research work performed in period 1994–2000, SKB Rapport TR-02-05.
3. **Andersson C-G, 2001.** Utveckling av tillverkningsteknik för kopparkapslar med gjutna insatser, Lägesrapport i augusti 2001, SKB Rapport R-01-39.
4. **Claesson S, Ronneteg U, 2002.** Inkapslingsteknik Report EBW, SKB Project PM, TI-02-01.
5. **Stepinski T, mars 2001.** Deep Penetrating Eddy Current for Copper Canister Inspection, TSonic.
6. **Werme L, 1998.** Konstruktionsförutsättningar för kapsel för använt kärnbränsle, SKB Rapport R-98-08.
7. **SKB FUD-program 2001, september 2001.** Program för forskning, utveckling och demonstration för hantering och slutförvaring av kärnavfall, svensk Kärnbränslehantering AB.
8. **SKI:s yttrande över SKB:s redovisning av FUD-program 2001, mars 2002.** SKI Rapport 02:9.