

# ULTRASOONONDERZOEK VAN LASVERBINDINGEN IN GEGOTEN ROESTVRIJ STAAL INSPECTIERESULTATEN VAN AV TEAMS IN HET PISC III TESTPROGRAMMA

**G. Maes, J. Cermak, Ph. Dombret**  
**AIB-Vinçotte, Brussel, België**

## **Abstract**

De grofkorrelige metaalstructuur van austenitisch roestvrij staal in het algemeen, en van gegoten of gelaste componenten in het bijzonder, kunnen het prestatievermogen van ultrasoononderzoek voor detectie en foutgroottebepaling van materiaalfouten zeer nadelig beïnvloeden.

Actie 4 (Austenitic Steel Testing) van PISC III (Program for the Inspection of Steel Components) had tot doel het prestatievermogen van niet-destructieve onderzoekstechnieken en procedures (vooral ultrasoononderzoek) te evalueren met betrekking tot de inspectie van componenten in austenitisch roestvrij staal, zoals de primaire en de secundaire kringen van lichtwaterreactoren. Met de medewerking van gespecialiseerde laboratoria en inspectieteams uit de gehele wereld werden Round-Robin testen uitgevoerd voor verschillende types componenten.

Dit artikel beschrijft en analyseert de resultaten van de twee ultrasoon-inspectieteams van AIB-Vinçotte in de Round-Robin testen, waarvan de proefstukken representatief waren voor de primaire kringen van hogedrukwaterreactoren zoals die in België worden uitgebaat. De specifieke eigenschappen van de gebruikte technieken en apparatuur worden uitvoerig toegelicht.

Daarenboven worden richtlijnen geformuleerd met betrekking tot het opstellen van verbeterde ultrasoonprocedures, naar aanleiding van de invoering van Appendix VIII van de ASME XI Code voor de in-service inspectie van de Belgische nucleaire centrales.

## **1. Inleiding**

Sinds het begin van de jaren '70 werden zowel in Europa als in de Verenigde Staten testprogramma's opgezet om de betrouwbaarheid van niet-destructieve onderzoekstechnieken te evalueren. De programma's PISC I (1976-1980) en PISC II (1980-1986), gesponsord door de OESO en de EG, waren specifiek gericht op het testen van ultrasoonprocedures voor in-service inspecties van reactorvaten van nucleaire centrales. Hiertoe werden een aantal proefstukken, representatief voor delen van het reactorvat, en met kunstmatig aangebrachte materiaal fouten, onderzocht door teams van inspectieorganisaties en gespecialiseerde laboratoria uit Europa, de Verenigde Staten en Japan. De doelstellingen van deze PISC programma's waren enerzijds de evaluatie van het prestatievermogen van de gebruikte procedures en technieken voor detectie en foutgroottebepaling, en anderzijds het verschaffen van raadgevingen aan de betrokken normgevende instellingen en nucleaire autoriteiten.

De voornaamste doelstelling van de derde fase van het programma, PISC III (1987-1994), was de uitbreiding van de eerder gevolgde methodologie tot de belangrijkste componenten van de primaire leidingen van lichtwaterreactoren. Anderzijds beoogde men ook de validatie van de resultaten van PISC II op reële materiaaldefecten, en voor inspecties in meer realistische omstandigheden.

In actie 4, AST (Austenitic Steel Testing) genoemd, werd het prestatievermogen geëvalueerd van ultrasoononderzoek van lasverbindingen tussen componenten in austenitisch roestvrij staal. Hiertoe werden Round-Robin testen georganiseerd voor verschillende types componenten. Aan elk van deze testen werd deelgenomen door één of meerdere inspectieteams van AIB-Vinçotte.

## 2. Proefstukken

De Round-Robin testen die hieronder zullen besproken worden zijn de zogenaamde "cast-to-cast" en de "wrought-to-cast" testen. De geometrie en de materiaalkarakteristieken van de in deze testen beschouwde proefstukken waren representatief voor de primaire leidingen van de Belgische kerncentrales.

Alle proefstukken hadden een buitendiameter van ongeveer 36". De wanddikte was steeds begrepen tussen 65 en 75 mm, behalve voor een gegoten elleboogstuk waarvan de wanddikte ongeveer 100 mm bedroeg.

Assembly 51 was opgebouwd uit drie verschillende soorten austenitisch roestvrij staal, verbonden door twee rondlassen : las A verbond een centrifugaal gegoten stuk pijp met een gesmede pijp, en las B verbond deze gesmede pijp met een statisch gegoten elleboogstuk van 30°. Ter hoogte van deze laatste las vertoonde het proefstuk een verandering van de buitendiameter, vergelijkbaar met hetgeen in de praktijk in onze kerncentrales wordt aangetroffen.

Assemblies 41 en 42 bestonden beide uit verschillende segmenten, mechanisch samengehouden als een reële pijp. Elk van de segmenten bevatte twee verschillende austenitische metaalstructuren, verbonden door een las.

Assembly 43 was opgebouwd uit drie verschillende soorten roestvrij staal, twee ervan centrifugaal gegoten en één gesmeed, verbonden door twee rondlassen.

Verschillende types reële en kunstmatig aangebrachte materiaalfouten waren aanwezig in de hogergenoemde proefstukken, zowel vlakke oppervlaktefouten (scherpe sleuven aangebracht door vonkerosie, reële mechanische vermoeidheidsscheuren), als plakfouten en geïmplanteerde volumetrische defecten. Een volledige en gedetailleerde beschrijving van de verschillende proefstukken, evenals de aard en de positie van elke materiaalfout is gegeven in <sup>(1)</sup> en <sup>(2)</sup>.

## 3. Controleprocedures

Twee Belgische inspectieteams, beide van AIB-Vinçotte, namen deel aan zowel de "cast-to-cast" als de "wrought-to-cast" testen.

Eén van de teams (AV1) voerde een automatisch ultrasoononderzoek uit vanaf het buitenoppervlak met een speciaal daartoe ontworpen aftastmechanisme voor lasinspecties op pijpen, en een Tomoscan ultrasoonsysteem voor de gegevensverwerking.

Er werden conventionele rechte tasters gebruikt, alsmede TRL contacttasters (gescheiden zender en ontvanger) voor longitudinale golven bij 45° en 60°, alle met een excitatiefrequentie van 1 MHz. Er werd eveneens een 1 MHz 45° taster voor transversale golven aangewend voor het onderzoek van het gesmede basismateriaal en de warmtebeïnvloede zone. Detectie en foutgroottebepaling werden uitgevoerd volgens een procedure op basis van een DAC referentieniveau. Deze procedure was grotendeels in overeenstemming met de richtlijnen van sectie XI van de ASME Code (editie 1980), en als dusdanig representatief voor de toenmalige inspectiepraktijk in de Belgische kerncentrales.

Het andere team (AV2) voerde eveneens een automatisch onderzoek uit vanaf het buitenoppervlak, met hetzelfde aftastmechanisme in combinatie met een zelf ontwikkeld systeem voor de verwerking en de visualisatie van ultrasoonegegevens.

Naast 1 MHz contacttasters voor longitudinale en transversale golven bij 45°, werden ook gefocuseerde tasters met grote kristaldiameters (typisch 75 mm) aangewend met hoeken van 0° en 45°. De ultrasoonkoppeling van deze laatste tasters werd verzekerd via de lokale immersietechniek. Alle indicaties die boven de ultrasoonruis uitkwamen werden gerapporteerd en geëvalueerd. Indien mogelijk gebeurde de bepaling van de fouthoogte met de tipdiffractiemethode.

Beide teams maakten gebruik van dezelfde 1 MHz 45°TRL taster, die met zijn grote piëzo-elektrische elementen speciaal ontworpen is voor een verhoogd detectievermogen in de nabijheid van de binnenwand van de component. De betere prestaties van dit type taster in vergelijking met het conventionele (kleinere) TRL model werden aangetoond tijdens een parametrische studie op gelijkaardige componenten <sup>(3)</sup>, eveneens in het kader van het PISC III programma : een gemiddelde winst van 5 dB in signaal-ruis verhouding werd geobserveerd.

Beide teams hebben volledig onafhankelijk van elkaar gewerkt tot op het ogenblik dat de definitieve inspectierapporten waren afgeleverd.

## **4. Prestatievermogen inzake foutdetectie**

### **4.1. Algemene resultaten**

De analyse van de resultaten van een bepaald team in een Round-Robin test bestaat erin de plaats (lengterichting, diepterichting) en de afmetingen (lengte, hoogte) van elke door het team gerapporteerde indicatie te vergelijken met de referentiegegevens van elke fout zoals ze na de testen werden bepaald door een uitgebreid en nauwgezet destructief onderzoek. Hoewel volledig en gedetailleerd zijn de gegevens onder deze vorm weinig overzichtelijk en daardoor weinig bruikbaar voor een algemene analyse.

Voor de kwantitatieve evaluatie van het detectievermogen van de toegepaste procedures werd in het PISC III programma gebruik gemaakt van een uitgebreide set statistische parameters <sup>(4)</sup>. In dit artikel zullen enkel de volgende parameters worden besproken :

**FDF : Flaw Detection for all Flaws**

$$FDF = Dd / D$$

waarbij Dd : aantal gedetecteerde fouten in een set proefstukken  
D : totaal aantal fouten in een set proefstukken

**FCRD : False Call Rate in Detection**

$$FCRD = Xd / (Xd + Dd)$$

waarbij Xd : aantal gerapporteerde, niet bestaande fouten in een set proefstukken

**CRF : Correct Rejection of Flaws**

$$CRF = Rr / R$$

waarbij Rr : aantal correct beoordeelde niet aanvaardbare fouten in een set proefstukken  
R : totaal aantal niet aanvaardbare fouten aanwezig in een set proefstukken

**FCRR : False Call Rate in Rejection**

$$FCRR = Xr / (Xr + Rr)$$

waarbij Xr : aantal ten onrechte als niet aanvaardbaar geklasseerde fouten in een set proefstukken

Een grafisch overzicht van de resultaten van de verschillende deelnemende teams voor de "cast-to-cast" en de "wrought-to-cast" proefstukken wordt gegeven door de figuren 1 t.e.m. 4.

Het prestatievermogen inzake detectie (gegevens gebaseerd op de complete set van opzettelijk aangebrachte defecten) van de verschillende teams wordt gegeven door de figuren 1 en 2. Beide AV teams koppelen een laag aantal false calls (FCRD steeds lager dan 0.2) aan een goede detectiefrequentie FDF. De geavanceerde procedure van team AV2 genereert iets meer false calls dan de ASME-type procedure van team AV1, maar haalt wel de beste detectiescore van alle teams indien beide sets proefstukken samen worden beschouwd.

De grafieken van figuren 3 en 4 geven het prestatievermogen inzake evaluatie van de niet aanvaardbare fouten (groter dan 10 % van de wanddikte volgens criteria van sectie XI van de ASME Code). De resultaten van de twee AV procedures neigen duidelijk naar elkaar toe. De CRF waarde van team AV2 ligt rond 0.9, hetgeen betekent dat ongeveer 90 % van de niet aanvaardbare

fouten correct werd geëvalueerd. Bovendien genereerde de geavanceerde procedure geen enkele niet aanvaardbare false call.

Het verschil tussen de twee procedures inzake foutdetectie heeft twee belangrijke oorzaken. Eerst en vooral detecteert de ASME-type procedure slechts één van de vier (aanvaardbare) plakfouten in het lasvolume, tengevolge van de beperkte gevoeligheid van de gebruikte conventionele 0°L en 45°TRL tasters voor dit type fout; de gefocusseerde tasters, voorgeschreven door de geavanceerde procedure, slagen er wel in deze fouten aan te tonen. Figuur 5 illustreert dit: het ultrasoonbeeld bekomen met een rechte gefocusseerde taster op een plakfout evenwijdig met het aftastoppervlak toont een signaal-ruis verhouding van minstens 16 dB, terwijl de 45°TRL contacttaster op dezelfde materiaalfout slechts 8 dB oplevert.

Anderzijds laat de vaste detectiedrempel (het DAC niveau) gebruikt in de ASME-type procedure niet toe kleine uittredende scheurvormige fouten te detecteren, terwijl ze toch van de ultrasoonruis kunnen onderscheiden worden.

## **4.2. Specifieke observaties**

Uit een gedetailleerd onderzoek van de resultaten bekomen met de verschillende tasters van de geavanceerde procedure kunnen nog bijkomende observaties met betrekking tot de detectiecapaciteit worden afgeleid.

Beschouwen we alle uittredende vlakke oppervlaktefouten in de proefstukken die enkel gegoten austenitische structuren bevatten, en nemen we het ruisniveau als detectiedrempel. Een procedure met alleen de 45°L gefocusseerde taster zou 13 van de 14 fouten hebben aangetoond, waarbij slechts één aanvaardbare fout zou gemist zijn. Een procedure met alleen de 45°TRL taster zou 11 defecten hebben gedetecteerd, en één enkele niet aanvaardbare fout zou gemist zijn. Tijdens dezelfde analyse werden verschillen in signaal-ruis verhouding van 0 tot 6 dB vastgesteld in het voordeel van de gefocusseerde taster, zonder enige correlatie met de aard van de materiaalfout.

De betere laterale resolutie van gefocusseerde tasters geeft een verhoogd prestatievermogen inzake karakterisatie van de aangetoonde materiaalfouten. Figuur 6 toont de ultrasoonbeelden van 2 uittredende sleuven van 9 mm hoog, aangebracht door vonkerosie aan weerszijden van de lasvoorbereiding en aangestraald doorheen gegoten basismateriaal. De 45°TRL taster toont één grote indicatie, terwijl de gefocusseerde taster toelaat de twee aparte defecten te onderscheiden en te karakteriseren.

## **5. Prestatievermogen inzake foutgroottebepaling**

### **5.1. Algemene resultaten**

In het kader van in-service inspecties met ultrasoononderzoek volgens sectie XI van de ASME Code is naast de aard van een materiaaldefect vooral de fouthoogte bepalend voor de aanvaardbaarheid van de beschouwde component.

Voor de kwantitatieve evaluatie van de foutgroottebepaling in de diepterichting werden voor elke set proefstukken het gemiddelde verschil tussen de gemeten en de werkelijke fouthoogte (MESZ), en de

standaardafwijking op dit verschil (SESZ) bepaald. Figuur 7 geeft de resultaten van de teams die een voldoende aantal materiaalfouten gedetecteerd hadden.

Vrijwel alle procedures vertonen een tendens naar overdimensioneren van de aangetoonde defecten. Voor de geavanceerde AV procedure (team AV2) is dit effect zeer klein : gemiddelde waarden rond 1 mm of 2 % van de wanddikte. De spreiding op de afwijkingen op de fouthoogte zijn vergelijkbaar voor de twee AV teams : ze ligt tussen 4 en 6 mm, hetgeen beter is dan bij de meeste andere teams.

## 5.2. Specifieke observaties

De figuur 8 geeft meer informatie over de invloed van de aard van de fout op de fouthoogtebepaling door het team AV2 : voor elke afzonderlijke fout werd de gemeten hoogte uitgezet tegenover de werkelijke hoogte.

De grafiek toont dat de geavanceerde procedure (gefocusseerde tasters) zeer goede resultaten oplevert voor de dimensionering van de scherpe uittredende sleuven aan de binnenwand, aangebracht door vonkerosie (EDMN), dankzij de interpretatie van de tipdiffractiesignalen gegenereerd door de gefocusseerde tasters : de overeenkomstige punten vertonen een goede correlatie met de ideale rechte (gemeten fouthoogte = werkelijke fouthoogte). Een voorbeeld van de fouthoogtebepaling met deze techniek wordt gegeven door figuur 9 : zowel het tipdiffractiesignaal als het hoekeffect van een 20 mm hoge sleuf in een gegoten proefstuk kunnen duidelijk onderscheiden worden.

De ASME-type procedure levert typisch een overdimensionering op voor de kleinere fouten van dit type. De toegepaste amplitudevalmethode resulteert immers in fouthoogtes die overeenkomen met de grote bundelafmeting (15 à 20 mm) van de gebruikte TRL tasters.

De fouthoogte van de mechanische vermoeidheidsscheuren wordt in de meeste gevallen onderschat. Een gedetailleerde analyse van de ultrasoongegevens toont aan dat dit te wijten is aan de te lage signaal-ruis verhouding van de diffractiesignalen.

Voor de beide AV procedures werd het globale prestatievermogen inzake fouthoogtebepaling, zoals besproken in paragraaf 5.1, enigszins verslechterd door de vrij willekeurige resultaten voor de plakfouten evenwijdig aan het aftastoppervlak (zie ook figuur 8). Dit is te wijten aan het feit dat de procedures werden ontwikkeld voor een optimaal prestatievermogen op scheurvormige fouten dichtbij de binnenwand van de componenten.

## 6. Conclusies en suggesties voor de toekomst

Uit de resultaten van de beide teams van AIB-Vinçotte in de hierboven besproken PISC III Round-Robin testen, kunnen de volgende conclusies worden getrokken met betrekking tot in-service ultrasoononderzoek op lassen van de primaire kringen van hogedrukwaterreactoren (PWR) :

Mits een correcte discriminatie van de gerapporteerde indicaties, is het ruisniveau als detectiedrempel betrouwbaarder dan een 50 % DAC niveau, dat enerzijds te sterk afhankelijk is van het gebruikte calibratieblok, en anderzijds signalen met een te lage amplitude zonder meer verwerpt.

Voor scheurvormige fouten dicht bij de binnenwand van de pijp, in gegoten basismateriaal, is het detectievermogen van de speciaal ontworpen grote 45°TRL tasters zeer goed, en bijna evenwaardig aan dat van de gefocusseerde tasters, op voorwaarde dat het ruisniveau als detectiedrempel wordt gebruikt. Bijgevolg kan het gebruik van de vrij grote immersiekamers vermeden worden tijdens de detectiescans. Dit is uiteraard voordelig met betrekking tot de totale inspectietijd enerzijds en het inspecteerbare volume van moeilijk toegankelijke lassen anderzijds.

Het gebruik van andere tasterhoeken (dan de 45°TRL) toonde geen bijkomende materiaal fouten aan. Voor detectie, in het geval van een las tussen twee pijpen in gegoten basismateriaal, lijkt het gebruik van andere tasterhoeken dan ook niet noodzakelijk.

Vertoont het buitenoppervlak van de pijp ter hoogte van de las een specifieke geometrie, dan kan dit het detectievermogen nadelig beïnvloeden. Om dit zoveel mogelijk te vermijden moet de procedure bijzondere maatregelen (tasters) voorzien, aangepast aan de te onderzoeken geometrie.

De toepassing van aangepaste gefocusseerde tasters, in combinatie met de tipdiffractiemethode, resulteert in een belangrijke verbetering van de karakterisatie en de dimensionering van de aangetoonde materiaal fouten.

Op basis van de hierboven besproken resultaten werden bij AIB-Vinçotte verbeterde ultrasoonprocedures opgesteld voor de in-service inspecties op de primaire kringen van de Belgische nucleaire centrales, in het kader van de invoering van Editie 1992 van Sectie XI van de ASME Code, en de daaraan verbonden verplichte kwalificatie van ultrasoonprocedures.

- 
1. PISC III Report N°34 "Report on the Evaluation of the Inspection Results of the Cast-to-Cast PISC III Assemblies 41, 42 and Weld B of Assembly 43", 1995.
  2. PISC III Report N°35 "Report on the Evaluation of the Inspection Results of the Wrought-to-Cast PISC III Assembly 51 and Weld A of Assembly 43", 1995.
  3. G. Maes, B. Hansoul, Ph. Dombret, "The PISC Parametric Study on the Effect of Cast Austenitic Steel Macrostructure on the Capability of Ultrasonic Examination", 12th Int. Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industry, Philadelphia (PA), 1993
  4. PISC III Report N°21 (EUR 15559 EN), "PISC III Rules for the Evaluation of the RRT Results", 1993