

Neporušne preiskave reaktorske tlačne posode v jedrski elektrarni Krško

Non-destructive Examinations of Reactor Pressure Vessel in the Nuclear Power Plant Krško

J. Vojvodič Gvardjančič¹, IMT Ljubljana
D. Korošec, Republiška uprava za jedrsko varnost, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

Opisane so neporušne preiskave, uporabljene pri pregledu reaktorske posode v jedrski elektrarni Krško. Reaktorsko posodo tlačnovodnega jedrskega reaktorja smo preizkušali z neporušnimi metodami z notranje strani. Zvarjene spoje reaktorske posode smo pregledovali z daljinsko vodenim sistemom s specialnimi ultrazvočnimi glavami. Vizualni pregled notranosti reaktorske posode smo opravili s tremi podvodnimi TV-kamerami s pripadajočo opremo za zapisovanje pregleda. Neporušna metoda z vrtničnimi tokovi je bila uporabljena za kontrolo zvara med reaktorsko glavo in penetracijo.

Ključne besede: jedrska elektrarna, reaktorska posoda, vzdrževalna dela, neporušne preiskave, vizualni pregled, ultrazvočna metoda, metoda vrtničastih tokov

The nondestructive examinations used during inservice inspection of the reactor pressure vessel in Nuclear power plant Krško are described. The reactor pressure vessel PWR type was examined on through its inside surface. The welds of reactor pressure vessel were examined using remote controlled special examination system with ultrasonic probes. Inside surface visual inspection was performed using underwater TV cameras and corresponding recording system. Eddy current nondestructive examination method was used for examination of the reactor vessel head penetrations.

Key words: nuclear power plant, reactor pressure vessel, maintenance, non destructive examination, visual control, ultrasonic testing, eddy current testing

1 Uvod

Varnost in razpoložljivost jedrskih elektrarn sta najvažnejši značilnosti, ki poleg ekonomičnosti opravičujeta njihovo obratovanje. Zaradi tega izvajamo med obratovanjem jedrske elektrarne in menjavo goriva številne preglede komponent, opreme in sistemov. Ugotavljamo tudi preostalo trajnost komponent z neporušnimi metodami med obratovanjem. V tki. "in-service inspection" sodijo tudi preiskave reaktorske posode. Vizualno kontrolo in ultrazvočne preglede reaktorske posode izvajamo po programu¹, ki je usklajen z zahtevami predpisov ASME XI,¹ ASME V,² in SNT-TC-1A³. Ti predpisi določajo in podajajo priporočila za specifična področja sistemov, kot so: zvarjeni spoji, vijačne zveze, obešala, navarjene obloge in podobno. To so elementi, ki so bili in bodo med 40-letnim projektno predvidenim obratovanjem jedrske elektrarne Krško večkrat pregledani z neporušnimi metodami.

2 Osnovni podatki o reaktorski posodi

Reaktorska posoda²¹ je cilindrične oblike z zunanjim premerom 3692,8 mm, notranjim 3354 mm, višino 11900 mm, debelino 169,4 mm (v področju sredice) in ima polkroglasto dno. Osnovni material je SA 533-Gr.B.C1.1. Posoda je sestavljena iz kovanih zvarjenih

segmentov in na notranji strani prevlečena z navarjeno oblogo iz nerjavnega jekla SA 308.

Na obodu posode sta po dve vstopni in dve izstopni odprtini ter dva priključka za varnostno vbrizgavanje vode. Na glavi reaktorske posode, ki je nanjo pritrjena s prirobnico, so nameščeni pogoni kontrolnih palic in priključek za odzračevanje reaktorske glave. Shema reaktorskega hladilnega sistema je razvidna s **slike 1**. Tesnjenje reaktorske glave je izvedeno s privijanjem stojnih vijakov in dvema "O" tesniloma, ki ležita v utorih prirobnice reaktorske posode. Na spodnjem delu posode so priključki za merjenje nevtronskega fluksa direktno v sredici. Glava reaktorske posode je hlajena z delom hladila, ki izstopa iz sredice. Med obratovanjem je temperatura reaktorske glave enaka temperaturi vročega kraka (324°C). Reaktorska posoda je prikazana na **sliki 2**.

3 Neporušne preiskave reaktorske posode

Reaktorsko posodo tlačnovodnega reaktorja navadno preizkušamo z neporušnimi metodami le z notranje strani. Izvedba meritev z notranje strani zahteva uporabo daljinsko vodenega sistema s specialnimi ultrazvočnimi glavami, s katerimi pregledujemo zvarjene spoje reaktorske posode, ki so kritični del reaktorske posode glede njene integritete.

Zvarjeni spoji reaktorske posode so prikazani na **sliki 3**. Prve ultrazvočne preiskave zvarjenih spojev na reaktorski posodi je izvedlo francosko podjetje Intercontrole. Uporabljena je bila specialna oprema MIS (Machine for

¹ Doc. dr. Jelena VOJVODIČ GWARDJANČIČ
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije
Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

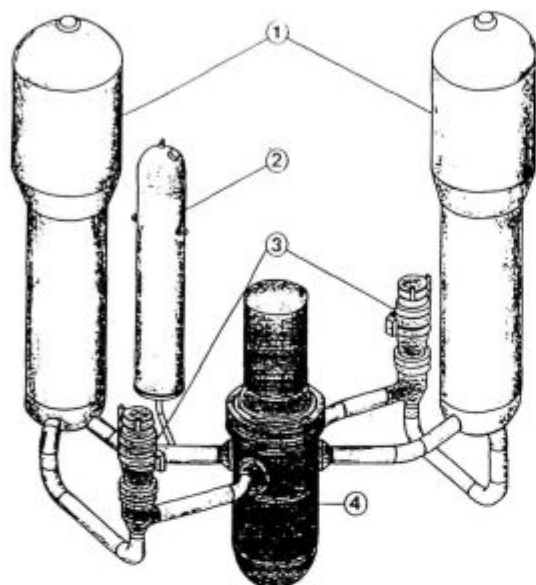
obratovalni parametri pri 100-odstotni moči :

$T_{vr.} = 324 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_{hl.} = 288 \text{ } ^\circ\text{C}$

$p = 157 \text{ bar}$

pretok = 8967 kg/s (zanka 1 in 2)



Legenda :

1-uparjalnik

2-tlačnik

3-glavne reaktorske črpalke

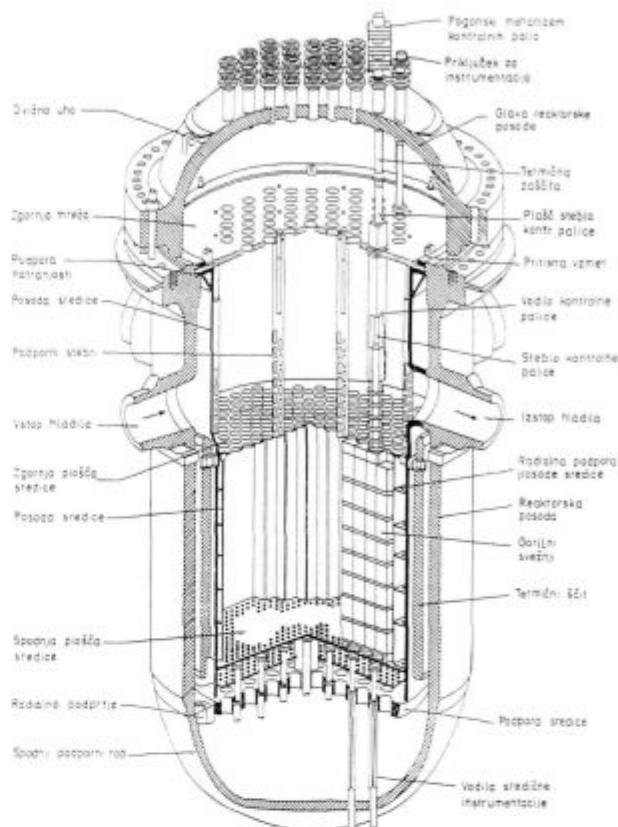
4-reaktor

Slika 1: Reaktorski hladilni sistem

Figure 1: Reactor cooling system

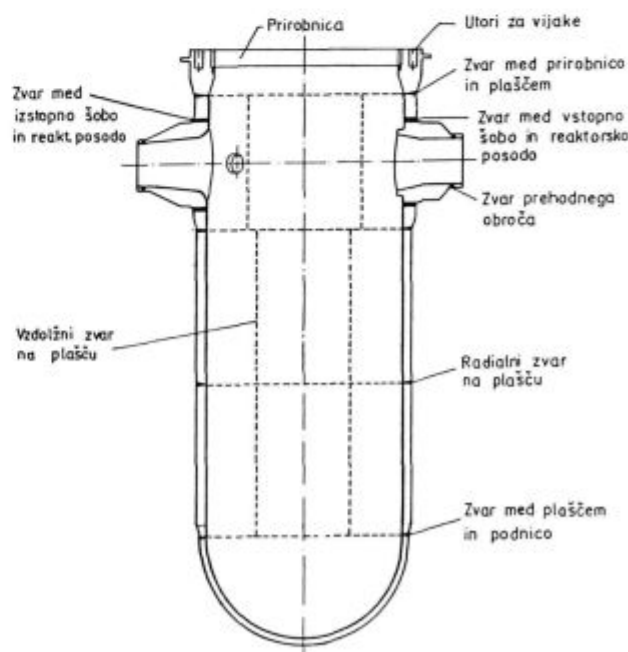
In-service Inspection) z daljinskim upravljanjem za podvodno ultrazvočno kontrolo s fokusnimi UZ sondami. Poleg ultrazvočne preiskave⁴ so uporabili tudi specialno opremo za vizualni pregled^{5,6} notranjosti reaktorske posode. To opremo so sestavljale tri podvodne TV-kamere s pripadajočo opremo za zapisovanje pregleda. Sedaj opravlja kontrolo reaktorske posode podjetje Inetec iz Zagreba, ki uporablja za te namene najmodernejšo opremo in kontaktno ultrazvočno tehniko, ki jo je razvil Westinghouse. **Slika 4** prikazuje Inetec-ovo napravo¹⁷ za pregledovanje vstopnih in izstopnih priključkov.

Pri odpiranju in zapiranju reaktorske posode so potrebne številne delovne operacije^{7,8}. Glavna pripravljalna dela so: demontaža sistema⁹ za odzračevanje reaktorske glave, montaža tesnila reaktorskega bazena in postavitve radiološkega ščita na glavo reaktorske posode. Po odčitju



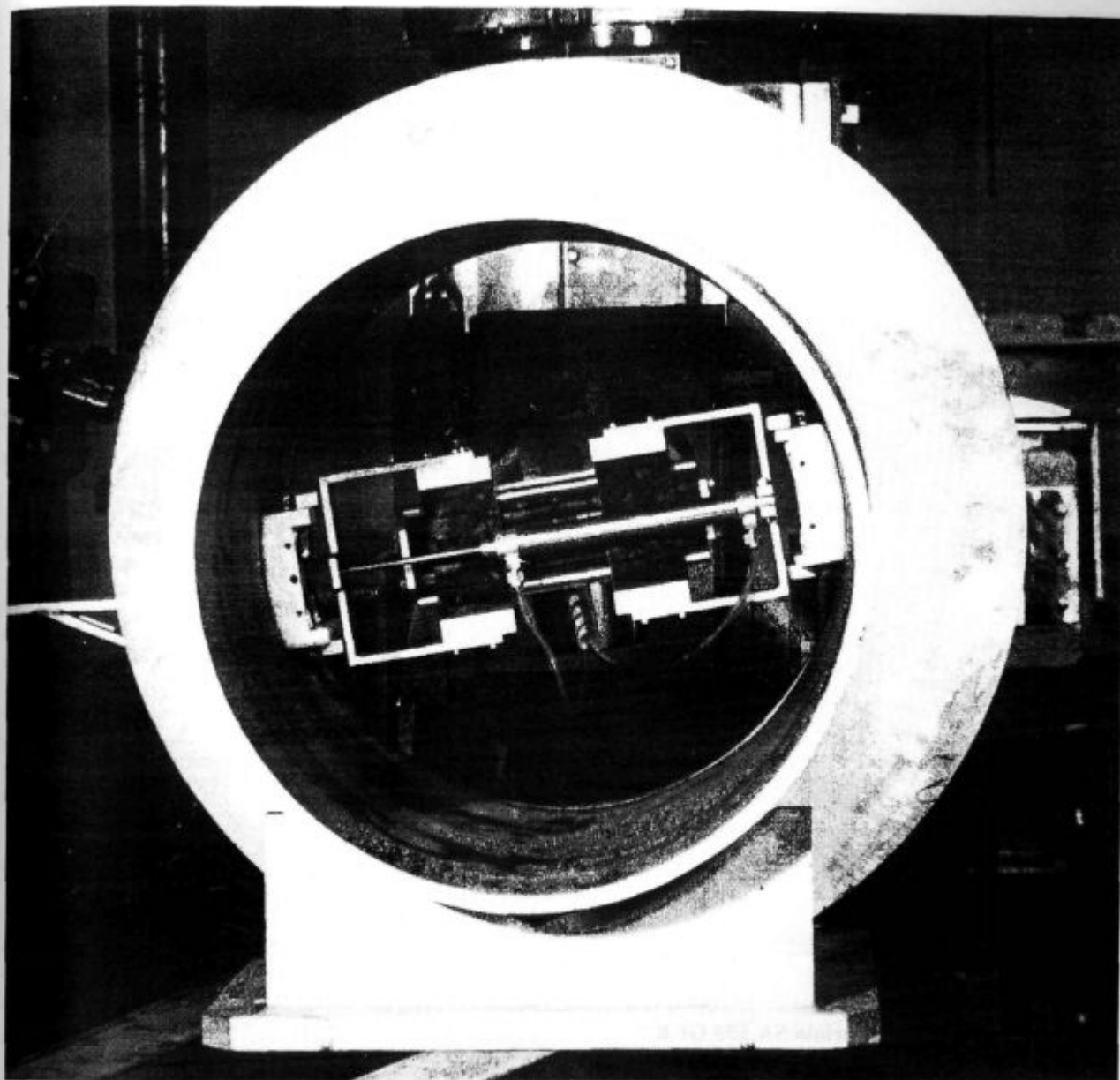
Slika 2: Reaktorska posoda v jedrski elektrarni Krško

Figure 2: Reactor pressure vessel at the Nuclear Power Plant Krško



Slika 3: Zvarjeni spoji na reaktorski posodi

Figure 3: Welded joints of reactor pressure vessel



Slika 4: Inetec-ova naprava za pregledovanje vstopnih in izstopnih priključkov

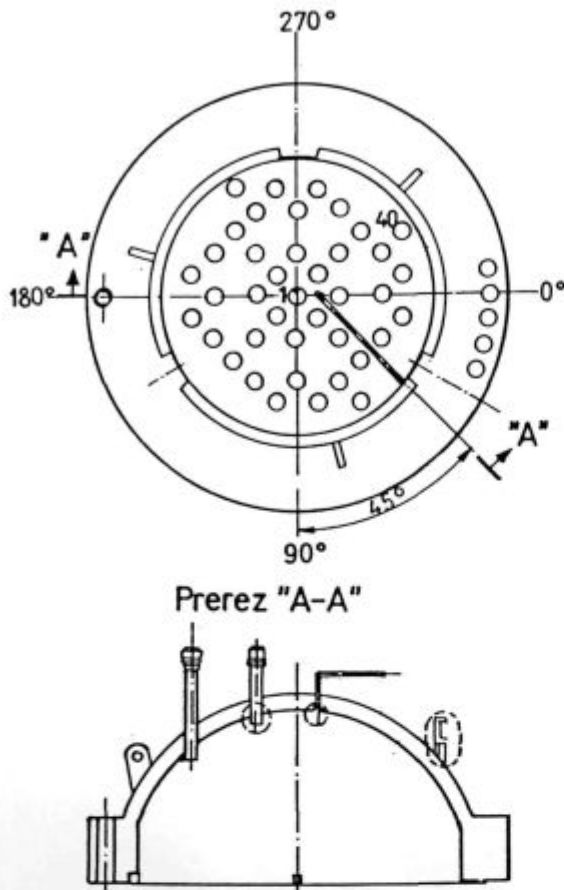
Figure 4: Inetec contact tool nozzle end effector

48 vijakov reaktorske posode sledi vizualni pregled in čiščenje navojev. Vijake in izvrtine zanje pregledujemo z ultrazvočno metodo po programu ISI¹⁰, dodatno pa še z metodo vrtničnih tokov in vizualno.

Po tem programu so ultrazvočno kontrolirani tudi zvari v notranjosti posode ter vstopnih in izstopnih priključkov vroče in hladne veje primarnega hladila, opravi se vizualni pregled notranjosti reaktorske posode ter ultrazvočni pregled navojev v prirobnici posode. Ob koncu desetletnega obratovalnega ciklusa je bila pregledana tudi notranjost reaktorske posode in notranje podporne konstrukcije. Kontrolirani so bili tudi vsi zvari reaktorske posode in še posebej na mestih vstopnih in izstopnih priključkov. Prirobnici reaktorske posode in reaktorske

glave sta bili vizualno pregledani med vsakim remontom. Na posameznih mestih namreč prihaja zaradi delovanja borove kisline, ki je v primarnem hladilu, do korozijskih jamičastih razjed, t. i. "pitting". Globino korodiranih mest ugotavljamo z jemanjem replik, take poškodbe pa saniramo z ročnim ali strojnim finim brušenjem.

Neporušna metoda z vrtničnimi tokovi^{11,12} je bila uporabljena leta 1995 za kontrolo zvara med reaktorsko glavo in penetracijo. V nekaterih elektrarnah tlačnovodnega tipa PWR v Franciji so bile ugotovljene ravno na teh mestih razpoke. Na zahtevo Republiške uprave za jedrsko varnost so bile te penetracije pregledane tudi v



Slika 5: Shema glave reaktorske posode s penetracijami
Figure 5: Scheme of reactor vessel head penetrations

naši jedrski elektrarni. Pregledanih je bilo vseh 40 penetracij, ki so prikazane na sliki 5.

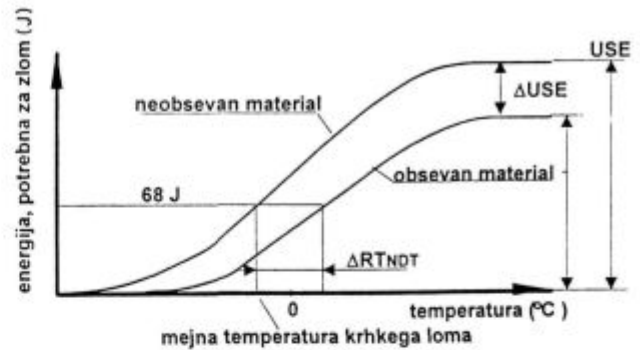
4 Mehanske lastnosti materiala SA 533 Gr B

Reaktorska posoda je izdelana iz jekla SA 533 Gr. B Cl.1. Spodnja in srednja plošča sta varjeni z elektroobločnim postopkom. Kemijska sestava jekla je podana v tabeli 1.

Tabela 1: Kemijska sestava jekla SA 533 Gr. B Cl.1 v mas. %

C	S	N	Co	Cu	Si	Mo	Ni
0.22	.013	.009	.013	0.07	0.29	0.58	0.60
Mn	Cr	V	P	Sn	Al	Ti	W
1.31	0.05	.009	.01	.004	0.024	<.01	<.01

V reaktorski posodi se nahajajo tudi različni vzorci osnovnega materiala, ki jih periodično preizkušamo v laboratorijih. Na ta način kontroliramo material, ki je izpostavljen močnemu nevtronskemu sevanju, visoki temperaturi in tlaku. Nevtronski fluks bistveno vpliva na temperaturo prehoda krhkega v žilavi lom in na zgornji prag energije, potrebne za lom pri Charpyjevem preizkusu.

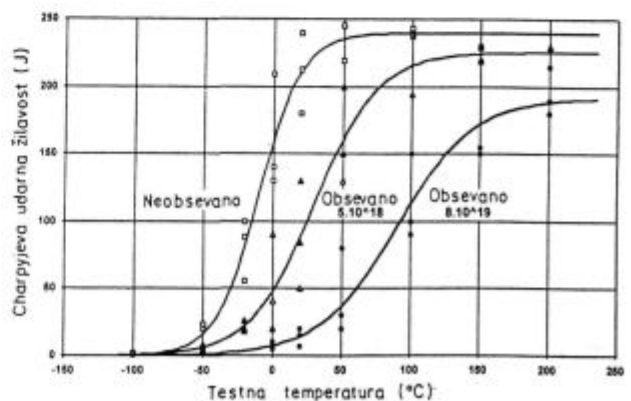


Slika 6: Vpliv nevtronskega sevanja na Charpyjevo temperaturo prehoda v krhko stanje
Figure 6: Typical effect of irradiation on the Charpy-V notch transition curve

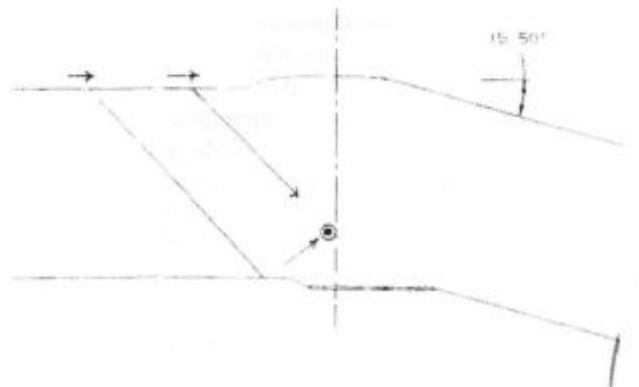
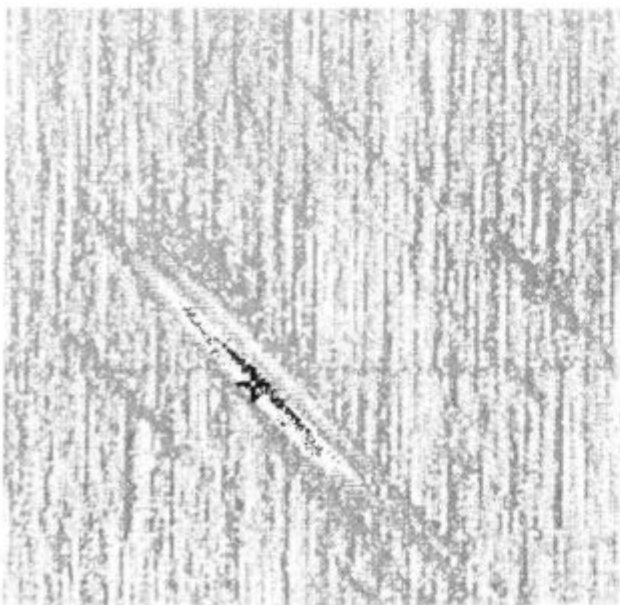
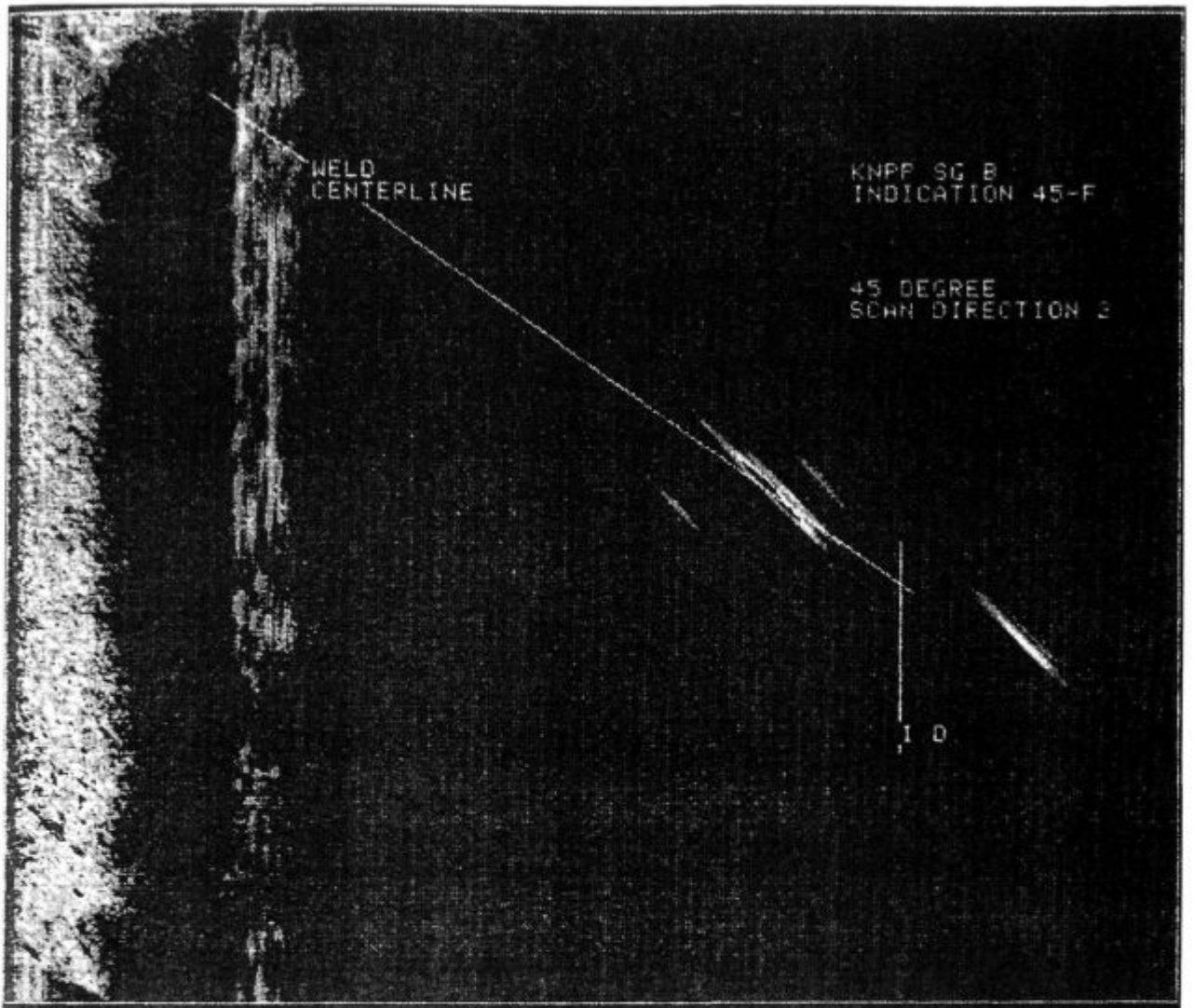
Slika 6 prikazuje vpliv nevtronskega sevanja^{13,14,15} na temperaturo prehoda v krhko stanje. S slike 6 je razvidno, da sevanje vpliva na zmanjšanje potrebne lomne energije, s tem pa se poveča temperatura, pri kateri je potrebna energija 68 J za zlom in pomeni referenčno vrednost temperature neduktilnega loma RT_{NDT} . Po predpisih ASME je zahtevano, da posoda nikoli ne zaide v območje krhkega loma, kadar je obremenjena s tlakom hladila in termičnimi napetostmi. Slika 7 prikazuje zniževanje Charpyjeve udarne žilavosti v odvisnosti od temperature za različne vplive nevtronskega sevanja.

5 Rezultati in diskusija

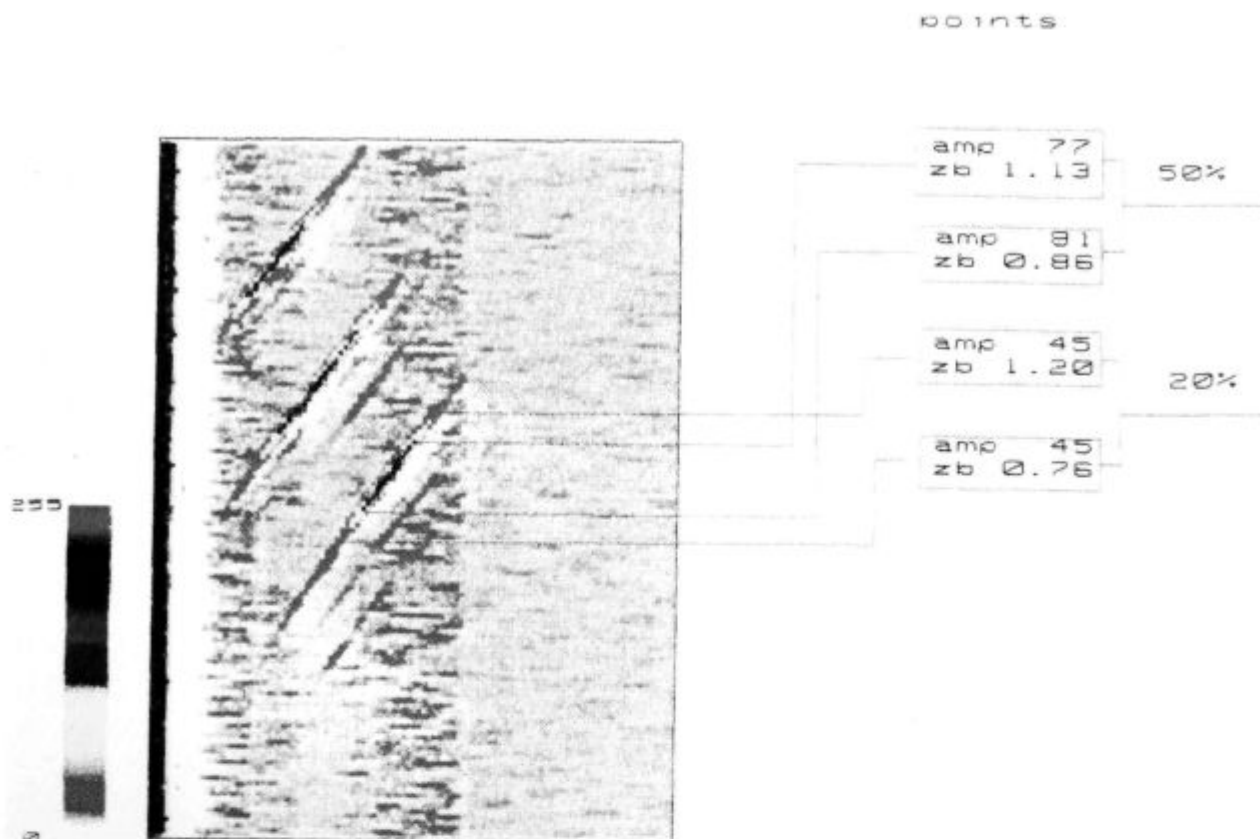
Na plašču reaktorske posode so bili ultrazvočno pregledani^{16,18,20} tako obodni radialni zvari BW1, BW3 kot vzdolžni zvari BW 7,8,9,10. V zvaru BW3 so bile



Slika 7: Vpliv nevtronskega sevanja na Charpyjevo udarno žilavost v odvisnosti od temperature
Figure 7: Typical effect of irradiation on the Charpy-V notch toughness vs. temperature



Slika 8: Prikaz indikacije v zvaru
Figure 8: Embedded volumetric flaw



Slika 9: Vrednotenje indikacije v zvaru s kotno sondo 70°
 Figure 9: Appreciation of weld indication with 70° - shell scan

ugotovljene 3 indikacije, ki so bile tudi zaznamovane, le-te pa so sprejemljive po predpisih ASME XI, tabela IWB-3510-1. Drugi zvari niso imeli indikacij, ki bi jih bilo potrebno zaznamovati.

Pregledani so bili tudi sočelni zvari, ki povezujejo odprtine s plaščem, ter zvari na spoju priključkov s koncem cevovoda. Zvari imajo oznake BW11,12,13. Na BW-12 sta bili ugotovljeni dve indikaciji, ki pa sta sprejemljivi. Na zvarih BW-11,13 ni bilo odkritih indikacij, ki bi jih bilo potrebno zaznamovati. Pri ultrazvočnem pregledu zvarov reaktorske posode na spoju šobe s koncem cevovoda je bilo na zvaru BW17 ugotovljenih 5 indikacij, ki so sprejemljive. Na BW19 je bila ugotovljena le ena indikacija, ki je tudi sprejemljiva po predpisih ASME XI., tabela IWB-3514-1. Tudi rezultati ultrazvočnega pregleda navojev v prirobnici reaktorske posode so sprejemljivi. Slika 8 prikazuje indikacijo v zvaru reaktorske posode, slika 9 pa iz vrednotenja indikacije s kotno sondo 70°.

Vizualni pregled notranjosti reaktorske posode, ki je bil opravljen z daljinsko vodenim orodjem, ni pokazal nesprejemljivih indikacij. Pri vizualnem pregledu dna reaktorske posode, vključno s penetracijami, s podvodnim orodjem ROWER niso bile ugotovljene pomanjkljivosti.

Pri pregledu zvara na glavi reaktorske posode s penetranti ni bilo ugotovljenih napak. Neporušna metoda z

vrtničnimi tokovi^{11,12} je bila uporabljena za kontrolo zvara med reaktorsko glavo in penetracijo; pregledanih je bilo vseh 40 penetracij. Meritve¹⁹ je opravilo podjetje ABB-Reaktor GmbH, Mannheim. Pri pregledu ni bilo ugotovljenih indikacij, večjih od 5V. Ugotovljene so bile le manjše površinske indikacije z amplitudami 3 V, 2,44 V, 3,46 V, 2,27 V in 2,62 V. Torej ni bilo ugotovljenih nedopustnih napak.

Rezultati preiskav zvarjenih spojev so pokazali, da so vse ugotovljene indikacije v dopustnih mejah. V splošnem lahko sklenemo, da ni zaslediti rasti na že prej odkritih razpokah.

6 Sklep

Na osnovi izvedenega programa pregledov reaktorske posode, ki jih je izvedlo podjetje Inetec iz Zagreba, je ocenjeno, da so bile vse zabeležene indikacije v dovoljenih odstopanjih po predpisih ASME XI-IWB-3000. Integriteta pregledanih področij plašča reaktorske posode, prav tako področja zvarov na odprtinah, notranjih radijev in navojev v prirobnici izpolnjujejo zahteve meril sprejemljivosti.

Analiza signalov, zahteve za beleženje ter merila sprejemljivosti so v skladu z zahtevami predpisov ASME XI. in dokazujejo, da je reaktorska posoda glede svoje integritete primerna za nadaljnje varno obratovanje ob

upoštevanju z veljavno regulativo predpisanih obratovalnih omejitev.

7 Literatura

- ¹ ASME B & PV Code, Section XI, *Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components*, Division I, 1992
- ² ASME Section V, *Nondestructive Examination*, 1992
- ³ SNT-TC-1A Personnel Qualification and Certification in Nondestructive testing, 1992
- ⁴ Qualification of Ultrasonic Manual Equipment, *delovni postopek Inetec šte. ISP-UT-01-E*, rev. 2, 1991
- ⁵ Visual Examination Procedure, *delovni postopek Inetec šte. ISP-VT-04-E*, rev. 1, 1991
- ⁶ Remote Underwater Visual Examination of Reactor Vessel Interior, *delovni postopek Inetec šte. ISP-VT-03-E*, rev. 1, 1991
- ⁷ Reactor Closure Head Removal and Instalation, *delovni postopek NEK šte. GMM 4.200*, rev. 0, 1992
- ⁸ Reactor lower internals removal, *delovni postopek NEK šte. GMM 4.202*, rev. 0, 1992
- ⁹ Postopek demontaže in montaže reaktorske posode, *delovni postopek NEK šte. QCP 9.001*, rev. 1, 1991
- ¹⁰ *Priročnik za zagotovitev kakovosti Inštituta za kovinske materiale in tehnologije*, Rev. 2, 1994
- ¹¹ Eddy Current Procedure for Testing Vessel Head Penetrations Equipped with Thermal Sleeves - Differential GAP Probe, *delovni postopek ABB šte. GBRA-031-246*, 1993
- ¹² Eddy Current Procedure for Testing Vessel Head Penetrations Equipped without Thermal Sleeves - Differential MRPC Probe, *delovni postopek ABB šte. GBRA-031-2247*, 1993
- ¹³ W. E. Pennel and W. R. Corwin, *Reactor Pressure Vessel Structural Integrity Research*, TN 37831, Oak Ridge National Laboratory, 1993
- ¹⁴ C. Lefebvre et al, Neutron Fluence Management to Optimize Pressure Vessel Lifetime, *ASTM STP*, 1170, 1993, 311-320
- ¹⁵ T. Varga and Q. C. Liu, Investigation on the Impact Strength and Toughness of A533 Grade B Composition Weld Metal Using Small Specimens, "Radiation Embrittlement of Nuclear reactor Pressure Vessel Steels", *ASTM STP*, 1170, 1993, 183-193
- ¹⁶ Zbirna strokovna ocena remonta in menjave goriva 1995 v NE Krško, *Poročilo Elektroinštituta Milan Vidmar*, 1995
- ¹⁷ Reactor Vessel In-service Inspection RV-1S1 Tool Site Setup and Checkout Procedure, *delovni postopek Inetec šte. ISP-EC-01-E*, rev.1
- ¹⁸ A Proposal to Krško NPP for the In-service Inspection of the Reactor Vessel, *Technical Part*, Inetec-Zagreb, 1994
- ¹⁹ Non Destructive testing of RV Head Penetrations in NPP Krško-5/95, ABB Reaktor GmbH, *Final Report*, 1995
- ²⁰ Reactor Pressure Vessel In-service Inspection Report of the Krško Nuclear Power Plant, *INETEC*, Zagreb, 1995
- ²¹ J. Vojvodič Gvardjančič, D. Pete: The inspection of the reactor pressure vessel in Nuclear Power Plant Krško, Slovenia. *Conference on Materials and Nuclear Power*, October-21-23, 1996, Bournemouth, UK, 395-399