

## MONITOROVANIE KORÓZNYCH PROCESOV V PRIMÁRNOM OKRUHU JADROVÝCH ELEKTRÁRŇACH TYPU VVER-440 S VYUŽITÍM KORÓZNYCH SLUČIEK

## MONITORING OF CORROSION PROCESSES IN THE PRIMARY CIRCUIT OF NUCLEAR POWER PLANT VVER-440 TYPE USING CORROSION LOOPS

Dávid Slnek <sup>a, b)</sup> a Michal Hajas <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> VUJE a.s., Okružná 5, 918 64, Trnava, Slovenská republika

<sup>b)</sup> Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Jána Bottu č. 2781/25, 917 24, Trnava, Slovenská republika

### Abstrakt

Dlhodobá prevádzka jadrových blokov vyžaduje splnenie mnohých podmienok tak, aby bola zaistená ich bezpečná prevádzka aj po presiahnutí pôvodnej plánovanej doby prevádzky. Medzi tieto podmienky patrí aj dlhodobá korózna odolnosť konštrukčných materiálov primárneho okruhu, ktorá má svoje špecifiká dané prevádzkovými charakteristikami, ako aj materiálovým riešením kritických uzlov. Napriek veľkej pozornosti, ktorá je primárnemu okruhu venovaná, v niektorých prípadoch môže dôjsť k vzniku a rozvoju korózneho poškodenia.

Predkladaný príspevok popisuje program monitorovania korózie založený na overovacích vzorkách, navrhnutý a realizovaný spoločnosťou VUJE, a.s. Overovacie vzorky sú umiestnené v korózných komorách, ktoré sú súčasťou primárneho okruhu JE a slúžia pri hodnotení účinkov skutočných prevádzkových médií na koróznou stabilitu konštrukčných materiálov v podmienkach dlhodobej prevádzky JE Bohunice a JE Mochovce. Príspevok popisuje princíp, na ktorom je systém korózných slučiek založený, náplň jednotlivých modulov, v ktorých sú overovacie vzorky umiestnené a prehľad aktuálneho stavu prevádzkovaných korózných slučiek, resp. náplní, ktoré boli vytiahnuté po 8 a 9 ročnej expozícii.

### Abstract

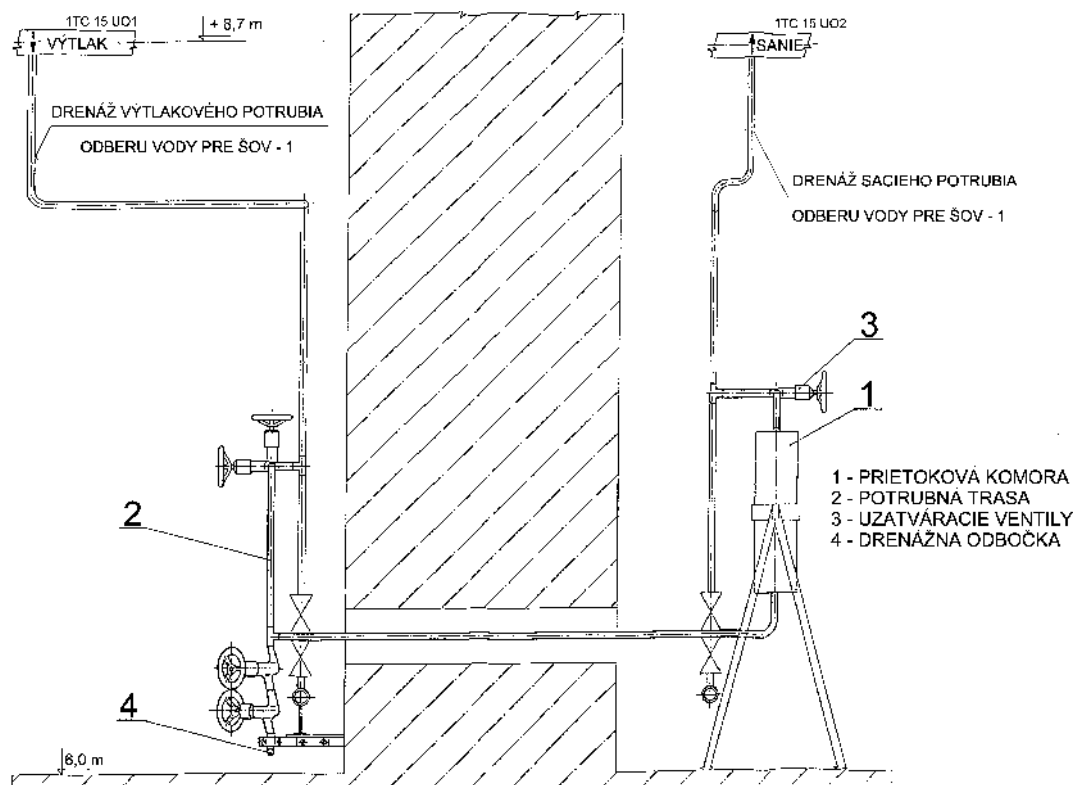
The long-term operation of nuclear power unit lifetime requires many conditions to be met in order to ensure their safe operation even after the original design lifetime has been exceeded. These conditions also include the long-term corrosion resistance of the primary circuit materials, which has its specifics given by the operational characteristics as well as the material design of the safety important parts. In spite of the special attention given to the primary circuit, in some cases corrosion damage may initiate and develop.

This paper describes the corrosion monitoring program based on surveillance samples, designed and implemented by VUJE, a.s. Verification samples are situated in corrosion equipment and serve to evaluate the effects of operating media on the stable stability of construction materials in the long-term operation chambers of NPP Bohunice and NPP Mochovce. The paper describes the principle on which the system of corrosion loops is based, the contents of the individual modules in which the verification samples are located, and an overview of the current state of the operating corrosion loops or fillings that were pulled out after 8 and 9 years of exposure.

## Úvod

Pre spoľahlivú a bezpečnú prevádzku jadrových elektrární (ďalej len JE) je potrebné mať k dispozícii celý rad informácií o stave prevádzkovaných blokov. Medzi tieto informácie patria aj údaje o koróznej situácii bezpečnostne významných zariadení. Počas viac než 45-ročnej histórie od vzniku VUJE sa oddelenie štrukturálnych analýz podieľa na riešení množstva závažných problémov súvisiacich s koróziou konštrukčných materiálov. V príspevku je popísaný systém monitorovania koróznych procesov - korózna slučka (KS), najmä pre hodnotenie vplyvu primárneho média na koróznú stabilitu konštrukčných materiálov v podmienkach dlhodobej prevádzky JE Bohunice (EBO) a Mochovce (EMO).

Základný princíp koróznych slučiek, inštalovaných v EBO a EMO je rovnaký – exponuje sa sada vzoriek v špeciálnej komore, cez ktorú preteká korózne médium – chladivo primárneho okruhu. Prietok média koróznou komorou zabezpečuje tlakový spád medzi výtlakom a saním hlavného cirkulačného čerpadla. Schéma pripojenia KS na 3. bloku EBO je na obr. 1 [1].



Obr. 1: Schéma pripojenia koróznej slučky

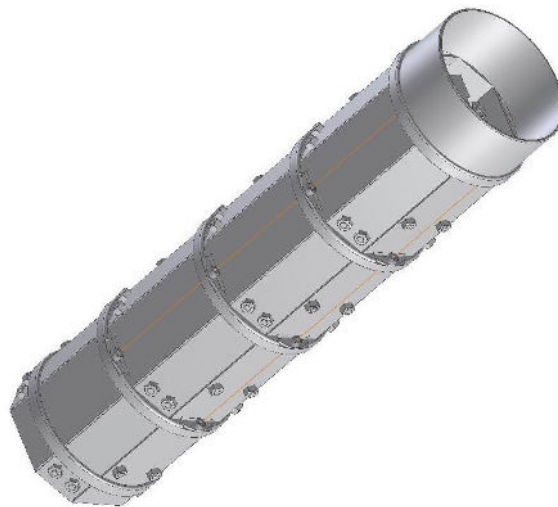
Prvá, jednokomorová KS bola nainštalovaná v roku 1992 do primárneho okruhu na 3. bloku EBO. Korózna slučka v EMO je umiestnená v primárnom okruhu 1. bloku. Táto je však vybavená dvomi, vzájomne oddeliteľnými komorami umožňujúcimi nezávislé exponovanie dvoch sérií vzoriek. Slučka bola uvedená do prevádzky v roku 1999 [2].

Prvá etapa prevádzkovania koróznej slučky prebiehala do roku 2008. V tomto roku boli všetky náplne vymenené za modulový systém, ktorý zjednocoval overovacie vzorky pre obe lokality. Prvé moduly boli vytiahnuté v roku 2012 t.j. po 4-ročnej expozícii. Z doteraz získaných výsledkov vyhodnotenia predchádzajúcich náplní vyplýva, že sledovaný konštrukčný materiál je v daných podmienkach odolný, a až na výnimky, neboli pozorované stopy korózneho napadnutia.

V rokoch 2020 (EBO) a 2021 (EMO) boli vytiahnuté náplne so vzorkami, ktoré poskytujú jedinečnú príležitosť pre analýzu konštrukčných materiálov JE po dlhodobej 12 resp. 13 ročnej expozícii.

### Konstrukčné riešenie koróznej slučky

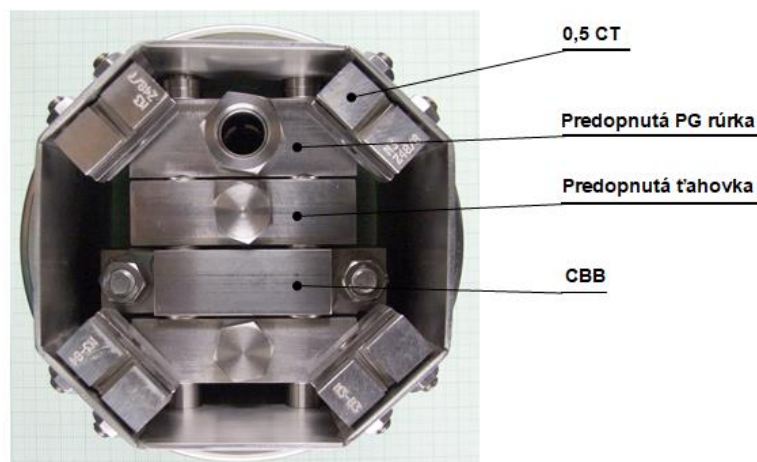
Konstrukčný návrh vnútornej konštrukcie KS vychádza zo základnej požiadavky rozdeliť pracovný priestor komory na 4 rovnako dlhé moduly (vid' obr. 2). Celá konštrukcia je tvorená 4 modulmi rovnakej dĺžky, pričom stredné moduly sú celkom rovnaké, krajné moduly sa líšia polohou a typom vodiacich krúžkov. Všetky moduly majú príruby, ktoré je možné vzájomne spojiť pomocou skrutiek. Príruby súčasne slúžia ako vodiace krúžky v koróznej komore a vymedzujú vôľu zmontovanej vnútornej konštrukcie v komore. V zloženom stave je celá vnútorná konštrukcia vložená v koróznej komore a vedená 5 vodiacimi krúžkami, aby pri demontáži nedošlo k zaseknutiu náplne v komore, a s tým spojenými problémami pri vyberaní. Pri výmene modulu sa po vybratí celej zostavy demontujú príslušné skrutky, a pôvodný modul sa nahradí novým modulom rovnakého typu. Celá konštrukcia sa opäť spojí skrutkami a vloží do novej komory [3].



Obr. 2: Vnútorná konštrukcia modulového typu

### Popis vytiahnutých vzoriek a spôsob ich vyhodnotenia

Náplň vzoriek v moduloch vytiahnutých z EBO a EMO je totožná (ilustratívne na obr. 3). Pre monitorovanie koróznych procesov sú použité vzorky, ktoré umožňujú sledovať okrem rovnomernej a nerovnomernej korózie aj korózne praskanie, štrbinovú a bodovú koróziu. Pozornosť sa pritom sústredila na počiatočné štádium korózneho procesu a na etapu rozvoja koróznej trhliny.



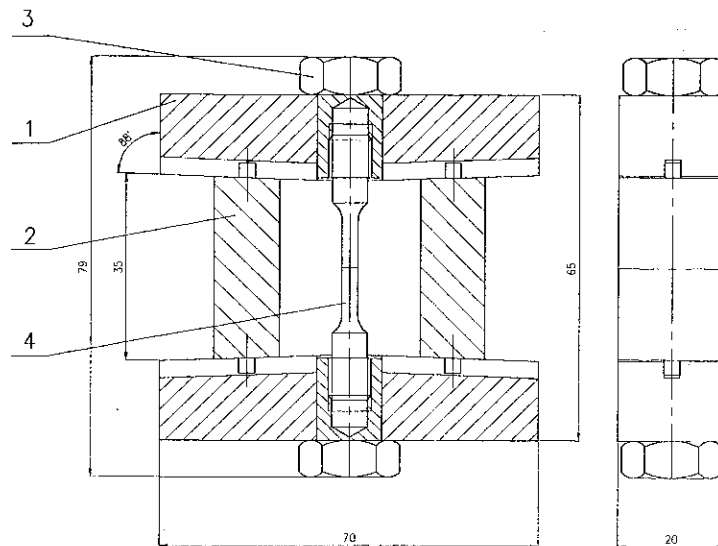
Obr. 3: Umiestnenie vzoriek v moduly

Pre monitorovanie boli použité nasledujúce typy vzoriek:

### Predopnuté ťahové vzorky

Vzorky vo forme teliesok pre skúšku ťahom sú namáhané jednoosovým zaťažením vyvolaným konštantnou deformáciou vzorky. Vzorky sú určené na sledovanie iniciačného štádia vzniku trhlín. Povrch drieku vzorky v aktuálnom prípade bol elektrolyticky leštený. Schéma napínacieho rámčeka s ťahovou vzorkou je na obr. 4.

Po expozícii sa detailne kontroluje povrch vzorky, hodnotí sa veľkosť a počet jamiek a prítomnosť prípadných trhlín. Na pozdĺžnom reze sa kontroluje počet jamiek, počet a hĺbka trhlín, ako aj ich vzťah k mikroštruktúre.



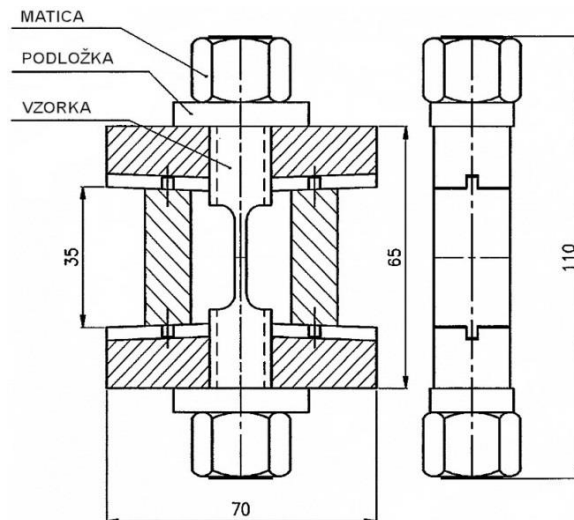
Obr. 4: Schéma rámčeka na predpísanie ťahových vzoriek:

1- rameno, 2- stĺpik, 3- matica, 4- vzorka

### Predopnuté vzorky z PG rúrky

Uvedený typ vzoriek vychádza z rovnakého princípu ako v prípade predopnutých ťahových vzoriek. Spôsob zaťažovania je rovnaký. Odfrézovaním časti steny rúrky sa zmenší prierez rúrky, čím sa zmenší predpínacia sila na dosiahnutie požadovaného napätia. Vzorka rúrky je v zaťažovacom rámčeku upevnená pomocou dvojice matic. Aj v tomto prípade sú vzorky namáhané jednoosovým zaťažením vyvolaným deformáciou vzorky a podľa hodnoty deformácie (~ 1,5 %) sa stanoví zaťažovacie napätie. Vzorky sú určené na sledovanie iniciačného štádia vzniku trhlín. Schéma predpínacieho rámčeka s ťahovou vzorkou je na obr. 5.

Po expozícii prebieha kontrola vzoriek v rovnakom rozsahu jak pri predopnutých ťahových vzorkách.

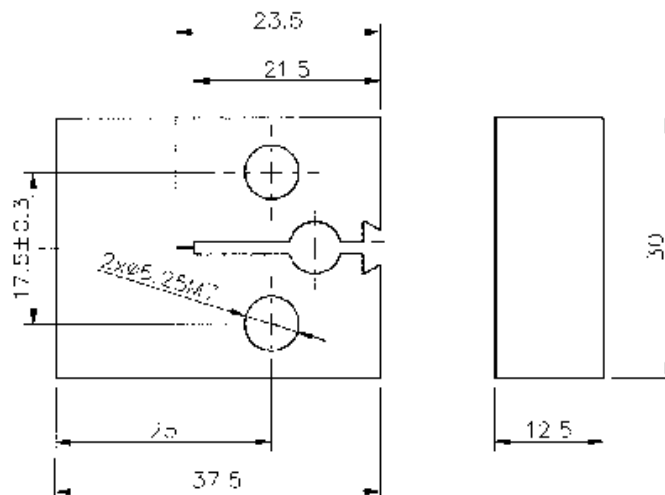


Obr. 5: Schéma predopnutej vzorky z PG rúrky v predpínacom rámečku

### Vzorky typu CT telies

Vzorky umožňujú sledovať mechanizmus šírenia sa trhlín na zaťaženom telese s vopred vytvorenou trhlinou. Na vyrobených vzorkách sa cyklickým únavovým zaťažovaním pripravili iniciačné únavové trhliny definovanej veľkosti. Vlastné predopnutie sa realizovalo zaťažením vzoriek na požadovanú hodnotu. Pomocou dvojice klinov vložených do stredného otvoru sa zaťaženie vzorky zafixovalo. Na monitorovanie sú použité zmenšené vzorky označované ako 0,5-CT (obr. 6). Skúšobnú sériu tvoria dve vzorky zo základného materiálu a dve vzorky zo zvarového kovu.

Po expozícii sa na každej vzorke vyhodnotí prípadný pokles predpínacieho napätia. Vzorky sa následne rozcyklujú a rozlomí a na lomovej ploche sa zmeria prírastok trhliny počas expozície pri danom zaťažení. Z doby expozície, veľkosti zaťaženia a prírastku trhliny sa určí rýchlosť rastu trhliny.



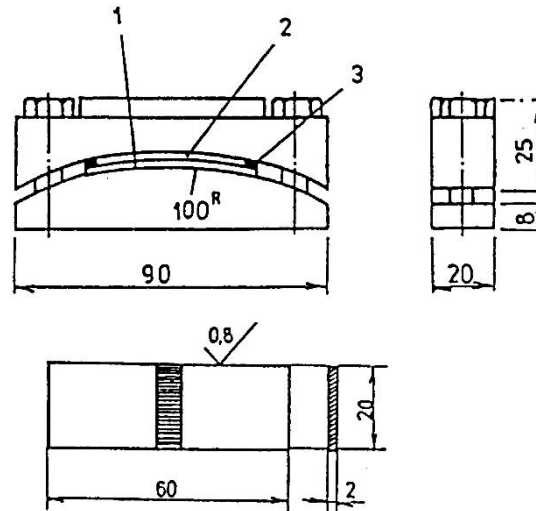
Obr. 6: Schéma skúšobného 0,5-CT telesa

### Vzorky typu CBB

Tento typ vzoriek predstavuje veľmi prísny spôsob sledovania procesov štrbinovej korózie a korózneho praskania. Vzorky upevnené v držiaku sú namáhané konštantnou deformáciou (1 %). Navyše je vzorka vystavená štrbinovému efektu, keď je medzi vzorku a držiak vložená

grafitová vata, ktorá podporuje kyslíkovú depolarizačnú reakciu. Na obr. 7 je vidieť tvar a základné rozmery vzorky typu CBB vrátane držiaka Sériu v aktuálne exponovaných moduloch tvorí jedna vzorka zo základného materiálu a jedna vzorka zo zvarového kovu.

Po expozícii sa detailne kontroluje povrch vonkajšieho ohybu vzorky, hodnotí sa veľkosť a počet jamiek a prítomnosť prípadných trhlín. Na pozdĺžnom reze sa kontroluje počet jamiek, počet a hĺbka trhlín a ich vzťah k mikroštruktúre [4].



Obr. 7: Schéma držiaka a vzorky typu CBB:

1-vzorka, 2-grafitová vata, 3-dištančná podložka

## Záver

V predkladanom príspevku je opísaný systém pre dlhodobé monitorovanie korózných procesov vybraných zariadení JE. Uvedený systém predstavujú finančne nenáročný spôsob monitorovania, ktorý zabezpečuje exponovanie originálnych vzoriek v reálnych prevádzkových podmienkach. Z doposiaľ získaných výsledkov krátkodobo exponovaných vzoriek vyplýva, že použitý konštrukčný materiál zabezpečuje dostatočnú koróznou stabilitu, pokiaľ z metalurgického hľadiska neobsahuje žiadne neprípustné defekty, alebo nie je lokálne extrémne znečistený.

Vzorky vybraté z KS inštalovanej na 3. bloku JE Bohunice (v roku 2020) a 1. bloku JE Mochovce (v roku 2021), ktoré boli v prevádzke od roku 2008, budú predmetom analýz v druhej polovici roku 2022. Tieto vzorky predstavujú jedinečnú príležitosť pre hodnotenie dlhodobého pôsobenia korózneho prostredia na vybrané konštrukčné materiály jadrových zariadení.

## Literatúra

- [1] KUPČA, L., BŘEZINA M. Operational environment influence monitoring on the corrosion behaviour of WWER-440 primary piping materials, *EUROCORR '97*, Trondheim 22. – 25.9.1997
- [2] BŘEZINA, M., KUPČA, L., BALÁK, J., PROVAZNÍK, J. Monitorovanie korózie v jadrovo-energetických zariadeniach SR. *Korózia v energetike 2004*, Košice.
- [3] BŘEZINA, M., PILÁT, P. *Rekonštrukcia korózneho slučky v JE Mochovce 1. blok*. Technická správa VUJE č. 0360/36/2008, Trnava, 2008.
- [4] BŘEZINA, M. *Dokumentácia k výmene modulu KS-EBO*. Technická správa VUJE č. 0360/29/2012, Trnava, 2012.