

# HODNOCENÍ PŘEDPÍNACÍCH KABELŮ VYJMUTÝCH Z KONTEJNMENTU ETE

## EVALUATION OF PRESTRESSED CABLES REMOVED FROM NPP TEMELIN CONTAINMENT

Dana Tonarová, Petr Brabec, Zdeněk Fencel, Miroslav Krpec a Antonín Šik

ÚJV Řež, a. s.

### Abstrakt

V rámci sledování stavu kontejnmentu elektrárny Temelín (ETE) probíhá vyjmutí vybraných kabelů a kontrola jejich stavu po dlouhodobém provozu. Předpínací kabely jsou podrobeny zevrubné kontrole a koncová část kabelů s montážní očnící je odebrána k zátěžové stendové zkoušce. Laboratorní hodnocení drátů se sestává z detailní vizuální prohlídky zaměřené na mechanické a korozní poškození drátů, stanovení mechanických vlastností, které jsou doplněné metalografickým a fraktografickým hodnocením.

### Abstract

In order to monitor the condition of the NPP Temelín containment, the selected cables are removed and checked after long-term operation. The prestressing cables are thoroughly inspected and the end part of the cables with mounting thimble is taken for a stress test. Laboratory evaluation of cables consists of detailed visual inspection, evaluation of mechanical and corrosion damage of cables, determination of their mechanical properties, metallographic and fractographic evaluation.

### Úvod

Kontejnment ETE slouží jako hermetická ochranná obálka jaderného reaktoru, která chrání reaktor před vnějšími vlivy (klimatické, seismické, terorismus atd.) a zároveň slouží jako poslední bariéra proti úniku radioaktivních látek do okolí. Kontejnment je tvořen předpjatou železobetonovou konstrukcí. Předepnutí je realizováno systémem volných předpínacích kabelů, které jsou vedeny kabelovými kanály. Válcová část kontejnmentu je předepnuta 96 kabely a část kopule 36 kabely. Předpínací kabely jsou vyrobeny z vysokouhlíkové ušlechtilé oceli s nízkou relaxací o průměru drátu 5 mm, viz tab. 1. Původní typ předpínacích kabelů z roku 1993 obsahoval 450 drátů, nové kabely obsahují 478 drátů při zachování stejného materiálu a průměru drátu. Kabely válcové části jsou kotveny na horní hraně válce v opěrném věnci, dále jsou vedeny ve tvaru šroubovice ke spodnímu okraji válce, kde jsou ohnuty a vrací se zpět ke kotvě na horním okraji válce. [1]

Tab. 1: Parametry drátů předpínacích kabelů [2]

Ocelový drát s nízkou relaxací čsl. výroby vyráběný podle podnikové normy PN 22-285-88		
Jmenovitý průměr D	5,0	mm
Normová pevnost v tahu $R_{pn}$	1800,0	MPa
Mez kluzu $R_p 0,2$	1620,0	MPa
Výpočtová pevnost v tahu $R_{pd}$	1440,0	MPa
Modul pružnosti $E_p$	200000,0	MPa
Nejnižší tažnost	4,0	%
Relaxace při teplotě do 20 °C	2,5	%
při teplotě do 40 °C	4,5	%
při teplotě do 60 °C	8,0	%

Pro posouzení a zdokumentování stavu jsou předpínací kabely vyjímány z konstrukce kontejnmentu. Výsledkem kontrol je posouzení změn parametrů vyjmutého kabelu z hlediska spolehlivosti předpínacích kabelů, které zůstávají v kontejnmentu [3].

### **Vyjímání předpínacích kabelů z konstrukce**

Vyjmutí kabelů z kanálků kontejnmentu ETE a jejich výměna za nové svazky se provádí podle technologického postupu M54MS5BE002 [4]. Při vyjímání kabelů z konstrukce se na místě vizuálně kontroluje stav očnice, stav dostupných drátů (výskyt koroze a mechanického poškození) a stav konzervační vazelíny. Po vyjmutí výrobní očnice (obr. 1) se kontroluje stav drátů v místě ohybu na očnici. Předpínací kabely se vytahují z kabelového kanálku tak, aby nedocházelo k otírání vazelíny a křížení drátů. Po vytažení kabelů se provádí vizuální kontrola kabelového kanálku, poté je kabel převezen do haly předpínací základny ETE pro kontrolu celého kabelu.



Obr. 1: Celkový pohled po vyjmutí výrobní očnice [5]

### **Vizuální kontrola celého kabelu z provozu**

Vizuální kontrola je zaměřena na celou délku předpínacího kabelu, tj. přibližně 100 metrů. Na jednom konci je smyčka bez výrobní očnice, na druhém konci je montážní očnice pro kontrolu ponechána. Vizuální kontrola je zaměřena na typ a rozsah přítomných vad. Dle příslušného předpisu 01.SA.18 [3] se při vizuální prohlídce kabelu provádí fotodokumentace v ekvivalentních vzdálenostech cca 1 metr.

Na základě hodnocení VT kontroly na rovných referenčních úsecích kabelu lze konstatovat, že v průběhu kontrol nebylo zaznamenáno žádné provozní (v podobě deformace či přetržení drátů) ani korozní poškození drátů. V oblasti vyjmuté výrobní očnice se obvykle vyskytují přetržené dráty v řádu jednotek kusů. Lom drátu provozního původu byl vždy lokalizován v blízkosti vrcholu ohybu na očnici. Na přetržených i lomem neporušených drátech bylo dokumentováno lokální napadení koroze, doprovázené přítomností vrstvy korozních produktů černé barvy. Korozní napadení drátu se vyskytuje v místech degradace vazelíny. Po vizuální kontrole jsou pro další laboratorní zkoušky odebrány dráty z referenčních úseků a z oblastí s výskytem vad.

### **Stendová zatěžová zkouška**

Odebrán je 15metrový úsek kabelu s montážní očnicí. Na tomto konci kabelu se provádí zatěžovací stendová zkouška, která simuluje přetížení kabelu včetně LOCA nehody. Na konci zatěžovacího testu jsou kabely zatíženy na hodnotu, která simuluje zvýšení síly v předpínacích kabelech při maximální projektové havárii. Po dokončení zátěžového testu jsou ze zkoušeného úseku odebrány segmenty pro následné laboratorní hodnocení stavu drátů dle řídicího předpisu PP 2302.359 [6].

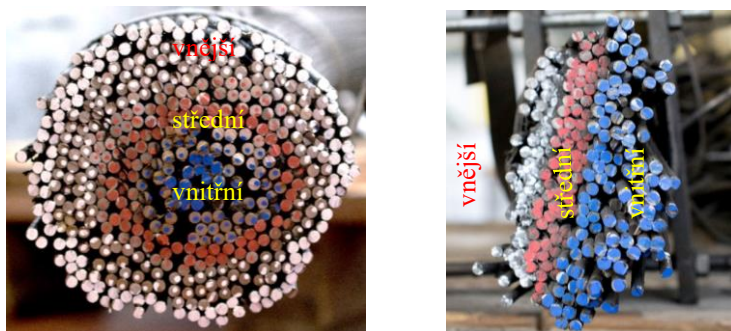
## Vizuální kontrola kabelu po stendové zkoušce

Úlohou vizuální kontroly kabelu je ověření stavu jednotlivých drátů, na jejímž základě je proveden odběr referenčních a poškozených vzorků z různých vrstev kabelového svazku.

### Rovná část

Z vnější, střední a vnitřní vrstvy kabelového svazku se vyberou vzorky referenčních drátů bez poškození, viz obr. 2a. Po označení vrstev drátů se svazek drátů z rovné části rozvolní a sleduje se pokrytí drátů konzervační vazelínou.

Na hodnocených drátech z rovné části kabelu byl vždy konstatován bezvadný stav. Dráty byly potaženy tenkou vrstvou vazelíny bez známek degradace. Očištění pomocí organického rozpouštědla neodhalilo korozní napadení ani mechanické poškození v podobě otlaků apod.



Obr. 2: Celkový pohled na rovný úsek rozčleněný na 3 vrstvy/zóny drátů v profilu [7]

### Část s montážní očnicí

Vizuální kontrola je provedena po vyjmutí montážní očnice a následném očištění pomocí organického rozpouštědla. Dráty jsou na řezu postupně označovány barevným nátěrem stejně jako u rovného úseku (obr. 2b). Z každé vrstvy jsou pro laboratorní zkoušky vybrány 3 referenční dráty. U každého drátu je posuzováno, zda je prohnutý „ideálně“ elipticky nebo jsou v ohybu přítomné markantní asymetrické prvky či koroze. Důležitým sledovaným znakem mechanického poškození je přítomnost otlaků. Všechny prasklé dráty, vybrané vzorky s korozním napadením a mechanickými otlaky jsou předány k podrobnému laboratornímu hodnocení.

Obecně se na vnějším povrchu kabelových smyček vyskytuje dostatečné množství vazelíny a dráty nenesou známky korozního napadení či mechanického poškození. V oblasti vnitřní vrstvy byly nalezeny prasklé dráty (obr. 3), byl zde zaznamenán úbytek vazelíny a na povrchu drátů byly patrné skvrny korozních produktů. Vinutí kabelu vykazovalo přítomnost lokální asymetrie v podobě vybočení a zprohýbání drátů, což bylo místy doprovázeno viditelným křížením. Vyšší počet křížících se drátů korespondoval s přítomností otlaků, ve kterých pak mohou působením vnějších sil (provozních, zatěžování na stendu) vznikat lomy.



Obr. 3: Pohled na vnitřní část smyčky kabelů – úbytek konzervační vazelíny, korozní napadení a viditelné lomy drátů [7]

## Laboratorní hodnocení stavu kabelu

Cílem laboratorního hodnocení je ověřit vlastnosti drátu použitého na výrobu kabelu po provozní expozici v prostředí ochranné obálky kontejnmentu a dále pak po dodatečných stendových zatěžovacích zkouškách. Laboratorní hodnocení se sestává z hodnocení mechanického a korozního poškození, stanovení mechanických vlastností, metalografického a fraktografického hodnocení. V následujících kapitolách budou shrnuty výsledky z celkového hodnocení v letech 2011-2019.

### Stanovení mechanických vlastností

Předepsané testy dle předpisu 01.SA.18 [3] zahrnují statickou zkoušku tvrdosti, statickou zkoušku tahem za pokojové teploty a zkoušku střídavým ohybem.

Z výsledků měření je patrné, že u předpínacích kabelů dochází během zatěžování ve stendu vlivem opakovaných zatěžovacích cyklů ke zpevnění materiálu jednotlivých drátů. O tom svědčí zvýšená tvrdost materiálu a snížená tažnost, jak v rovných referenčních oblastech, tak i z konce kabelu. Mez pevnosti  $R_m$  byla u testovaných drátů ve všech případech dostačující a u všech drátů přesahovala svými výsledky normované hodnoty. V oblasti konce kabelu po stendové zkoušce se vyskytovaly dráty, u kterých byla naměřena mez kluzu  $R_{p0,2}$  menší než pro nové dráty.

### Metalografické a fraktografické hodnocení vybraných drátů

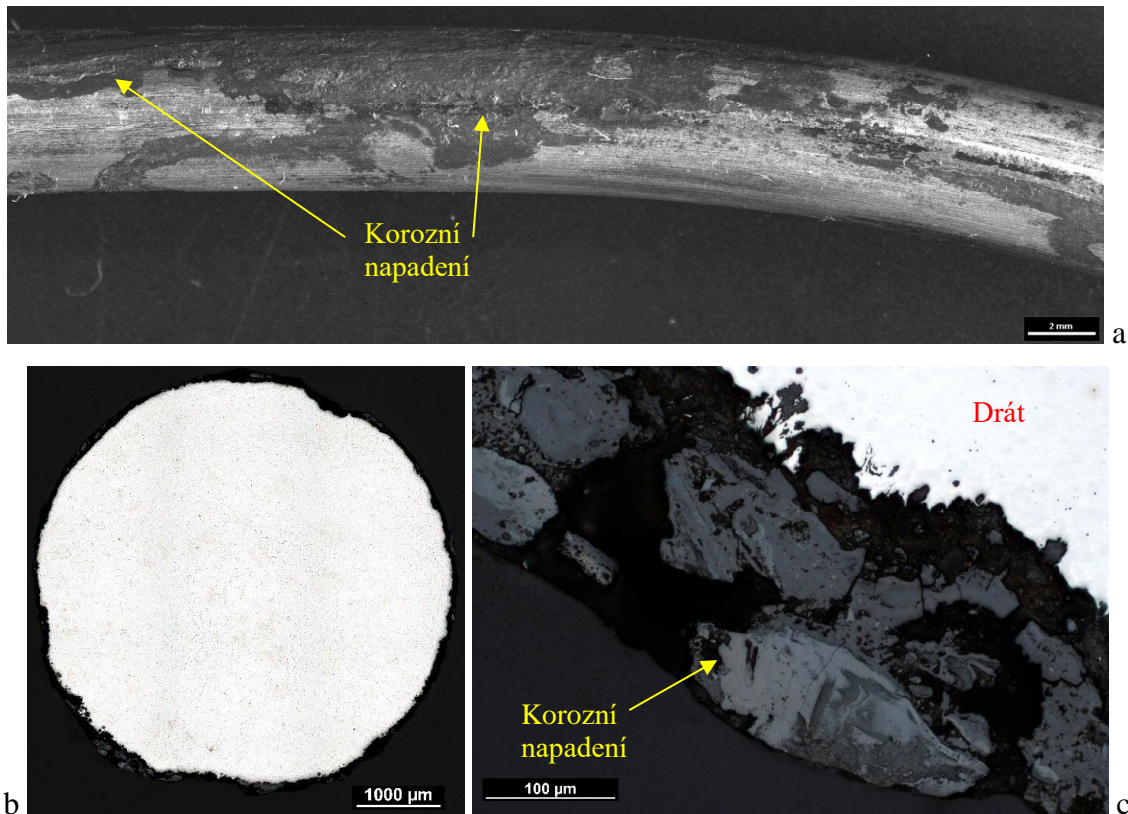
Na základě vizuální kontroly jsou k detailnímu laboratornímu hodnocení odebrány vzorky z kontrolních úseků rovné části, ohybu kabelu a konce kabelu bez očnice, příp. další dle výskytu korozního či mechanického poškození. Dále jsou k podrobnému hodnocení odebrány všechny dráty, u kterých došlo k přetržení. Soubor laboratorních vzorků je doplněn vybranými vzorky s výraznými otlaky a hloubkovým korozním napadením.

**Kontrola** povrchu všech odebraných vzorků drátů a ověření jejich **rozměrové přesnosti** byla prováděna pomocí stereomikroskopu. Skutečný průměr drátu je kontrolován podle ČSN 42 6403 [8].

**Hodnocení mikrostruktury** je prováděno na leptaných metalografických výbrusech příčného a podélného řezu drátu. **Mikročistota** materiálu je kontrolována na neleptaných výbrusech podélného řezu drátu podle ČSN ISO 4967 [9].

Metalografickým hodnocením bylo zjištěno, že základní materiál má jemnou perlitickou strukturu se silnou deformací ve směru tažení drátu (vláknitá struktura), která je typická pro daný typ materiálu. Mezi vzorky ze všech odebraných kabelů nebyl zaznamenán žádný rozdíl v mikrostrukturní charakteristice. Ve struktuře byly ve všech hodnocených drátech pozorovány vměstky dvojího typu: protažené sulfidické vměstky (typ A) a globulární až ostrohranné oxidy (typ D).

**Korozní a mechanické poškození** bylo hodnoceno mikroskopicky v metalografickém řezu se zaměřením na přítomnost povrchových trhlin a jejich hloubku, hloubku rýh, korozního napadení a případnou přítomnost dalších typů vad (otlaky apod.). Mikroskopické hodnocení korozního napadení bylo provedeno postupy podle ČSN 03 8137 [10]. Dráty vykazovaly nerovnoměrné korozní poškození do hloubky, které nepřevyšovalo hodnotu 0,5 mm (obr. 4). Nebyly zaznamenány plošné korozní úbytky oslabující průřez drátu o více než 1 mm<sup>2</sup>. Dle ČSN 03 8137 [10] se na povrchu drátů vyskytovala koroze podpovrchová, důlková a koroze po vrstvách. Po stendové zkoušce nebyly nalezeny žádné nápadné odchylky v přítomnosti výrobních a montážních vad ani korozní poškození oproti kontrolním úsekům z celého kabelu.



Obr. 4: Koroze drátů: a) koroze na povrchu drátu [7], bc) koroze v řezu drátu [11]

**Fraktografickému hodnocení** jsou podrobeny vybrané lomy drátů odebraných při vizuální kontrole a dále lomy drátů po mechanických testech. Přetržené dráty se vyskytovaly převážně ve vnitřní vrstvě kabelové smyčky. Lomy, které vznikly při provozu byly pokryté korozní vrstvou. Lomy ze stendové zatěžovací zkoušky byly na povrchu lesklé a čisté bez výskytu koroze. Lomové plochy drátů, u kterých došlo během zatěžovací zkoušky k přetržení, vykazovaly téměř jednotné porušení. Na plochách se vyskytovalo v převážné většině smykové porušení (lomové plochy byly orientovány pod úhlem 45°) charakterizované důlkovou morfologií. U všech přetržených drátů se v lomové ploše vyskytovalo většinou tvárné porušení tzv. dřevitý lom charakteristický řádkovitou texturou, fazety křehkého transkrystalického porušení, které jsou charakteristické pro víceosé tahové napětí a sekundární trhliny. Iniciační místa byla lokalizována v oblastech otlaků, tzn. v místech ve kterých docházelo k maximální kumulaci napětí při stendových zkouškách.



Obr. 5: Lom drátů po stendové zkoušce: a) lom s otlakem, stereomikroskop, b) lomová plocha, SEM [11]

## Závěr

Na základě hodnocení vyjmutých předpínacích kabelů z kontejnmentu jaderné elektrárny Temelín je patrné, že hlavní příčinou praskání drátů je vznik otlaků, způsobených montážním křížením drátů na očnici.

K praskání drátů dochází především ve vnitřních vrstvách kabelového svazku v blízkosti povrchu očnice, kde mají dráty menší rádius ohybu. Vyhodnocení prasklých drátů prokázalo, že ke všem lomům došlo v místě, kde byl drát otačen, tzn. jeho profil nebyl kruhový. Deformací spojenou se změnou průřezu drátu dochází ke vzniku tenké vysoce křehké povrchové vrstvy, kde se iniciují trhliny, které následně způsobí lom celého drátu.

V ÚJV Řež, a. s. byl navržen nový způsob zavádění kabelů tak, aby nedocházelo ke křížení jednotlivých drátů, a tím následně k lomu. Při použití nového zavaděče si dráty zachovají své mechanické vlastnosti a nedochází k mechanickému poškození povrchu. Nové opatření zamezující křížení drátů je zpracováno v pracovním postupu M54MS5BE001 [12].

Po provedení podrobného vyhodnocení zkoušek lze konstatovat, že předpínací kabely splňují předpoklad pro provoz do konce provozní životnosti (35 let) daný rozsahem realizovaných zkoušek.

## Literatura

- [1] Státní úřad pro jadernou bezpečnost (2017): *NÁRODNÍ ZPRÁVA ČESKÉ REPUBLIKY pro účely pro účely Topical Peer-Review „Řízené stárnutí“ dle Směrnice o jaderné bezpečnosti 2014/87/EURATOM. SÚJB/ JB/24698/2017*, Praha.
- [2] Šik, A. a kol. (2017): *Zkoušky předpínacích kabelů ochranné obálky ETE*. Zpráva, DITI 2310/168, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [3] ČEZ, a. s. (2014): *Instrukce technické kontroly č. 01.SA.18: Kontroly a zkoušky na vyjmutém kabelu ochranné obálky*. ČEZ, a. s.
- [4] M54MS5BE002: *Výměna předpínacího kabelu ochranných obálek HVBI a 2 JE Temelín*.
- [5] Brabec, P. a kol. (2014): *Závěrečná zpráva z kontrol a zkoušek vyjmutého kabelu 1.18K, 1.10K mimo odebraný konec*. Zpráva, DITI 2302/247, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [6] (2019): *Hodnocení koncového segmentu kabelu ochranné obálky HVB ETE po stendové zkoušce*. Pracovní postup, PP 2302 359, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [7] Brabec, P. a kol. (2017): *Hodnocení vyjmutých segmentů kabelů z HVB po stendových zátěžových zkouškách – kabely 1.10K, 1.18K*. Zpráva, DITI 2302/468, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [8] ÚNMZ (1967): *Norma ČSN 42 6403: Tažené ocelové dráty kruhového průřezu. Základní rozměrová norma*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- [9] ČNI (2003): *Norma ČSN ISO 4967: Ocel – Stanovení obsahu nekovových vměstků – Mikrografická metoda využívající normovaná zobrazení*. Český normalizační institut, Praha.
- [10] ČNI (1989): *Norma ČSN 03 8137: Ochrana proti korozi. Kovy, slitiny a kovové povlaky. Metalografické vyhodnocování korozního napadení*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- [11] Fencel, Z. a kol. (2019): *Hodnocení vyjmutých segmentů kabelů z HVB po stendových zátěžových zkouškách – kabely 2.13K, 2.19K*. Zpráva, DITI 2302/621, ÚJV Řež, a. s., Řež.
- [12] M54MS5BE001: *Předpínací kabely ochranných obálek HVBI a 2 ETE (Kompletace předpínacího kabelu)*.