



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Diagnostika vad materiálu vodních turbín a jejich oprava

Bakalářská práce

Autor: Martin Dolanský
Vedoucí práce: prof. Ing Jan Suchánek, CSc.
Studijní program: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Vedoucí práce: prof. Ing Jan Suchánek, CSc.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dolanský** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **473463**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Diagnostika vad materiálů vodních turbin a jejich oprava

Název bakalářské práce anglicky:

Diagnostics of material defects of hydroturbines and their overhaul

Pokyny pro vypracování:

Přehled problémů s vadami vodních turbin vzniklých při provozu. Popis degradačních faktorů - kavitace, koroze, eroze. NDT metody pro zjišťování vad materiálu. Příčiny vzniku vad v provozu a možnosti jejich oprav.

Seznam doporučené literatury:

Vocel, M. - Dufek, V. : Tření a opotřebení strojních částí. SNTL, 1976
Suchánek, J.: Erozivní opotřebení materiálu. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2014
Časopisy - WEAR, TRIBOLOGY INTERNATIONAL, Zváranie a pod.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.12.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

9.6.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jana Suchánka, CSc., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora



Poděkování:

Rád bych poděkoval prof. Ing Janu Suchánkovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích a při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat všem kolegům z firmy ČEZ, a.s., zejména Bc. Janu Eliášovi za pomoc s organizováním praktické části této bakalářské práce a spolupráci na daném problému.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá diagnostikou vad materiálů vodních turbín a jejich opravou. Téma bylo zvoleno z důvodu mého zájmu o tuto technickou problematiku, jelikož je součástí náplně mého zaměstnání.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část je rozdělena na tři kapitoly. V teoretické části jsou definovány základní pojmy jako vodní turbíny a jejich rozdělení, vady materiálu vodních turbín a metody NDT (nedestruktivního testování) vodních turbín.

Praktická část obsahuje výsledky získané provedením NDT na oběžném kole, návrh opravy a provedení opravy. Jedná se o diagnostickou kontrolu a následnou opravu oběžného kola TG1 elektrárny Kořensko.

Výsledky této práce se dají aplikovat v praxi i na jiných vodních elektrárnách. Tato práce může zároveň posloužit zájemcům o danou problematiku.

Klíčová slova

vodní turbíny; vady materiálu vodních turbín; metody nedestruktivního testování vodních turbín

Abstract

This bachelor thesis deals with the diagnosis of defects in water turbine materials and their repair. The topic was chosen because of my interest in this technical issue, as it is part of my job.

The thesis is divided into a theoretical and a practical part. The theoretical part is structured into three chapters. The theoretical part defines basic concepts such as water turbines and their classification, material defects of water turbines and NDT (non-destructive testing) methods of water turbines.

The practical part contains the results obtained by performing NDT on the impeller, a proposal for a repair and the execution of the repair. It concerns the diagnostic inspection and subsequent repair of the impeller TG1 of the Kořensko power plant.

The results of this thesis could be applied in practice on other hydropower plants as well. This thesis can also serve those interested in said subject.

Key words

water turbines; material defects of water turbines, non-destructive testing methods of water turbines

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Seznam použitých zkratk | 9 |
| Seznam použité symboliky | 10 |
| Úvod | 11 |
| 1. Teoretická část | 12 |
| 1.1. Vodní turbíny | 12 |
| 1.1.1. Rozdělení podle tlaku | 12 |
| 1.1.2. Rozdělení podle spádu | 13 |
| 1.1.3. Rozdělení podle využití vodního toku | 13 |
| 1.1.4. Rozdělení podle směru | 13 |
| 1.2. Materiál vodních turbín | 14 |
| 1.2.1. Francisova turbína | 14 |
| 1.2.2. Kaplanova turbína | 15 |
| 1.2.3. Peltonova turbína | 15 |
| 1.3. Doba používání vodních turbín na vodních elektrárnách | 16 |
| 1.3.1. Vltavská kaskáda | 16 |
| 1.3.2. Elektrárny mimo Vltavskou kaskádu | 22 |
| 2. Typy vad materiálů vodních turbín | 23 |
| 2.1. Kavitace | 23 |
| 2.2. Druhy koroze | 29 |
| 2.3. Eroze u vodních turbín | 30 |
| 3. Metody NDT na diagnostiku vad | 31 |
| 3.1. Popis NDT zkoušek | 32 |
| 3.1.1. VT – Vizuální metoda | 32 |
| 3.1.2. PT – Kapilární metoda | 33 |
| 3.1.3. MT – magnetická metoda prášková | 34 |
| 3.1.4. UT – Ultrazvuková metoda | 35 |
| 4. Praktická část | 37 |
| 4.1. Provedení vizuální zkoušky VT | 37 |
| 4.2. Provedení zkoušky magnetickou práškovou metodou MT | 41 |
| 4.3. Provedení zkoušky kapilární metodou PT | 43 |
| 4.4. Provedení zkoušky ultrazvukovou metodou UT | 45 |
| 4.5. Návrh a průběh opravy trhlin a kavitace | 46 |
| 5. Závěr | 49 |



| | |
|-----------------------------|-----------|
| Bibliografie | 50 |
| Seznam tabulek | 52 |
| Seznam obrázků | 53 |

Seznam použitých zkratk

OK – oběžné kolo
RK – rozváděcí kolo (rozvaděč)
OL – oběžná lopata
GO – generální oprava
MT – magnetická prášková metoda
PT – kapilární metoda
VT – vizuální metoda
UT – ultrazvuková metoda
NDT – nedestruktivní zkoušení materiálů
TG – turbogenerátor
ČSN – Československá státní norma
EN – Evropská norma
ISO – International Organization for Standardization
ELI – elektrárna Lipno
EHN – elektrárna Hněvkovice
EKO – elektrárna Kořensko
EOR – elektrárna Orlík
EKA – elektrárna Kamýk
ESL – elektrárna Slapy
EST – elektrárna Štěchovice
EVR – elektrárna Vrané
EDA – elektrárna Dalešice
EMO – elektrárna Mohelno
EDS – elektrárna Dlouhé stráně
JE – jaderná elektrárna
s.t.v. – směr toku vody
fý. – firma
v.sl. – vodní sloupec
TZ – tepelné zpracování

Seznam použité symboliky

C – absolutní rychlost proudu v turbíně

D, d – průměr

H – spád v metrech vodního sloupce (v. sl.) tlaková výška v m. v. sl.

H_B – barometrický tlak v m. v. sl.

H_t – napětí vodních par v m. v. sl.

$H_b = H_B - H_t$ – barometrický tlak snížený o napětí vodních par v m. v. sl.

H_s – sací výška

$h = \frac{p}{\gamma}$ – vodní sloupec odpovídající tlaku p

n – počet otáček

n_n – jmenovité otáčky

n_p – průběžné otáčky

p – tlak v kg/cm^2

Q – průtok

Q_η – průtok při nejlepší účinnosti

Q_{max} – hltnost turbíny (maximální průtok)

η_s – účinnost sací trouby

$\sigma = \frac{H_b - H_s}{H}$ – Thomův kavitační součinitel

lux – jednotka intenzity osvětlení (lx)

nm – jednotka vlnové délky

E_{min} – minimální intenzita osvětlen

Úvod

Bakalářská práce se zabývá tématem zaměřeným na nedestruktivní testování materiálů vodních turbín a opravou zjištěných vad. Toto téma bylo zvoleno, jelikož se jedná o velice zajímavá technická zařízení na vodních elektrárnách. Tato zařízení jsou přístupná pouze jednou za několik let v době oprav a kontrol.

Stanoveným cílem bylo provést NDT turbíny na vodní elektrárně Kořensko, jelikož turbína byla v době vypracovávání praktické části odstavena k provedení nálezu. V případě nálezu vad bude navržena adekvátní oprava nebo stanoven postup k zamezení jejich vzniku.

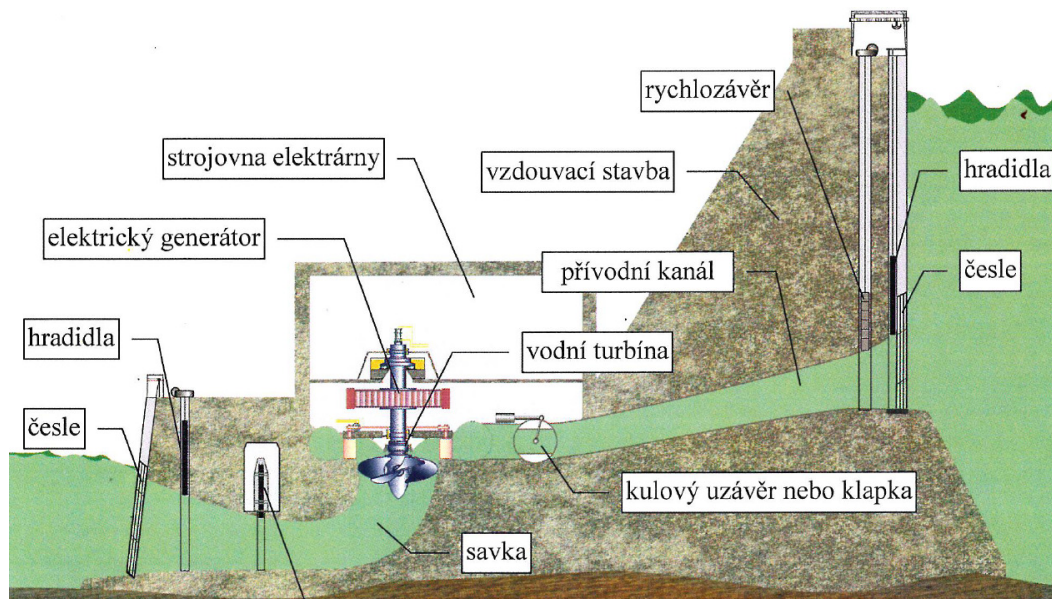
Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část vychází z české a zahraniční literatury a dále dle konzultací se specialisty fy. ČEZ, a.s. Teoretická část práce je rozdělena do tří kapitol. V první kapitole je popsán úvod vodních turbín, tzn. jejich rozdělení. V druhé kapitole jsou rozděleny typy vad materiálu vodních turbín. V poslední kapitole teoretické části jsou popsány metody NDT.

V praktické části byly využity NDT metody při provádění nálezu na oběžném kole TG1 elektrárny Kořensko k získání výsledků. Aplikovány byly především tyto metody: VT (vizuální kontrola), PT (kapilární metoda), MT (magnetická metoda prášková) a UT (ultrazvuková metoda). Po provedení NDT se stanoví návrh a rozsah opravy. Významnou součástí praktické části jsou reálné fotografie, bez kterých je daný problém obtížně představitelný. Výsledky praktické části se v přenesené míře dají aplikovat i na jiných vodních elektrárnách. Tato práce může zároveň posloužit zájemcům o danou problematiku.

1. Teoretická část

1.1. Vodní turbíny

Vodní turbíny využívají potenciálu vodních toků, kde se mění potenciální energie polohová na energii kinetickou – znázorněno na obr. 1. Přívodním kanálem je voda dopravována skrze rozváděcí ústrojí na lopatky oběžného kola. Oběžné kolo přemění energii kinetickou na energii mechanickou a začne otáčet soustrojím. Energie je přes hřídel soustrojí přenášena na rotor hnaného stroje a měněna na elektrickou energii.[1][2]



Obr. č. 1 Schématické zobrazení vodní elektrárny [2]

Jedná se o obnovitelný zdroj elektřiny, jež má prozatím nenahraditelný význam pro českou energetickou přenosovou soustavu vyvažováním nestability dodávané el. energie ze slunečních a větrných elektráren a odebírané el. energie ze sítě. [23] [27]

1.1.1. Rozdělení podle tlaku

Stejnotlaké neboli rovnotlaké (akční)

Voda protéká pevnými rozváděcími lopatami, v nichž se mění buď celá tlaková energie, nebo pouze její část na pohybovou. Poté vtéká na oběžné lopaty, které jsou opačně zakřivené oproti rozváděcím, tlakem proudící vody na oběžné lopaty se začne oběžné kolo točit. Jestliže se mění tlaková energie vyjádřena v metrech vodního sloupce spádem „H“ v rozváděcích lopatách na pohybovou, tak z nich voda vytéká s nulovým přetlakem teoretickou rychlostí $C = \sqrt{2gH}$. Při průtoku oběžnými lopatami se tlak nemění, takže je při výtoku stejný jako při vtoku. Oběžné kolo je umístěno nad hladinou spodní vody. [1][24]

Rovnotlaké turbíny jsou například: Peltonova, Bánkiho, Girardova. [2]

Přetlakové (reakční)

Mění-li se v rozváděcích lopátkách jen část tlakové energie, tak výtoková rychlost bude $C < \sqrt{2gH}$. Proto ve vodě zůstane hydrostatický tlak $\gamma(H - \frac{C^2}{2g})$. Následně v oběžném kanálu dojde ke změně zbytku tlakové energie na pohybovou. [1]

Dochází zde k urychlování vodního proudu na oběžný kanál. OK je umístěno pod hladinou spodní vody. [1][24]

Rovnotlakové turbíny jsou například: Kaplanova, Francisova, Dériazova. [2]

1.1.2. Rozdělení podle spádu

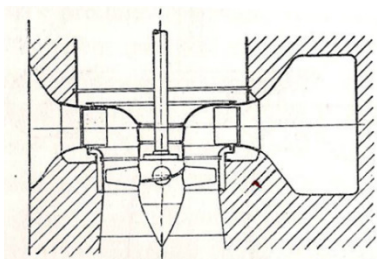
- Nízkotlakové... ≤ 20 m
- Středotlakové... 20–100 m
- Vysokotlakové... ≥ 100 m [2] [24]

1.1.3. Rozdělení podle využití vodního toku

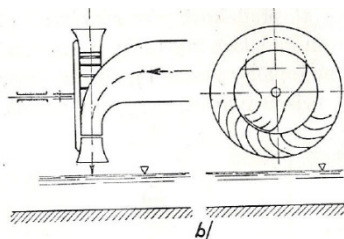
- Průtočné – jsou závislé na okamžitém průtoku.
- Vyrovňovací – stabilizují hladinu, popřípadě průtok.
- Akumulační – z přírodních zdrojů je akumulována voda pro vytvoření zásob.
- Přečerpávací – obsahují horní akumulační nádrž, která se v případě přebytku energie se sítí plní vodou z dolní nádrže. Disponují zásobou energie. [2]

1.1.4. Rozdělení podle směru

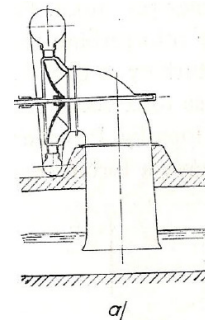
- Axiální – voda protéká oběžným kolem rovnoběžně s osou hřídele, jedná se například o Kaplanovu turbínu – obr. 2, která byla vynalezena v roce 1919.
- Radiální – voda protéká oběžným kolem kolmo na hřídel – obr. 3.
- Radioaxiální – směr v prostoru kola se mění z radiálního na axiální, jedná se například o Francisovu turbínu, která byla vynalezena v roce 1849 – obr. 4.
- Kuželová – voda protéká šikmo na hřídel jak rozváděcím, tak oběžným věncem. Jedná se například o Deriazovu turbínu – obr. 5.
- Tangenciální – voda přitéká jako paprsek ve směru tečny k OK, jedná se například o Peltonovu turbínu, která byla vynalezena v roce 1880 – obr. 6. [1]



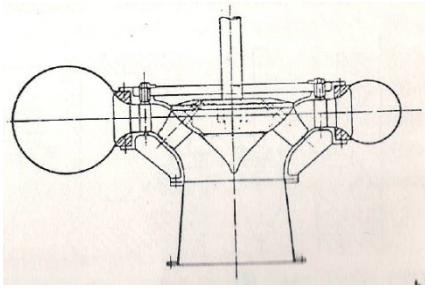
Obr. č. 2 Turbína axiální (Kaplanova turbína) [1]



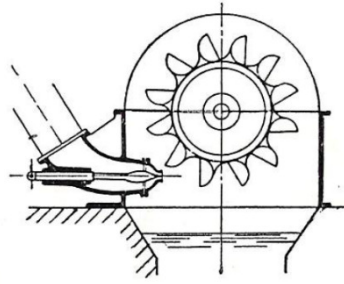
Obr. č. 3 Turbína radiální [1]



Obr. č. 4. Turbína radioaxiální (Francisova turbína) [1]



Obr. č. 5 Turbína radiální (Deriaz) [1]



Obr. č. 6 Turbína tangenciální (Peltonova turbína) [1]

1.2. Materiál vodních turbín

1.2.1. Francisova turbína

Kola s lopatkami zhotovené z ocelových plechů zalité do věnce kola

V dnešní době už nevznikají potíže s litím u oběžných kol a lopatek z jednoho kusu, z toho důvodu se lopatky lisované z ocelových plechů už nepoužívají. Není doporučeno používat tyto lopatky pro spády 30 až 60 m. [1]

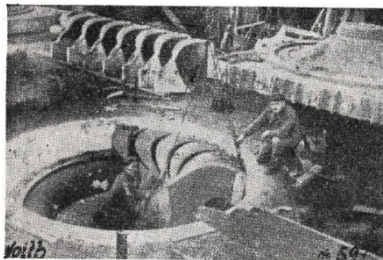
Vlivem tohoto postupu výroby mají kola menší pevnost. Tyto lopatky se lisují za tepla ručně, po opracování mají všude stejnou tloušťku materiálu. [1]

Používají se jen u turbín malých rozměrů a výkonů, důvodem je problematické upínání lopatek do litého materiálu a menší pevnost kola. Při použití korozivzdorné oceli vzniká pravděpodobnost kavitačního poškození, jelikož se ocel při lití vyhřeje a v těch místech klesá kavitační odolnost s možným následkem prasknutím lopatek. [1]

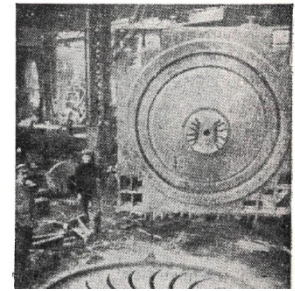
Kola s lopatkami litými z jednoho kusu s kolem

Lopatek tohoto typu se zejména využívá pro vysoké spády a výkony. Kolo se odlévá z lité oceli do formy podle vnějších obrysů kola. Jádra se založí do formy a vyplní prostory kanálů. [1]

Po vylití a tepelném zpracování se musí plochy lopat i věnce ručně obrousit pro dosažení hladkého povrchu, zaručující malé ztráty třením vody po lopatce a pro snadnější vyvážení OK. [1]



Obr. č. 7 Skládání formy pro OK v podniku J. M. Voith [1]



Obr. č. 8 Forma z obr. 7 složená [1]

1.2.2. Kaplanova turbína

Lopatky jsou odlévány z lité oceli nebo korozivzdorné oceli podle kavitačního namáhání. Model se zhotovuje podle vrstevnicového plánu nebo podle válcových řezů. Proti čepu lopatky se udělá nálipek pro snadnější vyrovnání na soustruhu. [1]

Model musí být přizpůsobený tak, aby měl odlitek dostatečné přídavky na opracování. [1]

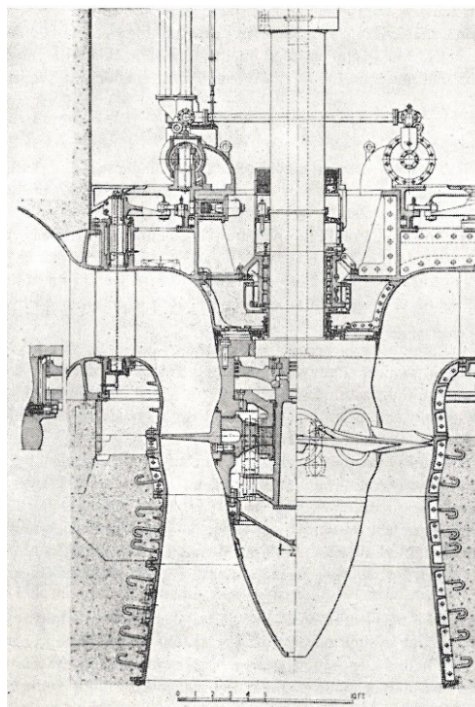
Po vylití a tepelném zpracování se musí plochy lopat ručně obrousit pro dosažení hladkého povrchu, zaručující malé ztráty třením vody po lopatce a kavitační odolnost. Čep lopatky se liší podle použití – buď propelerová turbína s pevnými lopatkami, nebo Kaplanova turbína. U propelerových turbín je čep krátký a slouží k přitažení centrálním šroubem k náboji OK. U Kaplanovy turbíny je čep delší kvůli uložení do ložisek. [1]

Náboj OK se vyrábí z lité oceli nebo korozivzdorné oceli, pouze u malých strojů s nízkým spádem a výkonem se může vyrobit ze šedé litiny. [1] [4]

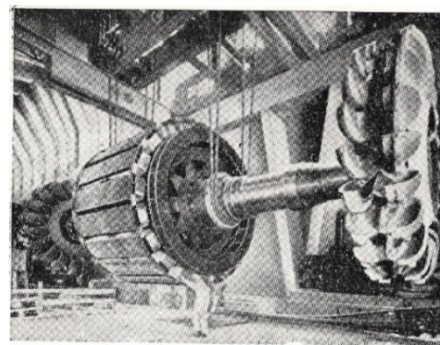
Dnes se většina Francisových a Kaplanových turbín v majetku ČEZ, a.s. odlévá tímto způsobem z materiálu označeného dle EN 10 027-2 takto: 1.4313, nebo dle ČSN CR 10 260 takto: X3CrNiMo13-4, X3CrNiMo13-6, X3CrNiMo13-1. Jedná se o magnetovatelnou martenzitickou korozivzdornou ocel běžné jakosti s obsahem 12–14 % Cr a 3,5–4,5 % Ni. [4]

1.2.3. Peltonova turbína

Oběžná kola pro Peltonovu turbínu se vyrábějí buď s litými lopatkami, nebo s šroubovanými na disk. Lité z litiny se používají do obvodové rychlosti $U = 30$ m/s, z lité oceli až pro 70 m/s. U vysokých spádů se používají legované lité oceli, nejčastěji chromniklová ocel s obsahem 12–14 % Cr a 0,6–1,2 % Ni. Tento materiál se používá zejména, je-li ve vodě obsažen písek, který způsobuje erozi materiálu, a jde o špičkovou elektrárnu. [1]



Obr. č. 9 Turbína elektrárny Lasele. $H=52$ m. [1]



Obr. 2,281. Oběžná kola pro elektrárnu Cimego (Itálie).
 $H = 727$ m; $N = 110$ MW, $n = 300$ ot/min

Obr. č. 10 OK pro elektrárnu Cimego (Itálie) [1]

1.3. Doba používání vodních turbín na vodních elektrárnách

1.3.1. Vltavská kaskáda

Elektrárna Lipno I

Lipno I je vysokotlaká, špičková a akumulární elektrárna uvedená do provozu v letech 1959 až 1960. Jsou zde dvě Francisovy turbíny, každá o instalovaném výkonu 60 MW, a pracují s maximálním spádem 162 m. V letech 2014 a 2017 byla vyrobena nová OK z korozi-vzdorného materiálu X3CrNiMo13-4. [4] [11]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

TG1 1959–1992 → 33 let

TG1 1992–2017 → 34 let

TG2 1960–1989 → 29 let

TG2 1989–2014 → 33 let [4] [11]



Obr. č. 11 NDT OK ELI I



Obr. č. 12 Odlitek OK elektrárny ELI I

Elektrárna Lipno II

Lipno II je nízkotlaká, vyrovnávací, pološpičková elektrárna uvedená do provozu v roce 1954. Je zde jedna Kaplanova turbína o instalovaném výkonu 1,5 MW a pracuje s maximálním spádem 9,5 m. [4] [11]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

TG1 1957–1985 → 28 let

TG1 1985–2024 → 34 let [4] [11]

Náboj OK je původní z roku 1957 z lité oceli 42 2653.1, OL byly vyrobeny nové v roce 1985 z korozi-vzdorného materiálu X3CrNiMo13-6. [4]

Elektrárna Hněvkovice

Hněvkovice je středotlaká, akumulární elektrárna uvedená do provozu v roce 1992. Jsou zde dvě Kaplanovy turbíny každá o instalovaného výkonu 4,8 MW a pracuje s maximálním spádem 16,5 m. [4] [11]



Obr. č. 13 OK elektrárny Lipno II



V náboji OK z lité oceli 42 2653.1 jsou otočně uloženy oběžné lopatky, vlastní list oběžné lopatky je odlit z korozivzdorného materiálu X3CrNiMo13-4.[4]

Turbíny jsou původní bez úprav. V roce 2019 proběhla GO, kdy bylo objeveno rozsáhlé kavitační poškození na náboji OK. [4]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

TG1 1992–2020 → 28 let – pouze oprava náboje, OL původní

TG2 1992–2024 → 33 let [4]



Obr. č. 14 Kavitační poškození u čepu OL

Obr. č. 15 OK elektrárna Hněvkovice

Elektrárna Kořensko

Kořensko je nízkotlaká, průtočná elektrárna uvedená do provozu v roce 1992. Jsou zde dvě Kaplanovy turbíny v horizontálním uspořádání, každá o instalovaném výkonu 1,9 MW a pracující s maximálním spádem 6,2 m. Turbíny jsou původní z korozivzdorného materiálu X3CrNiMo13-1 bez úprav. Dosud není zaznamenán vznik kavitace. [4] [11]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

TG1 1992–2026 → 34 let

TG2 1992–2025 → 33 let [4] [11]



Obr. č. 17 OK elektrárna EKO



Obr. č. 16 Kavitační zápal OK EKO

Elektrárna Orlík

Orlík je středotlaká, špičková a akumulární elektrárna uvedená do provozu v letech 1961 až 1962. Je osazena čtyřmi Kaplanovými turbínami, každá o instalovaném výkonu 91 MW a pracující se spádem až 71,5 m, který je nad limit použití Kaplanových turbín, ty jsou navrhované do spádu 70,5 m, protože nad tímto limitem mají Kaplanovy turbíny větší náchylnost ke kavitaci. [4] [11]

V korozivzdorném náboji OK X3CrNiMo13-6 jsou otočně uloženy oběžné lopatky, list oběžné lopatky je odlit z korozivzdorného materiálu X3CrNiMo13-6. Turbíny na elektrárně Orlík byly původně desetilopátkové od roku 1993 do roku 1997 proběhla jejich modernizace na nový osmilopátkový design, který měl napomoci lepší účinnosti, vyšší kavitační odolnosti a díky menšímu počtu OL i jednoduššímu vnitřnímu mechanismu. [4]

Kavitační poškození vzniká nadále, nejvíce na výstupní hraně OL, jejich oprava probíhá každé dva roky, tím ovšem dochází k postupné změně tvaru OL a tím i ke zhoršení kavitačního součinitele. [4]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

Desetilopátkové kolo

TG1 1961–1988 → 27 let

TG2 1961–1991 → 30 let

TG3 1961–1993 → 32 let

TG4 1962–1994 → 32 let

Osmilopátkové kolo

TG1 1988–2023 → 35 let

TG2 1991–2024 → 33 let

TG3 1993–2026 → 33 let

TG4 1994–2028 → 34 let [4] [11]



Obr. č. 19 OK elektrárny EOR



Obr. č. 18 .Kavitační poškození OL elektrárny EOR

Od roku 2023 do roku 2029 je naplánovaná postupná rozsáhlá generální oprava všech soustrojí, kdy dojde k výměně Kaplanovy turbíny za Francisovu, nebo reverzní Francisovu turbínu, která bude mít pro tento spád a průtok lepší parametry bez nebezpečí kavitace. [4]



Elektrárna Kamýk

Kamýk je nízkotlaká vyrovnávací pološpičková elektrárna uvedená do provozu v roce 1961. Jsou zde čtyři Kaplanovy turbíny, každá o instalovaném výkonu 10 MW a pracující s maximálním spádem 15,5 m. Turbíny procházejí od roku 2014 rozsáhlou rekonstrukcí, nová OK jsou vyrobená z X3CrNiMo13-4. Kavitační poškození se na těchto turbínách nevyskytuje. Původně byl náboj OK vyroben z lité oceli 42 2653.1, následně považen EQ 347 (AWS A-5.9). [4] [11]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

| | |
|------------------------|---|
| TG1 1961–1986 → 25 let | TG1 1986–2012 → 26 let, nové OL |
| TG2 1961–1990 → 29 let | TG2 1990–2019 → 29 let, nové OK |
| TG3 1961–1983 → 22 let | TG3 1983–2008 → 25 let, nové OL |
| TG4 1961–1987 → 26 let | TG4 1987–2017 → 30 let, nové OK [4][11] |



Obr. č. 21 Tlaková zkouška OK elektrárny EKA



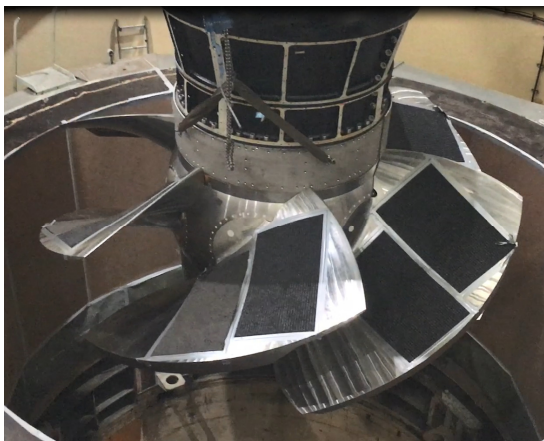
Obr. č. 20 OK elektrárny EKA

Elektrárna Slapy

Elektrárna Slapy je středotlaká akumuláční špičková elektrárna uvedená do provozu v letech 1954 až 1955. Jsou zde tři Kaplanovy turbíny, každá o instalovaném výkonu 48 MW a pracující s maximálním spádem 56 m. Turbíny na elektrárně Slapy byly původně osmilopátkové, od roku 1993 do roku 1996 proběhla jejich modernizace na nový šestilopátkový design, který měl napomoci lepší účinnosti, vyšší kavitační odolnosti a díky menšímu počtu OL i jednoduššímu vnitřnímu mechanismu. U těchto kol nedocházelo k výraznému kavitačnímu poškození. Turbíny procházejí od roku 2016 rozsáhlou rekonstrukcí, nové OK jsou vyrobeny z X3CrNiMo13-4. [4] [11]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

| Osmilopátkové kolo | Šestilopátkové kolo |
|------------------------|---------------------------------|
| TG1 1955–1995 → 40 let | TG1 1995–2020 → 25 let |
| TG2 1955–1994 → 39 let | TG2 1994–2021 → 27 let |
| TG3 1954–1993 → 39 let | TG3 1993–2018 → 25 let [4] [11] |



Obr. č. 23 Nové OK elektrárny ESL



Obr. č. 22 Kavitační poškození OL elektrárny ESL

Elektrárna Štěchovice I

Štěchovice I je středotlaká, vyrovnávací a pološpičková elektrárna uvedená do provozu v letech 1943 až 1944. Jsou zde dvě Kaplanovy turbíny, každá o instalovaném výkonu 11,5 MW a pracující s maximálním spádem 20 m. OL jsou vyrobeny z X3CrNiMo13-4, náboj OK z lité oceli 42 2653.1. [4] [11]

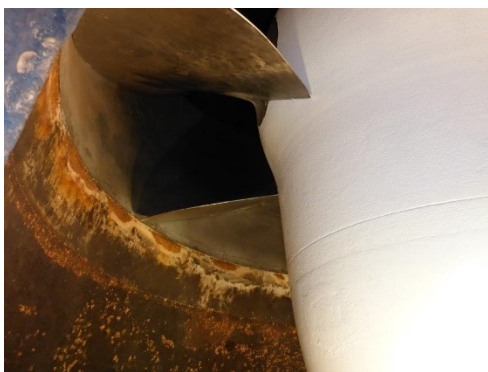
Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

TG1 1980–2023 → 43 let

TG2 1978–2004 → 26 let

[4] [11]

TG2 2004–2030 → 26 let (*původní OK*)



Obr. č. 25 OK elektrárny EST



Obr. č. 24 Kavitační poškození náboje OK EST

Elektrárna Štěchovice II

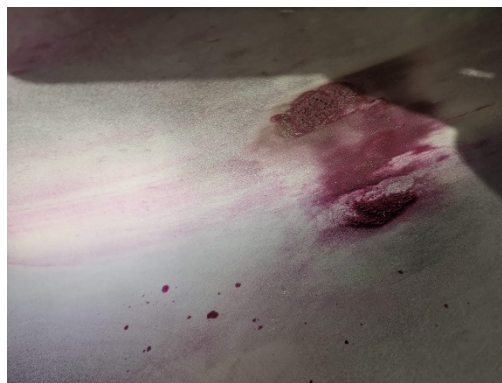
Štěchovice II je vysokotlaká, špičková a přečerpávací elektrárna uvedená do provozu v roce 1996. Je zde jedna reverzní Francisova turbína o instalovaném výkonu 45 MW a pracuje s maximálním spádem 219,5 m. Pracuje jak v turbínovém, tak v čerpadlovém režimu. OK je odlito z korozivzdorného materiálu X3CrNiMo13-4 a dochází u něj ke kavitačnímu poškození. [4] [11]

Stáří OK při plánované výměně:

TG1 1996–2020 → 24 let, (*původní OK, pouze lokální opravy*) [4] [11]



Obr. č. 27 NDT na OK elektrárny EST III



Obr. č. 26 Kavitační poškození OL EST III

Elektrárna Vrané

Vrané nad Vltavou je nízkotlaká, akumulční elektrárna uvedená do provozu v roce 1936. Jsou zde dvě Kaplanovy turbíny, každá o instalovaném výkonu 6,9 MW a pracující s maximálním spádem 12 m. [4] [11]

V náboji OK jsou otočně uloženy oběžné lopatky, náboj i list oběžné lopatky je odlit z korozivzdorného materiálu X3CrNiMo13-4 už od GO v letech 1979 a 1985. [4]

Turbíny prošly GO v letech 2006 a 2009, kola a lopaty zůstaly původní. Na OK nedochází ke kavitačnímu poškození. [4]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

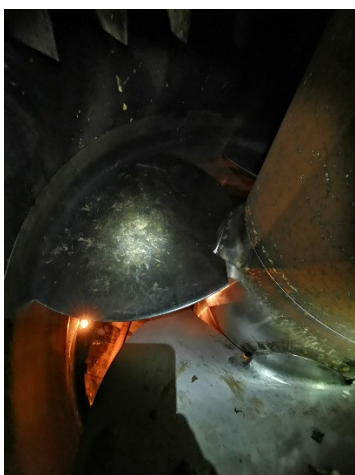
TG1 1985–2009 → 24 let

TG1 2009–2034 → 25 let (*původní OK*)

TG2 1979–2007 → 28 let

TG2 2007–2032 → 25 let (*původní OK*)

[4] [11]



Obr. č. 29 OK elektrárny EVR



Obr. č. 28 Mechanické poškození OL elektrárny EVR

1.3.2. Elektrárny mimo Vltavskou kaskádu

Elektrárna Dalešice

Dalešice je středotlaká, přečerpávací, špičková elektrárna uvedená do provozu v roce 1978. Byla postaveno spolu s JE Dukovany pro zásobování technologické vody. Jsou zde čtyři reverzní Francisovy turbíny, každá o instalovaném výkonu 118 MW a pracující s maximálním spádem 90,7 m. Pracuje jak v turbínovém, tak v čerpadlovém režimu. OK TG (1,2,4) jsou odlita z korozivzdorného materiálu, OL jsou svařované s věncem. [4] [11]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

| | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| TG1 1978–2001 → 23 let, (Nové OK) | TG1 2001–2028 → 27 let |
| TG2 1978–2007 → 29 let, (Nové OK) | TG2 2007–2037 → 30 let |
| TG3 1978–2025 → 47 let | |
| TG4 1978–2004 → 26 let, (Nové OK) | TG4 2004–2031 → 27 let [4] [11] |

Oběžné kolo na soustrojí TG3 je původní od uvedení do provozu v roce 1978, aktuálně je 42 let staré. Výměna je plánovaná na rok 2025, tedy kolo bude v době výměny staré 47 let. OK jsou vyrobená z korozivzdorného materiálu X3CrNiMo13-4. [4]



Obr. č. 31 OK elektrárny EDA



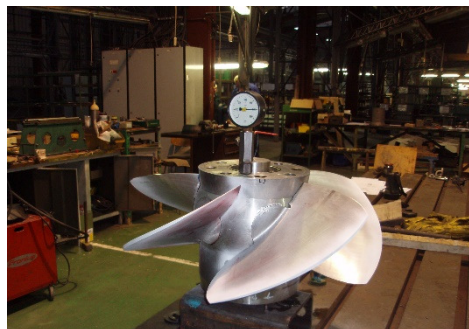
Obr. č. 30 Kavitační poškození OL elektrárny EDA

Elektrárna Mohelno

Mohelno je středotlaká, vyrovnávací elektrárna uvedená do provozu v roce 1997. Je zde jedna Kaplanova turbína o instalovaného výkonu 1,3 MW a pracuje s maximálním spádem 35 m. Dále je zde jedna Francisova turbína o instalovaném výkonu 0,45 MW od roku 1999. OK je odlito z korozivzdorného materiálu X3CrNiMo13-4. [4] [11]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

| |
|---------------------------------|
| TG1 1977–2008 → 31 let |
| TG2 1999–2026 → 27 let [4] [11] |



Obr. č. 32 Tlaková zkouška OK, EMO

Elektrárna Dlouhé stráně

Dlouhé stráně je vysokotlaká, přečerpávací, špičková elektrárna uvedená do provozu v letech 1996 až 1997. Zastává velice významné funkce zejména jako kompenzační zdroj a výkonná rezerva. Jsou zde dvě reverzní Francisovy turbíny, každá o instalovaného výkonu 325 MW a pracující s maximálním spádem 532,7 m. Pracuje jak v turbínovém, tak v čerpadlovém režimu. OK jsou odlita z korozi-vzdorného materiálu X3CrNiMo13-4 ze dvou půlek, které byly následně svařované k sobě. [4] [11]

OK TG1 bylo nahrazeno novým kolem v roce 2012 výrobcem ČKD Blansko engineering, a.s., u tohoto kola se na několika lopatách vyskytlo kavitační poškození. Vzhledem k tomu, že OK bylo nové, přistoupilo se k výzkumu tohoto problému v Centru výzkumu Řež s.r.o. Cílem tohoto měření bylo skenování oběžného kola TG1 s využitím ramenového 3D skeneru pro vyhodnocení případné budoucí změny geometrie a rozvoje vady na povrchu lopat. [4]

Stáří jednotlivých OK při plánované výměně:

TG1 1996–2012 → 16 let (*nové OK*)

TG2 1996–2018 → 22 let (*nové OK*) [4]



Obr. č. 34 NDT na OK elektrárny EDS



Obr. č. 33 Kavitační poškození OL elektrárny EDS

2. Typy vad materiálů vodních turbín

2.1. Kavitace

Zařízení, která nejvíce trpí kavitačním poškozením, jsou vodní turbíny, čerpadla a lodní šrouby, jelikož při změnách provozních parametrů jako jsou průtok, účinnost stroje a spád neblaze ovlivňují podmínky vzniku kavitace. Při kavitaci vznikají dutiny v kapalině vlivem poklesu tlaku. Dutina je na začátku vyplněna vakuem, následně se zaplní plyny z okolní kapaliny. Při vyrovnání podtlaku dojde ke kolapsu a následně implozi dutiny, při které vzniká rázová vlna oddělující částice základního materiálu. Několik studijních prací uvedlo, že zhroucení dutiny provází vysoké teploty a tlak uvnitř těchto dutin. První známky opotřebení se objevují na povrchu materiálu bez destruktivních procesů. Na povrchu se začne objevovat zašednutí, které následně vyústí k povrchovým a podpovrchovým vadám. [3] [5] [22]

Kavitace („z latinského *cavitas – dutina*“) se vyskytuje při pohybu kapaliny vysokou rychlostí a způsobuje převážně rozdíl tlaků, uvnitř kanálu OK bude v některých místech tlak nižší, dojde k rozdílům tlaků. Jelikož voda působí na OL silami v obvodovém směru, proto musí být tlak na lopatku z tlakové strany větší (*tzv. hybný tlak na lopatku*) a ze sací strany menší (*tzv. hybný podtlak na lopatce*). Na konci OL jsou oba tlaky stejné, a proto musí být uvnitř kanálu na sací straně OL nižší tlak. [1] [3] [25]
Nejnižší tlak na OL bude:

$$\frac{p_{2min}}{\gamma} = \frac{p_3}{\gamma} - \Delta h' = H_B - H_S - \eta_s * \frac{C_2^2 - C_4^2}{2g} - \Delta h' \quad (2.1)$$

Tlak může mít dle pravé strany rovnice rozdílnou velikost. Klesne-li tlak uvnitř kapaliny až na napětí par, v našem případě říční vody protékající OK při dané teplotě, tak dojde k porušení souvislosti kapaliny, následně k jejímu odpařování ve formě bublin a vzniká oblast kavitačního poškození. Tyto bublinky páry, jež se tvoří na sací straně OL v místě nižšího tlaku, jsou nesený průtokem vody po sací straně OL k místu s vyšším tlakem. Jakmile tlak překoná napětí par, bublinky se zhroutnou do sebe (implodují) a kapalina velkou rychlostí zaplní prázdné místo a naráží velmi prudce na základní materiál a dochází k jeho poškození. Při tomto jevu vzniká slyšitelný ráz nebo i chvění stroje. [1] [3] [25]

Tento jev se nazývá kavitace a jedná se o nežádoucí jev, který nepříznivě ovlivňuje životnost a provoz zařízení vodních turbín. Pokud k tomuto jevu dochází dlouhodobě a není-li OL zhotovena z velmi odolného materiálu, dojde k „*houbovitému vyhlodání*“ materiálu, následně ke snížení účinnosti vlivem postupné deformace profilu listu OL. [1] [3] [25]

Má-li být zabráněno vzniku kavitace, tak musí být splněna podmínka, že tlak p_{2min} musí být vyšší než povrchové napětí par. Označí se napětí par H_t :

$$\frac{p_{2min}}{\gamma} = H_B - H_S - \eta_s * \frac{C_2^2 - C_4^2}{2g} - \Delta h' > H_t \quad (2.2)$$

Z tohoto výrazu do vyplývá, že sací výška značená H nesmí být vyšší než:

$$H_s \leq H_B - H_t - \eta_s * \frac{C_2^2 - C_4^2}{2g} - \Delta h' \quad (2.3)$$

Označí se biometrický tlak nižší o napětí par $H_b = H_B - H_t$. Výraz $\eta_s * \frac{C_2^2 - C_4^2}{2g} + \Delta h'$ bude tím větší, čím větší bude průtok turbínou. Tlak nasycených par je velice ovlivněn teplotou okolí, s klesající teplotou tento tlak klesá. Kavitační bublina se stává tím větší, čím je menší tlak H_t . Pro stanovený průtok je tento vztah úměrný spádu, takže bude-li součinitel úměrnosti σ , napíše se: $H_b = H_B - H_t$ [1] [3]

$$H_s \leq H_b - \Sigma h \quad (2.4)$$

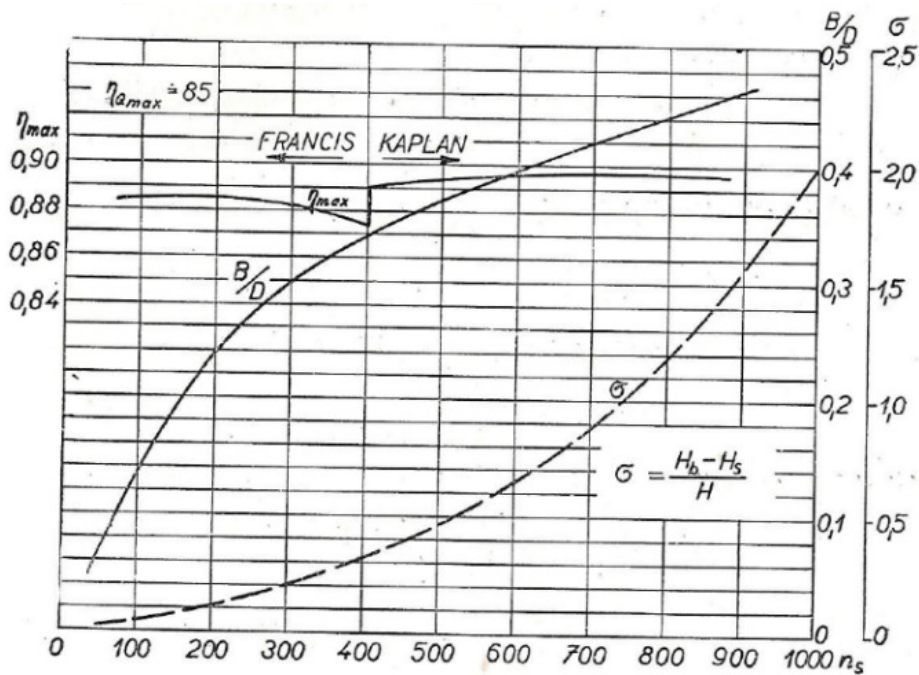
Součinitel σ se nazývá *Thomův kavitační součinitel*. Pro tento součinitel platí, že čím vyšší σ , tím nižší je možnost vzniku kavitace. Součinitel se pro turbínu bude zvětšovat, zatímco sací výška zmenšovat s vyšším průtokem vody turbínou. Nejvyšší hodnota je u Q_{max} , na základě těchto poměrů se musí upravit sací výška. [1] [3]

Podle rovnice výše je sací výška zároveň ovlivněna nadmořskou výškou h (m) budoucí polohy elektrárny. Tato závislost lze vyjádřit vztahem, u kterého se přihlíží k jeho snížení o napětí par. [1]

$$H_b = 10 - \frac{h}{900} \quad (2.5)$$

Součinitel σ se různí podle typu turbíny, určuje se pro maximální průtok podle měrných otáček n_s . – obr. 34. [1]

Diagram znázorňuje n'_1 , Q'_{1max} (úměrnou hltnost), $Q'_{1\eta}$ (příslušné k nejlepší účinnosti), η_{max} a kavitačního součinitele σ na měrných otáčkách n_s . Údaj B/D na diagramu je poměr šířky RK k průměru OK. [1]



Obr. č. 35 Závislost kavitačního součinitele a šířky rozvaděče na n_s [1]

Kontrola kavitačního součinitele Francisovy turbíny

K zjištění kavitačního součinitele se provádějí modelové zkoušky ve zkušebních stanicích. Modelové zkoušky oběžných kol se provádějí při každém velkém zásahu do profilu lopatek, nebo oběžného kola jako celku. Při modelových zkouškách se kontroluje kavitační součinitel při dodržení určitých parametrů. Spád stroje se nahrazuje tlakem v uzavřeném systému a hltnost stroje se nahrazuje počtem otáček oběžného kola. [1] [4]

Zde je postup pro ověření kavitačních vlastností pro kola normální a rychloběžná, kde se díky větším měrným rychlostem volí menší počet kratších lopat. [1]

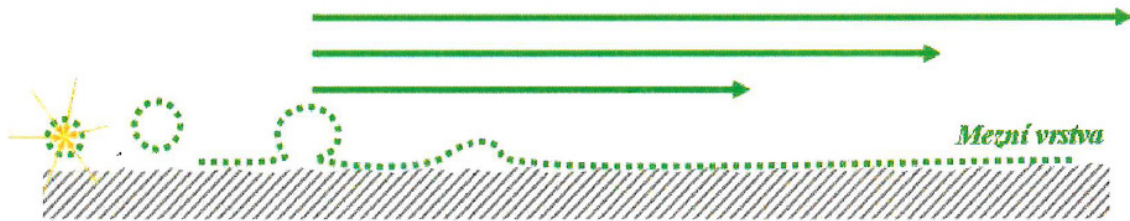
Z obr. 35 je patrné, že u větve v proudových plochách hrozí největší nebezpečí vzniku kavitačního poškození. Zde totiž voda dosáhne nejvyšší hranice obvodové rychlosti a tím i největší relativní rychlosti proudění vody po OL. Kontrola se omezí na řez, kde voda proudí téměř axiálně. [1]



Obr. č. 38 Úprava OL proti kavitačnímu poškození, OK ESL

Kavitace a její vliv na materiál

V předchozí části byl vysvětlen kavitační jev, kdy je strhávána vrstva z povrchu OL, tím se vytvoří bublinky (dutiny), které jsou nejprve vyplněny vakuem a posléze do nich proniká vodní pára a plyny. Během velice krátkého času (řádově mikrosekunda) bublinky implodují, kdy imploze může dosáhnout rychlostí nad 300 m s^{-1} . Takto rychlá imploze v bezprostřední blízkosti OL vyvolává tlakové vlny a rázy, které mohou značně poškozovat povrch lopatek. Fujikawa a Akamatsu při prováděných měřeních zjistili, že hodnota tlaku může dosahovat až 100 MPa při nárazu tlakové vlny na snímač tlaku. [2] [3] [22]



Obr. č. 39. Imploze kavitačních bublinek [2]

Zda tento jev nastane, závisí především na již zmiňovaném Thomově kavitačním součiniteli $\sigma = \frac{H_b - H_s}{H}$. Jeho hodnotu ovlivňuje sací výška, takže platí, že čím vyšší sací výška, tím větší pravděpodobnost kavitačního poškození. Přejít z normálního provozu do provozu umožňujícího kavitaci je pozvolný, neboť bublinky páry odebírají vodě výparné teplo, tím dochází k ochlazení vody a stabilizaci kavitačního jevu. [1]

Při modelových zkouškách je možné sledovat přechod mezi normálním a kavitačním režimem, viz obr. 38 a obr. 39. Kavitační zkušebna je uzpůsobena na postupné navyšování sací výšky. Mezitím se měří účinnost a průtok. Jev je možné sledovat skrze průhledný nástavek komory OK a sací trouby. Stroboskopickým osvětlením se zdánlivě zastaví, popřípadě zpomalí OK a je možné pozorovat jevy na lopatkách. [1]

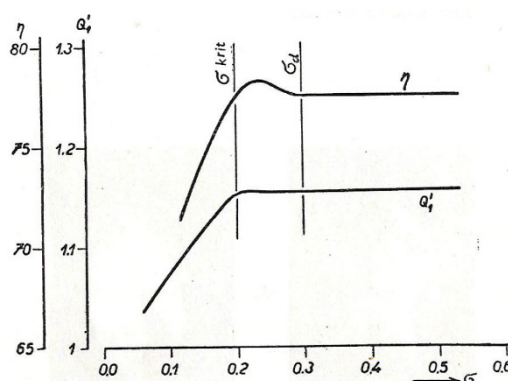


Obr. č. 41 Modelové zkoušky OK TG3 elektrárny Slapy (2018) z výzkumného ústavu ČKD Blansko engineering, a.s.,



Obr. č. 40 Viditelný kavitační jev při modelových zkouškách z výzkumného ústavu vodních strojů ČKD Blansko [1]

Nanesou-li se zjištěné hodnoty účinnosti a průtoků získaných při modelové zkoušce jako funkci kavitačního součinitele, výsledkem je přibližně následující obraz, jako je na obr. 40. Při dostatečně velké hodnotě σ není na OL patrný žádný jev a účinnost spolu s průtokem jsou vzhledem k σ konstantní až po určitou hranici. Při překročení této hranice dochází zpravidla k navýšení účinnosti, potažmo průtoku. Na hranách lopatek už začínají být patrné parní bubliny, je to patrné na obr. 38 propelerové turbíny. [1]



Obr. č. 42 Dolní a kritická kavitační hranice [1]

Pokud se začne ještě více snižovat σ , tak oblast vzniku bublinek se rozšíří až do sací trouby. Účinnost a průtok po dosažení maxima začnou klesat, po určité mezi nastane jejich velmi rychlý pokles. Dochází tomu vlivem miniaturní mezery, způsobené slabou vrstvou par oddělující OL a vodu, tím se zmenšuje tření vznikající na OL a ztráty tím způsobené. Pokud je tvorba par tak intenzivní, že přechází do savky a ruší průtok kanály OL, tak dochází ke stavu *kritické kavitační hranice* σ_{krit} . Začátek kavitace je dolní kavitační mez σ_d . [1] [2]

Požadavky na materiál oběžných kol

Nejvyšší kavitační odolnost má tepelně zpracovaná martenzitická ocel, jelikož má stejnorodou strukturu s vysokou tvrdostí a pevností. Tento materiál nepodléhá rychlému kavitačnímu poškození, což zajišťuje dlouhou inkubační dobu. [3]

Materiál používaný na výrobu současných oběžných kol je magnetovatelná martenzitická korozivzdorná ocel s obsahem 12–14 % Cr s číselným označením 1.4313, nebo dle ČSN CR 10 260 takto: X3CrNiMo13-4+QT1. Odlitek z tohoto materiálu je následně tepelně zpracováván normalizačním žháním na 1040 °C po dobu 5 hodin a ochlazován vzduchem. Po TZ následují NDT kontroly na vady materiálu. V případě opravy vad odlitku navařováním musí proběhnout tepelné zpracování žháním na odstranění pnutí na 590 °C po dobu 6 hodin a ochlazování v peci do 200 °C, následně vzduchem. Odlitek poté podstupuje mechanické zkoušky s těmito požadavky: [1] [4]

Zkoušky tahem

Mez kluzu: $R_{p0,2} = \text{min. } 550 \text{ [MPa]}$
 Pevnost: $R_m = 750\text{--}900 \text{ [MPa]}$
 Tažnost: $A = \text{min. } 16 \text{ [%]}$
 Kontrakce: $Z = \text{min. } 40 \text{ [%]}$

Zkoušky rázem v ohybu

KCV při $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ min 70 J/cm^2
 KCV při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ min 60 J/cm^2
 KCU3 při $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ min 100 J/cm^2
 KCU3 při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ min 90 J/cm^2

Zkouška tvrdosti HBW: 220–290

V případě, že nejsou splněny požadované parametry, odlitek musí podstoupit TZ zušlechťováním a popouštěním podle aktuálního nedostatku v mechanických zkouškách. [4]

Možnosti potlačení kavitace

Nejzásadnější prevencí proti kavitačnímu poškození je dobrý konstrukční návrh geometrie oběžného kola, aby nedocházelo k poklesům tlaků. Vždy je zásadní dodržovat přeepsané parametry a provozní pásma od výrobce zařízení. [2] [4]

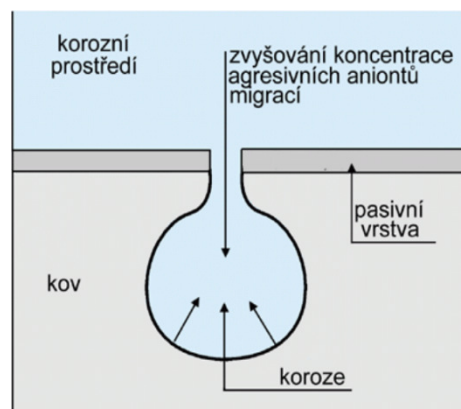
V případě, že se nelze výskytu kavitace vyhnout, je třeba dodržet následující:

- I. Je vhodné díly, které budou kavitačně poškozovány, konstruovat tak, aby byly relativně lehce vyměnitelné.
- II. V případě nemožnosti výměny musí být zajištěna dobrá svařitelnost pro následné opravy.
- III. Při nižší intenzitě kavitace stačí použít materiál, který odolává kavitačnímu poškození. [2] [4]

2.2. Druhy koroze

Bodová, důlková koroze (pitting corrosion)

Jedná se o místní napadení jinak korozivzdorného materiálu. Následkem této koroze jsou bodové důlky v základním materiálu, které mají na povrchu úzké hrdlo, pod povrchem může být poškození rozsáhlejší. Místním porušením pasivační vrstvy, které se podobá štěrbinové korozi, dochází k bodovému korozivnímu napadení. [28] [29]



Obr. č. 43 Schéma vzniku důlkové koroze [29]

Ke vzniku důlkové koroze musí být zajištěna dostatečná oxidační schopnost prostředí a nežádoucích iontů chloridů. Následkem jsou dutiny, které vznikají agresivním napadením korozivzdorných ocelí. [28] [29]

Mezikrystalová koroze

K tomuto korozivnímu napadení dochází, když u korozivzdorných ocelí není dodržen nebo je snížen správný obsah legujících prvků Cr alespoň na 12 %. Místa s nižším obsahem Cr, které mohou vzniknout při tepelném ovlivnění, např. u svařování, korodují jako první. Mezi jednotlivými zrný dojde ke ztrátě soudržnosti a ztrátě

mechanické pevnosti. Karbidy a místa s nižším obsahem Cr vzniklé při tepelném ovlivnění lze vhodným tepelným zpracováním opět odstranit. [28] [29]

Praskání vyvolané prostředím

Vzniká při spojení dvou různých jevů, a to tahového namáhání a korozního prostředí. Může vznikat při zaneseném pnutí do materiálu nebo při stálém (statickém) zatížení. Trhliny vznikají v místě vrubu materiálu nebo v místě narušení ochranné pasivační vrstvy. Při cyklickém namáhání, jako například u vodních turbín, kdy může dojít k rozkmitání vlivem proudění vody, vznikne tzv. korozní únava materiálu. [28] [29]

Elektro-koroze

Nejčastější výskyt je ve vodních prostředích, v elektrolytech, potažmo v půdách. Předpokladem pro vznik koroze je vytvoření galvanického článku. Jako anoda se chová základní materiál (korodující kov), který poskytuje elektrony. Katoda je kov, který způsobuje korozi, katoda přijímá elektrony z anody. Vzájemná interakce zabraňuje hromadění elektrických nábojů. Tuto reakci lze nazvat jako zachování elektro neutrality. [30]

Kov (Me) v kapalném prostředí přechází ve formě iontů do roztoku tzv. polarizační reakce:



Výsledkem je vznik tzv. elektrické dvojvrstvy a ustavení rovnovážného elektrodového potenciálu – termodynamická rovnováha. Bez spotřeby vzniklých iontů je nastolena rovnováha s roztokem a kov nebude korodovat. Příčinou koroze je odčerpání elektronů kovu a redukce složky roztoku – tzv. depolarizační reakce. [30]

Vznik korozních produktů závisí na několika faktorech:

- použití základního materiálu,
- prostředí, ve kterém se koroze odehrává,
- teplota prostředí. [30]

2.3. Eroze u vodních turbín

Erozivní poškození vodních turbín může nastat v případě, kdy se v řekách, popřípadě nádržích, usazuje velké množství sedimentů tvořeného převážně křemenným pískem. K hromadění těchto sedimentů nastává například při povodních. [6]

Pokud sedimenty vnikají do přiváděcího systému vodních turbín, tak může docházet k jejich opotřebení. Poškozují zejména OL Kaplanových a Francisových turbín, trysky a jehly Peltonových turbín, popřípadě čerpadla chladicí vody, labyrinty nebo těsnění kulových uzávěrů. [6]

Vlivem opotřebení jednotlivých dílů dochází ke snížení účinnosti turbín. U elektráren ČEZ takový problém nevzniká, ale v častých záplavových oblastech během monzunu mohou nastat velké problémy zejména u Peltonových turbín, kde voda skrze dýzu proudí vysokou rychlostí na lopatky oběžného kola. Hlavní důvod vznikající eroze je velké množství sedimentů. Rychlost vznikající eroze $3,4 \text{ mm.rok}^{-1}$ způsobí u jehlového uzávěru snížení účinnosti o 1,21 %. [6]

Rozsah erozivního poškození se může omezit několika způsoby: snížením rychlosti těchto částic, potažmo omezením jejich velikosti a koncentrace; nanesením vhodné ochranné vrstvy vysokorychlostním nástřikem plamenem HVOF „high velocity oxygen fuel“ na bázi tvrdých karbidů. Ocel s nástřikem HVOF WC-10 odolává opotřebení lépe než plazmově nitridované oceli. [6]

3. Metody NDT na diagnostiku vad

Defektoskopie zkráceně NDT (*Nondestructive Testing*) je závěrečný proces výroby, který má za úkol bez poškození odhalit vady na povrchu nebo uvnitř výrobku. Pokud se prokáže pomocí NDT nepřijatelná vada/defekt, poté se výrobek musí opravit nebo vyzmetkovat. [7] [12]

NDT se rozděluje podle umístění na:

- vady povrchové.
- vady vnitřní,

nebo podle jejich charakteru na:

- vady objemové (jsou orientované ve všech směrech stejně – bublina, pór...)
 - vady plošné (jsou orientované v jednom směru – trhlina, zdvojenina...).
- [7] [12]

Nejčastěji používané metody v defektoskopii viz. Tabulka 1.

Tabulka 1 Nejčastěji používané metody v defektoskopii [7]

| Symbol | Název metody | Schopnost detekovat vady | | | | Vhodnost pro danou technologii | | | | | |
|--------|---|---|---------|----------|--------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | | Povrchové | Vnitřní | Objemové | Plošné | Svary | Odlitky | Výkovky | Obrobky | Vývalky | Koroze |
| VT | Vizuální kontrola (Visual Testing) | ● | ... | ● | ● | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| PT | Kapilární metoda ¹⁾ (Penetrant Testing) | ● | ... | ● | ● | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | -- | -- |
| MT | Magnetická metoda prášková ²⁾ (Magnetic Particle Testing) | ● | ○ | ● | ● | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | -- | -- |
| RT | Radiografická metoda (Radiographic Testing) | ⊙ | ● | ● | ⊙ | ✓ | ✓ | -- | -- | -- | ✓ |
| UT | Ultrazvuková metoda (Ultrasonic Testing) | ⊙ | ● | ● | ● | ✓ | ✓ | ✓ | -- | ✓ | -- |
| ET | Metoda vířivých proudů ³⁾ (Eddy Current Testing) | ● | ○ | ● | ● | ✓ | -- | ✓ | ✓ | ✓ | -- |
| LT | Zkoušení netěsností (Leakage Testing) | Metoda je vhodná pro detekci vad, procházejících skrze celou tloušťku stěny (plošné i objemové). Detekován je únik médií z daného prostoru. | | | | | | | | | |

Vhodnost pro detekci: ● = vysoká ⊙ = střední ○ = nízká ... = nulová

¹⁾ Základním požadavkem pro realizaci kontroly je suchý a čistý povrch
²⁾ Metoda je vhodná jen pro feromagnetické materiály
³⁾ Metoda je vhodná jen pro vodivé materiály

Defektoskopie má vypracovaný systém kvalifikací, mezi nejdůležitější patří norma „ČSN EN ISO 9712 Nedestruktivní zkoušení – kvalifikace a certifikace pracovníků NDT“, která platí pro všechny níže zmíněné metody. [7] [14]

3.1. Popis NDT zkoušek

3.1.1. VT – Vizuální metoda

VT je vizuální metoda NDT, která patří mezi nejrozšířenější. Má za úkol odhalovat povrchové vady výrobků, svarů a součástí pouhým okem, popřípadě pomocí specializovaných přístrojů a zařízení. Při této metodě se hledají především tyto vady: zápaly, tvarové odchylky, trhliny, póry, převýšení kořene svarů a stav povrchu. Tato metoda je považována za základní a měla by předcházet jiným NDT. [12] [19]

Při vizuální metodě se musejí dodržovat obecná pravidla, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 13018. [12] [19]

Metoda se dělí na:

I. **Přímé vizuální zkoušení** (*direct visual testing*)

- Je metoda, při níž musí pozorovatel mít nepřerušovaný vizuální kontakt se zkoušeným předmětem. Při metodě je používán zrak pozorovatele, popřípadě pomůcky jako lupa, zrcadlo, endoskop.
- Výhoda této metody je menší pravděpodobnost zkreslení výsledků vnějším vlivem.
- Nevýhoda této metody je větší náročnost na přístup ke zkoušenému dílu. [12] [19]

II. **Nepřímé vizuální zkoušení** (*remote visual testing*)

- Je metoda, při níž pozorovatel nemá vizuální kontakt se zkoušeným předmětem. Používá se fotografie, video technika, roboti. [12] [19]
- Výhoda této metody je, že k výsledkům získaným a zaznamenaným na speciální přístroje se může vyjádřit více kvalifikovaných pracovníků. [12] [19]

Přímé vizuální zkoušení se dále dělí na:

I. **Všeobecná vizuální kontrola**

- Ta umožňuje získat přehled a ucelenou představu o stavu zkoušeného dílu. Jedná se jen o přímou kontrolu, například hledání odchylek tvaru, koroze, případně mechanického poškození. Tuto metodu se doporučuje provádět z větší dálky a intenzita osvětlení by měla být alespoň $E_{\min} = 160 \text{ lx}$. [12] [19]

II. **Místní vizuální kontrola**

- Ta je především k detailní prohlídce zkoušeného povrchu, kde je důležitá intenzita osvětlení $E_{\min} = 350$ až 500 lx , pozorovací úhel min. 30° a vzdálenost od povrchu maximálně 600 mm. [12] [19]

Geometrie pozorování

Úhel pohledu (angle of vision) je úhel mezi zkoušeným (pozorovaným) povrchem a pozorovatelem. Je to tedy úhel odražejících se paprsků do oka pozorovatele. [19] Tento úhel by měl být kolem 90° kolmý na povrch. Minimální úhel by měl být nejméně 30° , jestliže bude úhel menší, tak drobné detaily mohou splynout s povrchem. [19]

Zorný úhel (angle of view) určuje plochu, kterou lze pozorovat na kulové ploše.

Zorné pole (field of view) je „panoramatický pohled získaný s pomocí optického přístroje, který je držen ve fixní pozici“. [19] [21]

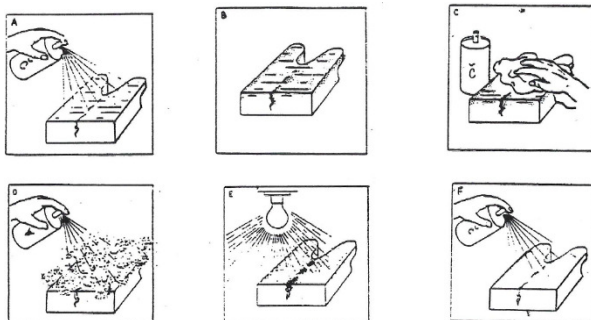
Vzdálenost oka od povrchu je velice důležitá. Čím delší vzdálenost, tím menší zorný úhel a nižší pravděpodobnost odhalení indikací. Z tohoto důvodu je omezena vzdálenost od kontrolované součásti na 600 mm. [19] [20] [21]

3.1.2. PT – Kapilární metoda

PT je kapilární metoda NDT, která má za úkol odhalovat povrchové necelistvosti jako jsou trhliny, praskliny, přeložky, zdvojeniny, zavaleniny, póry. Je to jedna z nejpoužívanějších metod NDT. [7] [8]

Základní postup této metody je patrný z obr. 42

Po důkladném předčištění a osušení povrchu se aplikuje penetrant na výrobek. Penetrační čas je dle zvoleného postupu 5–60 min. Po uplynutí penetračního času se odebere přebytečný penetrant z výrobku. Aplikuje se vývojka po dobu vyvíjecího času 10–30 min. Následuje inspekce, tj. hledání a nalezení indikací na výrobku. Po ukončení inspekce se výrobek očistí od penetrantu a vývojky a postupuje na další operaci. [7] [8]



Obr. č. 44 Základní postup PT metody [7]

Při kapilární metodě se musejí dodržovat obecná pravidla, která jsou uvedena v normách ČSN EN ISO 3452-1 a ČSN EN ISO 3452-2, zde jsou uvedeny pouze elementární zásady. [7]

Prostředky na tuto metodu tvoří zkušební systém a rozdělují se takto:

- penetrant (*fluorescenční, barevný kontrastní a duální*)
- prostředek na odstranění přebytku penetrantu (*voda, lipofilní emulgátor, rozpouštědlo, hydrofilní emulgátor, voda a rozpouštědlo*)
- vývojka (*suchá, vodní roztok, vodní suspenze, na bázi rozpouštědla, pro speciální použití*). [7] [8] [16]

Tabulka 2 Výběr a klasifikace zkušebních prostředků dle EN ISO 3452-1 [7]

| Penetrant | | Prostředek k odstranění přebytku penetrantu | | Vývojka | |
|-----------|--|---|--|---------|---|
| Typ | Označení | Metoda | Označení | Forma | Označení |
| I | Fluorescenční penetrant | A | Vodou smytlý | a | Suchý prášek |
| II | Barevný kontrastní penetrant | B | Postemulgační, lipofilní | b | Vodný roztok |
| III | Penetrant dvouúčelový (fluorescenční barevný kontrastní penetrant) | C | Odstranitelný rozpouštědlem ^{a)} : – Třída 1, halogenový – Třída 2, nehalogenový – Třída 3, speciální aplikace | c | Vodná suspenze |
| | | D | Postemulgační, hydrofilní | d | Na bázi rozpouštědla (bezvodá pro typ I) |
| | | E | Odstranitelný vodou a rozpouštědlem | e | Na bázi rozpouštědla (bezvodá pro typ II a III) |
| | | | | f | Speciální aplikace |

Ve specifických případech je nezbytné použít prostředků pro kapilární zkoušku v souladu se zvláštními požadavky na hořlavost, obsah síry, halogenů a sodíku a dalších kontaminantů. Viz ISO 3452-2.

^{a)} Třída metody C není součástí označení.

Fluorescenční penetrant – přeměňuje neviditelné UV záření na viditelné žlutozelené světlo s velkou energií. U tohoto penetrantu se využívá UV-A záření, tzv. *černé světlo* o vlnové délce 320–380 nm. Při vyhodnocování nesmí mít viditelné světlo více než 100 lx. [7] [8]

Barevný kontrastní penetrant – má výraznou červenou barvu, která má na bílém pozadí dobrý kontrast. Inspekce probíhá pod viditelným bílým světlem s minimální intenzitou 350 lx. [7] [8]

Penetrační čas – pohybuje se mezi 5 až 60 min a závisí na:

- materiálu zkoušeného dílu
- typu výrobku (*svařenec, odlitek, výkovek...*)
- druhu zjišťovaných vad (*necelistvosti*)
- typu penetrantu
- teplotě okolí (10–50 °C) [7] [8]

Vyvíjecí čas – má být v rozmezí 10 až 30 min

Vyvíjecí čas začíná:

- bezprostředně po aplikaci pro suchou vývojku, nebo
- bezprostředně po osušení pro mokrou vývojku. [7] [8]

3.1.3. MT – magnetická metoda prášková

MT je metoda NDT, která má za úkol odhalovat povrchové a těsně podpovrchové vady výrobků, svarů ve feromagnetických materiálech. Metoda je založena na principu, kdy siločáry magnetického pole procházejí zkoušeným předmětem a jsou vyrušovány diskontinuitou materiálu, tím dojde k odklonění siločar od jejich pravidelné cesty. Takto vznikne rozptylový magnetický tok, který následně přitahuje feromagnetické částičky obsažené ve zkušebních prostředcích a hromadí se v místě diskontinuity.[26]

Tato metoda je náročná na přístroje potřebné k provedení zkoušky, avšak zobrazení indikací je kvalitně zobrazené v reálném čase. Tato metoda se může provádět jen na feromagnetických materiálech. Citlivost je velice závislá na orientaci a tvaru indikace vůči magnetickému toku. [26]

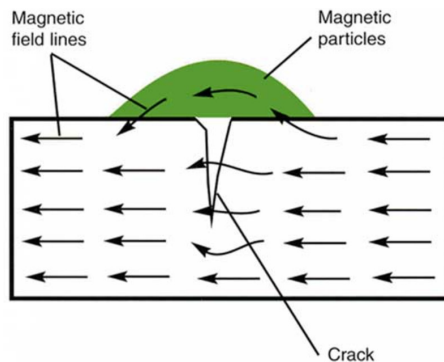
Při magnetické metodě práškové se musejí dodržovat obecná pravidla, které jsou uvedena v normách ČSN EN ISO 9934-1 a ČSN EN ISO 9934-2, zde jsou uvedeny pouze elementární zásady. [18] [26]

Základní postup této metody:

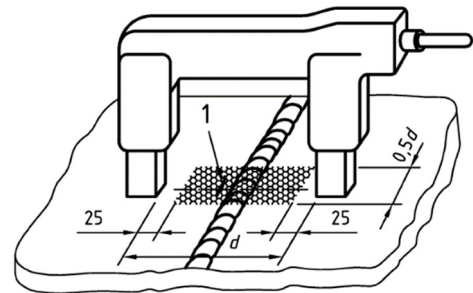
Zkoušený povrch musí být zbaven nečistot, okují rzi, mastnoty atp. Vlivem vhodného zmagnetování feromagnetického materiálu dojde k magnetickému nasycení. Případná vada v materiálu má jiné magnetické vlastnosti, většinou bývá nemagnetická (*vzduch v trhlině, struska, plyn v póru*). V místě vady dochází k deformaci magnetického pole, jeho siločáry vystupují nad povrch – zobrazeno na obr. 44. Tím vzniká tzv. rozptylový magnetický tok, který je nositelem informace o změně magnetických vlastností. Na povrch materiálu se nanáší jemný feromagnetický prášek, jenž se magneticky přichytí na povrch, avšak pouze v místě rozptylového toku. Prášek na povrchu vytváří indikaci zobrazující obrys rozptylového toku způsobeného vadou. [9] [26]

Pro vyhodnocení se musejí dodržet podmínky uvedené v ISO 3059, je to zejména dobrý kontrast mezi zkušebním povrchem a zkoušeným povrchem. Dále zkoušení musí

být prováděno UV-A zářením, tzv. *černým světlem* o vlnové délce 365 ± 5 nm. Při vyhodnocování nesmí mít viditelné světlo více než 100 lx. [9] [26]



Obr. č. 46 Vystupování h siločar nad povrch materiálu [26]



Obr. č. 45 Přenosný elektromagnet [26]

Na VE se nejčastěji používá přenosný elektromagnet (jho) – obr. 3., vzhledem k méně dostupným prostorům pod OK. [4]

Ruční magnet (jho) se skládá z jádra ve tvaru U, na němž jsou navinuty jedna nebo dvě cívky napájené ze sítě 230 V/50 Hz. Ruční magnety nezanechávají na zkoušených součástech opaly v místě magnetování. Pólové nástavce elektromagnetu (jha) jsou připojeny na střídavý proud a přikládají se na povrch součásti. Takto zkoušená oblast nesmí být větší než vepsaná kružnice mezi těmito pólovými nástavci. [10] [26]

3.1.4. UT – Ultrazvuková metoda

UT je metoda NDT, která má za úkol odhalovat vnitřní vady zejména tvářených polotovarů (*plechy, výkovky, tyče*), dále svarů, odlitků, ale i plastů a kompozitů, to vše i ve veliké hloubce pod povrchem. Má největší dosah ze všech NDT. [12] [13]

Při ultrazvukové metodě, pokud není stanoveno jinak např. výrobní normou, specifikací výrobku či smlouvou, tak se musejí dodržovat obecná pravidla, která jsou uvedena v normě ČSN EN 16810 *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Obecné zásady*. [12] [13]

Princip metody je založený na šíření ultrazvukových vln zkoušeným předmětem a kontrolování prošlých vln nebo odražených vln od nehomogenit. Ultrazvukové sondy slouží jako vysílač a přijímač. Měření lze provádět ručně, poloautomatizovaně nebo automatizovaně. Vzniklá akustická vazba v materiálu může být kontaktní, mezerová nebo imerzní. [12] [13]

Druhy vlnění a šíření ultrazvukového svazku

Vlny podélné a příčné jsou nejpoužívanější, jelikož se mohou šířit kolmo nebo pod určitým úhlem k povrchu. Použití jednotlivých vln a jejich směr šíření závisí na účelu zkoušení. [13] [15]

a) Průchodová technika

Pracuje na principu měření poklesu signálu ultrazvukových vln po průchodu zkoušeným materiálem. Detailněji je tato metoda popsána v ISO 16823. Pro měření se může použít:

- signál koncového echa,
- jiný signál přímo prošlý nebo odražený od povrchu. [13] [15]



b) Impulzová odrazová technika

Využívá odražený, popřípadě rozptýlený signál od rozhraní ve zkoušeném materiálu. Výstup je charakterizován amplitudou a vzdálenost mezi reflektorem a sondou udává její poloha na časové základně. Poloha reflektoru je určena dobou průchodu, směrem UT svazku a polohou sondy. [13] [15]

Výběr sond

Volí se podle zákazníka, popřípadě podle příslušných norem. Musejí splňovat EN 12668-2. Výběr je závislý na:

- tvaru a tloušťce materiálu, kvalitě povrchu součásti,
- metalurgických vlastnostech,
- orientaci diagnostikovaných vad. [13] [15]

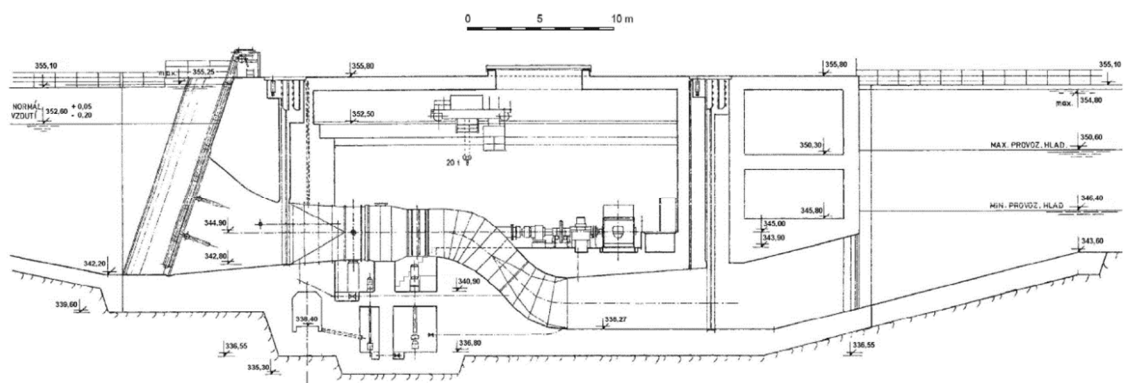
4. Praktická část

Praktická část bakalářské práce se zabývá diagnostikou a následnou opravou oběžného kola TG1 z elektrárny Kořensko. Oběžné kolo je typ 4 KPK 10 a je pravotočivé při pohledu po směru toku vody. Jak již bylo zmíněno, tak turbína je situována horizontálně ve směru toku vody.

Spád $H_{\max} = 6,2 \text{ m}$
Průtok $Q_{\max} = 40 \text{ m}^3/\text{sec}$
Otáčky $n_j = 130 \text{ ot/min}$
Otáčky $n_p = 385 \text{ ot/min}$
Výkon $P_{\max} = 2000 \text{ kW}$



Obr. č. 47 Demontáž turbíny TG1



Obr. č. 48 Situační náčrtek elektrárny EKO

Elektrárna je v provozu 29 let a za tu dobu absolvovala několik středních oprav. Poslední z nich proběhla v roce 2018, kdy došlo k havárii radiálně-axiálního ložiska turbíny. Kvůli této havárii došlo ke kontaktu mezi komorou oběžného kola a lopatkami oběžného kola. To mělo za následek mechanické poškození všech OL a výrazné deformaci listu OL č. 2.

Na začátku roku 2021 proběhl nález na OK po dvouletém provozu od opravy. Probíhá běžná kontrola a údržba stroje, jako výměna těsnění, provozních kapalin, údržba zařízení, které nelze provádět při najetém soustrojí.

Při kontrole oběžného kola – obr. 47 – bylo nalezeno nezvyklé kavitační poškození na náboji oběžného kola a na OL č.2.

4.1. Provedení vizuální zkoušky VT

Jako první byla provedena vizuální kontrola dostupných částí obtékaného profilu oběžného kola, včetně oblasti přechodů výstupů OL do náboje OK.

Zaměřuje se především na:

- mechanické poškození vzniklé splavím, které může proplavat česlemi,



- kavitační poškození, které vzniká při provozování mimo provozní pásmo stroje nebo při nestandardních stavech,
- pittingy (důlková koroze).

Specifikace zkoušky nám udává norma ČSN EN 13018. Provede se metodou přímou, hodnocení bez trhlin a prasklin.

Jedná se o očištěný základní materiál s broušeným povrchem.

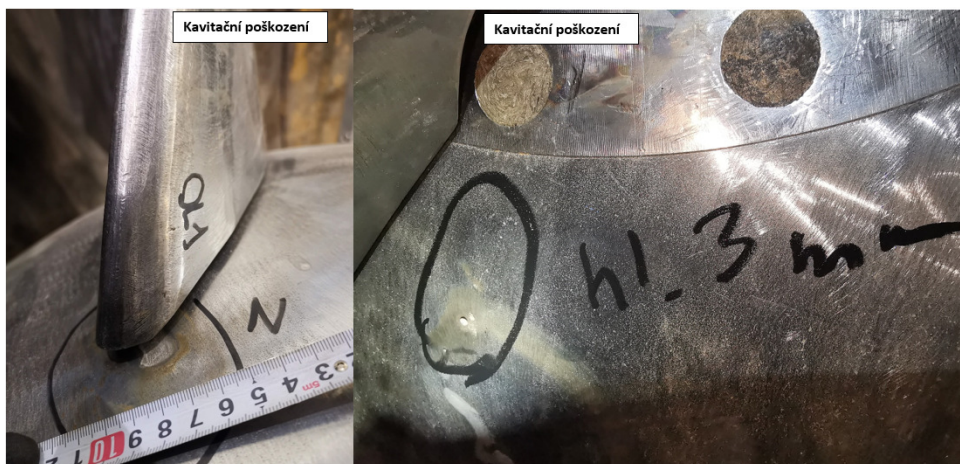
Použité přístroje:

- svinovací metr,
- ruční svítilna,
- luxmetr,
- posuvné měřítko.

Náboj oběžného kola

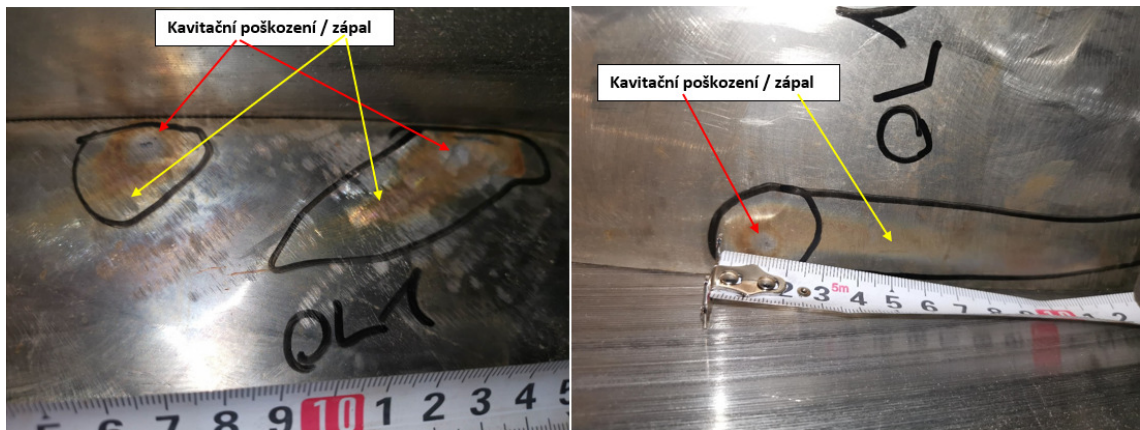


Obr. č. 49 Kavítace na náboji OK 1. část



Obr. č. 50 Kavítace na náboji OK 2. část

Oběžní lopatka č.1



Obr. č. 51 Kavitační poškození na hraně OL č. 1 u komory OK

Oběžní lopatka č.2



Obr. č. 52 Celkový pohled na OL č. 2 / Kavitační poškození na tlakové straně OL



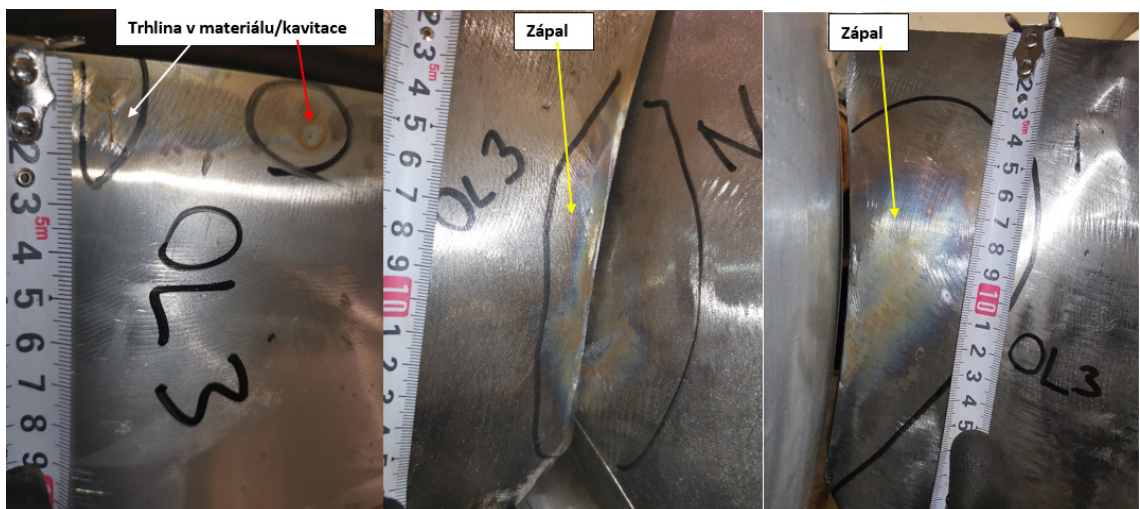
Obr. č. 53 Kavitační poškození na OL č. 2



Oběžní lopatka č.3



Obr. č. 54 OL č. 3. Trhliny v materiálu / kavítace

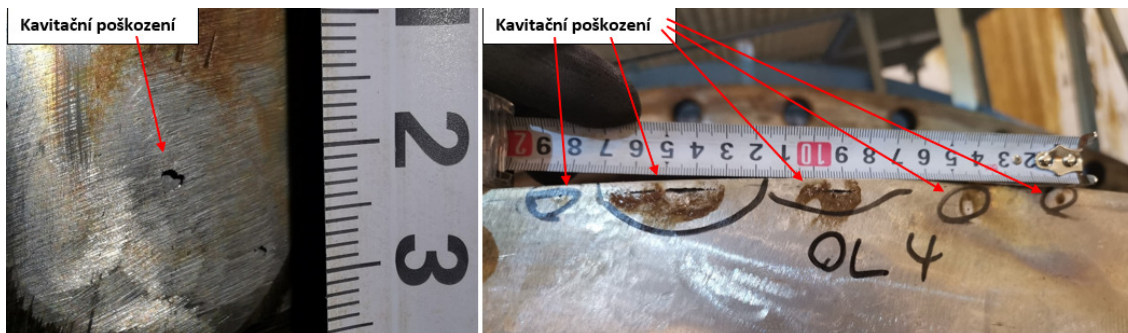


Obr. č. 55 OL č. 3. Trhliny v materiálu / zápal

Oběžní lopatka č.4



Obr. č. 56 OL č. 4. Zápal/pittingy/ mechanické poškození



Obr. č. 57 OL č. 4. Kavitační poškození

Není zde uveden celý rozsah vizuální kontroly, jelikož je velmi obsáhlý, zde jsou uvedeny nejzávažnější nálezy z každé části OK.

Na náboji oběžného kola byly nalezeny kavitační poškození zejména v místech s překrytím oběžných lopatek – obr. 48 a obr. 49. Maximální naměřená hloubka pomocí posuvného měřítka 4 mm.

Na OL č. 1 byla nalezena kavitační poškození s rozsáhlými zápaly u hrany mezi OL a komorou – obr. 50.

OL č. 2 je opravovaná OL z roku 2018, v místě opravy byly nalezeny rozsáhlé zápaly 350x150 mm – obr. 51, v místě je patrné značné narušení základního materiálu.

Na OL č. 3 byly nalezeny celkem čtyři trhliny, jedna na hraně u komory OK, další tři jsou na výstupní hraně OL – obr. 53 a 54. Drobná kavitační poškození a zápaly.

Na OL 4 bylo nalezeno mechanické poškození a pittingy u hrany OL – obr. 55. Rozsáhlý zápal u náboje OK. Na hraně OL je proveden návar, mezi návarem a základním materiálem dochází k vymílání materiálu – obr. 56.

OK nevyhovuje kritériu bez trhlin a prasklin, lineární vady je třeba opravit, začínající kavitaci na náboji a OL se musí vyvařit a přeleštit do původního tvaru.

4.2. Provedení zkoušky magnetickou práškovou metodou MT

Zkoušeným předmětem je oběžné kolo s číslem výkresu 0 VTU 8048–137 a zkoušená oblast je tlaková a sací strana OL. Materiál zkoušené oblasti je X3CrNiMo13-1, jedná se o korozivzdornou martenzitickou ocel, která je magnetická, tím pádem lze provést zkoušku MT.

Specifikace zkoušky nám udává norma ČSN EN ISO 9934-1 a hodnotí se dle CCH 70-3; MT 70-3 lineární indikace jsou nepřijatelné. Jedná se o očištěný základní materiál s broušeným povrchem.

Použité přístroje:



Obr. č. 59 UV lampa Triled 365 [26]



Obr. č. 60 PTS Mag 165 [26]



Obr. č. 58 fluorescenční suspenze [26]

Dále se používá pro ověření funkčnosti Bertholdova měřka, UV metru, luxmetru a měřič magnetického pole.

Na začátku měření je nutné ověřit dle normy ČSN EN ISO 9934-3 tyto parametry: Intenzita UV-A záření ve vzdálenosti 400 mm od zdroje, musí být $\geq 1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

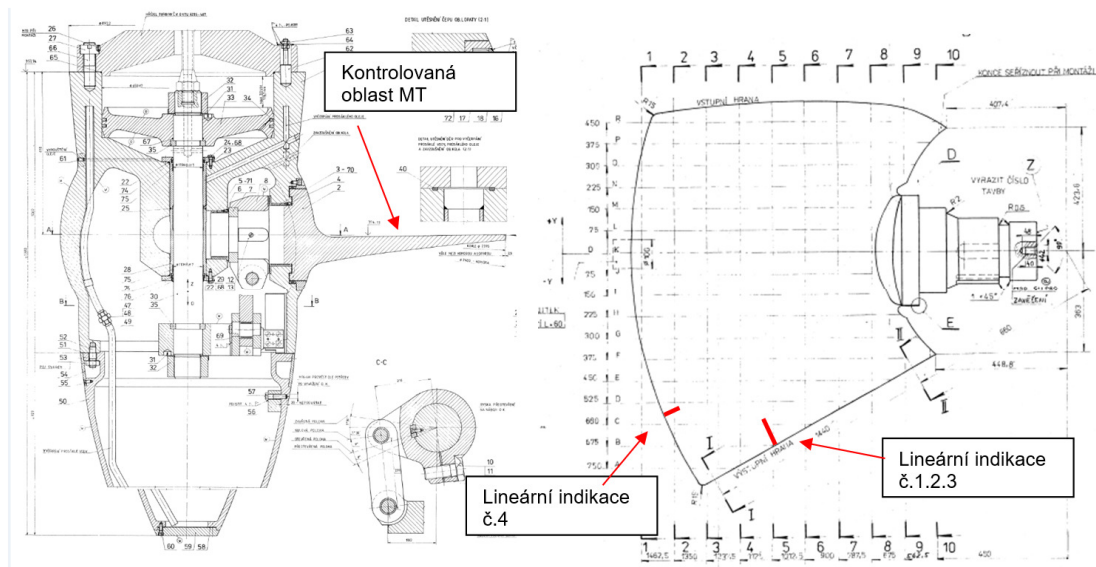
- Naměřená hodnota UV metrem $2650 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Intenzita osvětlení ve vzdálenosti 400 mm od zdroje, musí být ≤ 20 luxů.

- Naměřená hodnota luxmetrem 6 luxů.

Intenzita tangenciálního magnetického pole $\geq 2\text{kA}/\text{m}$.

- Naměřená hodnota měřičem magnetického pole $4,4 \text{ kA}/\text{m}$.

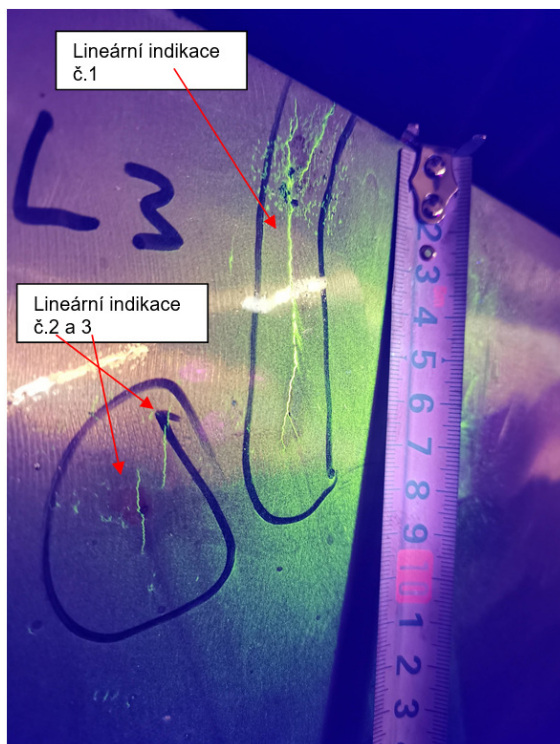


Obr. č. 61 Kontrolovaná oblast na OK

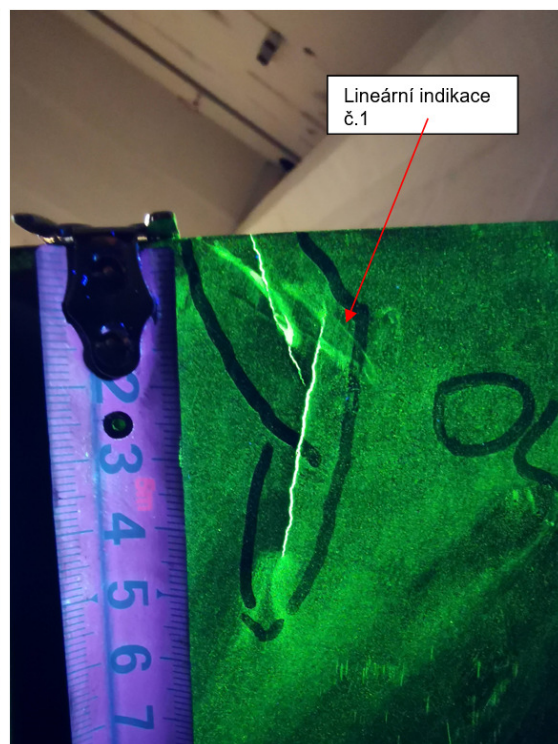
Oběžné lopatky č. 1, 2 a 4 jsou bez lineárních indikací. Na oběžné lopatce č. 3 byly nalezeny čtyři lineární indikace o těchto maximálních délkách:

- lineární indikace č. 1 o maximální délce 70 mm
- lineární indikace č. 2 o maximální délce 19 mm
- lineární indikace č. 3 o maximální délce 20 mm
- lineární indikace č. 4 o maximální délce 25 mm

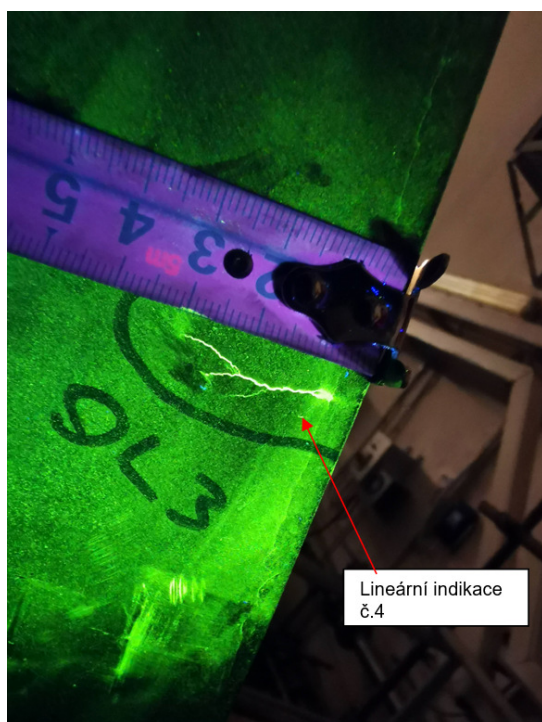
Lineární indikace č. 1 a 4 jsou indikovány na obou stranách oběžné lopatky proti sobě, tzn. trhlinka prostupuje skrz celou tloušťku materiálu 19 mm. Lineární indikace č. 2 a 3 jsou indikovány pouze na sací straně oběžné lopatky. Všechny tyto indikace jsou dle CCH 70-3; MT 70-3 nepřipustné a musí se opravit.



Obr. č. 62 OL č. 3 sací strana, výstupní hraně



Obr. č. 63 OL č. 3 tlaková strana, výstupní hrana



Obr. č. 64 OL č. 3 tlaková strana na okraji OL



Obr. č. 65 OL č. 3 sací strana. na okraji OL

4.3. Provedení zkoušky kapilární metodou PT

Specifikace zkoušky nám udává norma ČSN EN ISO 3452-1 a hodnotí se dle CCH 70-3; PT 70-3 *Lineární indikace nepřipustné.*

Jedná se o očištěný základní materiál, strojně opracovaný s broušeným povrchem.

Penetrační systém „III A e“ byl zvolen dle ČSN EN ISO 3452-2. Jedná se o barevný kontrastní penetrant, vodou smytlný prostředek k odstranění přebytku penetrantu a jako vývojka poslouží suchý prášek.

Použité přístroje, pomůcky:

- speciální čistič Metaflux 70-9801, č. šarže: 03203X
- kontrastér Metaflux 70-9802, č. šarže: 43183X
- vývojka 70-9803, č. šarže: 09201X

Při zkoušení je nutné si ověřit dle normy ČSN EN ISO 3452-1 tyto parametry: Zkušební prostředky, zkoušený povrch a okolní teplota musí být v rozsahu 10–50 °C.

- Teplota na teploměru 22 °C.

Při inspekci musí být intenzita osvětlení na zkoušeném povrchu ≥ 500 luxů.

- Naměřená hodnota luxmetrem 750 luxů.

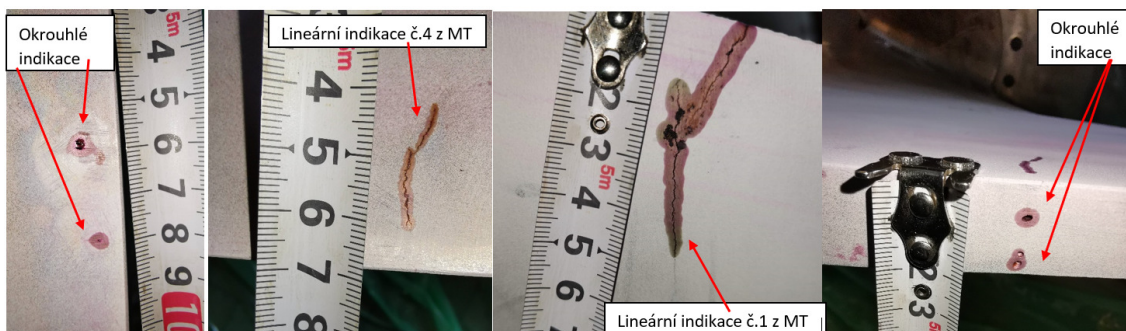
Zkoušená oblast je na hranách OL a v místě nálezu ze zkoušky MT – viz obr. 56. Podklad byl řádně vyčištěn pomocí speciálního čističe a následně byl nanesen kontrastér. Penetrační čas byl zvolen 15 minut.

Po uplynutí penetračního času se pomocí hadru utře přebytek kontrastéru ze zkoušené oblasti. Následně se nanese speciální čistič na hadr, nikdy ne na zkoušený povrch, tím by mohlo dojít k vyplavení kontrastéru z indikací a zkouška by byla neprůkazná. Na takto vyčištěný povrch se může nanést vývojka ze vzdálenosti přibližně 30 centimetrů. Nanese se rovnoměrná vrstva na zkoušený povrch tak, aby byl lehce bílý, ale aby byl stále vidět základní materiál. Vyvíjecí čas byl zvolen 10 minut.

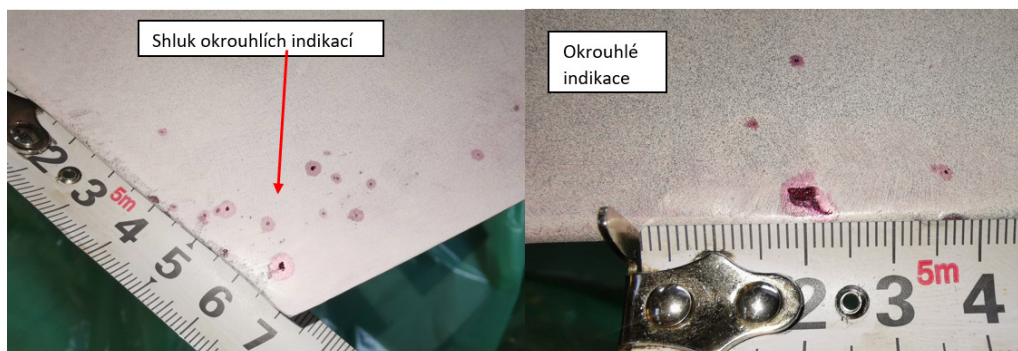
Je důležité sledovat povrch hned po nanesení vývojky, po uplynutí vyvíjecího času se mohou zaznamenat výsledky zkoušky.



Obr. č. 66 Nanesení kontrastéru na OL



Obr. č. 67 OL č.3. Indikace PT



Obr. č. 68 OL č.4. Indikace PT

Kapilární metodou byly potvrzeny nálezy z magnetické polévací zkoušky, penetrant byl nanesen pouze na tlakovou stranu OL a během penetračního času prostoupil na sací stranu OL a tam vytvořil lineární indikace č. 1 a 4.

Kritéria přípustnosti dle CCH 70-4 jsou:

- úroveň pro registraci 1,5 mm
- okrouhlé indikace a > 4 mm
- bez lineárních indikací
- bez spojitých indikací
- celková plocha indikací v rozsahu 40 mm²



Obr. č. 69 OL č.2 Indikace PT

Na všech lopatkách se nacházejí pittingy neboli důlková koroze způsobená kavitačním poškozováním. Většina těchto indikací je z hlediska kritéria přípustnosti stanovená CCH 70-4 třídou 3 nepřipustná a musí se opravit. Lineární a spojitě indikace, které se nacházejí na obr. 57 a obr. 59 jsou nepřipustné.

4.4. Provedení zkoušky ultrazvukovou metodou UT

Specifikace zkoušky udává norma ČSN EN ISO 16810 a hodnotí se dle ČSN EN 12680-2. Jedná se o očištěný základní materiál, strojně opracovaný s broušeným povrchem.

Použité přístroje, pomůcky:

- zařízení: Olympus EPOCH 600
- sondy: AM4R-8x9-60° (4 MHz), AM4R-8x9-70° (4 MHz)
- vazební prostředek: UT VAZEBNÍ GEL VP-G2-1000
- kalibrační měrka: K1

Postup a výsledky:

Ověření rychlosti šíření podélných UZ vln se provedlo tloušťkoměrem a posuvným měřítkem na ploché části u hrany lopatky. Kalibrace časové základny se provedla na měrce K1. Kontrolovaná oblast byla prozvučována z horní i dolní strany lopatky. Rozsah časové základny byl měněn v rozsahu 20 až 100 mm spolu se zesílením 25–50 dB podle hloubky kontroly.



Obr. č. 70 Kontrola OL 3 pomocí metody UT

Na oběžné lopatce č. 3 v místech indikace trhlin zjištěných metodou PT a MT, byly UT metodou potvrzeny tyto indikace o maximálních hloubkách:

- lineární indikace č. 1 o maximální hloubce 24 mm
- lineární indikace č. 2 o maximální hloubce 3,2 mm
- lineární indikace č. 3 o maximální hloubce 7,4 mm
- lineární indikace č. 4 o maximální hloubce 14 mm

Z hlediska hodnocení dle ČSN EN 12680-2 jsou tyto indikace nevyhovující.

4.5. Návrh a průběh opravy trhlin a kavitace

Oprava trhlin

Trhliny budou postupně vybrušeny do ukončení vady, bude ověřen pomocí NDT metod MT, PT. Místo výbrusu bude vhodně upraveno pro svařování, tzn. bude zvolen vhodný úkos a bude dodržena čistota. Základní materiál je z korozi-vzdorného materiálu, takže na očištění použít nerezový kartáč. Oprava bude provedena zavařením pomocí metody TIG podle ISO 4063, kde je číselně označena (141), tedy netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu. Jako přídatný materiál se použije ER2209 o průměru 2,4 mm s obsahem C 0,01% a Cr 22,7 %. Při svařování se použije předehřev 120 °C a teplota mezi etapami (interpass) nepřekročí 200 °C.



Obr. č. 71 MT kontrola po částečném výbrusu indikací na OL 3

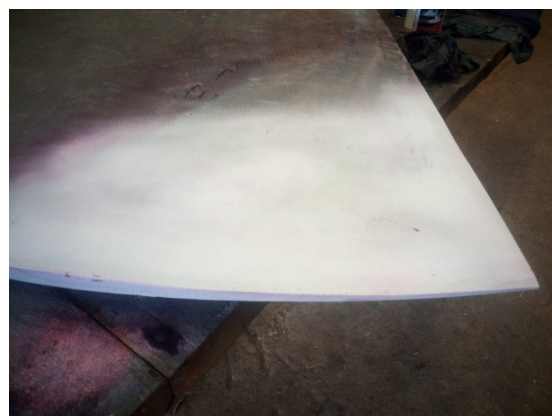


Obr. č. 72 OL č.3 po zavaření trhlin

Postup svařování je následující: přehřát materiál a vyvařit do cca 10 mm síly výbrusu z jedné strany. Poté se vada vybrousí z druhé strany do ukončení vady. Zkontrolovat pomocí PT, veškeré vady ve výbrusu jsou nepřijatelné. Následně se bude svařovat z obou stran, jednotlivé housenky temovat. Po zavaření se povrch oběžné lopatky přešetří do tvaru. Kontrola tvaru se zkouší pomocí předem vytvořených šablon.



Obr. č. 74 Kontrola PT po opravě



Obr. č. 73 Kontrola OL 3 - PT bez indikací

Oprava kavitace

Kavitace se opravuje následovně: kavitací poškozené plochy na začátku opravy nebrousit. Základní materiál se prve přetaví metodou 142 (ISO 4063), tedy obloukovým svařováním wolframovou elektrodou v inertním plynu bez přídavného materiálu. Takto vznikne hladká neporézní plocha, která se následně přebrousí a zkontroluje kapilární metodou PT na vyloučení možných trhlin.

Samotná oprava probíhá stejně jako u zavařování trhlin, tedy pomocí metody TIG 141 (ISO 4063) netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu. Nanese se svár s patřičným převýšením vhodným pro následující zabroušení do roviny.



Obr. č. 75 Oprava kavitace EOR TG2

Po finálním zavaření trhlin a kavitačního poškození se celý povrch oběžné lopatky přešetří do tvaru, tato operace se provádí k odstranění nerovností na lopatce, které by mohly znovu iniciovat vznik kavitačního poškození.



Obr. č. 76 OL č.3 po finálním přebroušení

5. Závěr

Od uvedení elektrárny Kořensko do provozu nebyly na oběžném kole evidovány kavitační ani jiná poškození, níže budou vysvětleny příčiny vzniku kavitačního poškození a výskytu trhlin na OL.

Rozsáhlé nálezy na oběžném kole z elektrárny Kořensko byly způsobeny několika faktory. Elektrárna do roku 2020 nedisponovala ochranným (záložním) systémem „B“, který zafunguje v případě selhání systému „A“. Tzn. když při poruše nezafungoval ovládací elektromagnet na odstavení soustrojí, tak došlo k přezavření oběžného kola a roztočení v opačném směru točení na 150 % otáček. Tento stav byl obsluhou elektrárny do 20 minut odstraněn.

Vlivem prací na dolní hladině fy. Povodí Vltavy v letech 2019-2020 došlo k prohloubení dolní nádrže a tím i k navýšení maximálního spádu. Problém nastal při poklesu dolní hladiny, která kopíruje horní hladinu elektrárny Orlík. Tehdy se turbíny provozovaly mimo povolený spád až o 2 metry. Stroj byl provozován v tomto nežádoucím režimu vlivem selhání mechanického dorazu dolní hladiny zhruba čtyři měsíce. Při provozování mimo povolený spád může nastat u turbíny vlastní frekvence materiálu, která rozkmitá konce OL a tím dochází ke zpevňování povrchu. Pokud se tento stav prodlužuje delší dobu, tak dojde k plastické deformaci.

Vady materiálu vodních turbín mohou vzniknout mnoha způsoby, ať už špatnou konstrukcí, zvolením špatného materiálu, výrobní chybou, tlakovými pulzacemi, nebo hlavně špatným provozním režimem, kdy je stroj provozován mimo provozní pásmo, a s tím spojeným kavitačním poškozením.

Vzhledem k vysokému zatížení elektrické soustavy nestabilními obnovitelnými zdroji musejí vodní elektrárny vzhledem ke své rychlé reakci na změnu výkonu stále častěji provádět výkonovou regulaci. Tato regulace nadměrně zatěžuje mechanismus regulace oběžných kol a s tím spojené špatné provozní režimy.

V případě dodržování předepsaných parametrů od výrobce a eliminací nežádoucích stavů mohou vodní turbíny sloužit bez větších servisních úkonů i desítky let. Názorným příkladem je elektrárna Vrané nad Vltavou, kde je v provozu repasované oběžné kolo z roku 1979 bez zjevných známek poškození.

Bibliografie

- [1] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství: Vysokošk. učebnice pro obor vodní stroje a zařízení: Určeno konstruktérům a provoz. inž. 2., rozš. vyd.* Praha: SNTL, 1962. 676 s. Řada strojírenské literatury.
- [2] STEJSKAL, Pavel. spolek autorů VSE, a.s., *Vodní elektrárny: Určeno zaměstnancům základních kurzů vodních elektráren*, Chomutov 2012
- [3] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976. 376 s. Řada strojírenské literatury.
- [4] ČEZ Pasporty Vodních elektráren, interní dokument, Štěchovice 2019
- [5] Šifner Jan, Samek Jiří, Hudec Martin. *Současné možnosti detekce kavitace metodou akustické emise*, Praha: Dakel, 2020
- [6] SUCHÁNEK, Jan. *Erozivní opotřebení materiálů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. 294 s. ISBN 978-80-01-05532-8.
- [7] Mařánek, Pavel. *PT Metoda kapilární stupeň 1+2*. Praha: Advanced Technology Group s.r.o., 2014. 102 s.
- [8] ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [9] ČSN EN ISO 3059. *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární a magnetickou práškovou metodou – Podmínky prohlížení*. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [10] ČSN EN ISO 9934-1. *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení magnetickou práškovou metodou – Část 1: Obecné zásady*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [11] Skupina ČEZ [online]. ČEZ, a.s., © 2020. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/voda/informace-o-vodní-energetice>
- [12] Weldinspect [online]. Weldinspect s.r.o., 2015. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: https://weldinspect.cz/?page_id=85
- [13] Advanced Technology Group [online]. ATG. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-703>
- [14] ČSN EN ISO 9712. *Nedestruktivní zkoušení – Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT*. Praha: ÚNMZ, 2013
- [15] ČSN EN ISO 16810. *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Obecné zásady*. Praha: ÚNMZ, 2014.

- [16] ČSN EN ISO 3452-2. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 2: Zkoušení kapilárních prostředků*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [17] ČSN EN 13018. *Nedestruktivní zkoušení – Vizuální kontrola – Obecné zásady*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [18] NDT servis [online]. NDT servis s.r.o., © 2005-2020. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <http://www.ndtservis.cz/web/index.php/cz/nedestruktivni-zkouseni/magneticka-metoda-mt>
- [19] Škeřík Michal. a kolektiv autorů ze společnosti ATG s.r.o., *VT Vizuální metoda stupeň I,II*. Praha: Advanced Technology Group s.r.o., 2014. 216 s.
- [20] ČSN EN ISO 1330-10. *Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 10: Termíny používané při vizuální kontrole*. Praha: ČNI, 2003. 28s
- [21] Sayer, G. *ASNT Level III Study Guide Visual and Optical Testing Method. 3rd edition*. USA: ASNT, 2004. 128p. ISBN 1-57117-057-X.
- [22] FRANC, Jean-Pierr; MICHEL, Jean-Marie. *Fundamentals of cavitation*. Boston: Kluwer Academic Publishers, c2004, xxii, 300 p. ISBN 14-020-2232-8.
- [23] ŠKORPIL, Jan. *Obnovitelné zdroje energie*. 2. vyd. přeprac. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-675-4.
- [24] VOBOŘIL, David. *Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR*. O energetice [online]. 2016 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni/>
- [25] BRDIČKA, Miroslav; SAMEK, Ladislav; TARABA, Oldřich. *Kavitace: Diagnostika a technické využití*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 332 s.
- [26] NEUGEBAUER, Josef. *Učební texty pro NDT techniky: Metoda MT2/MS. NDT_MT_SKRIPTAr00*. Praha, 2020.
- [27] ČEZ, O vodní energetice [online], [cit. 2020-01-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/informace-o-vodni-energetice>
- [28] NOVÁK, Pavel. *Druhy koroze kovů*. *Koroze a ochrana materiálu* [online]. 2005, 49(4), 75-82 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF
- [29] BRENNER, Otakar. *Korozivzdorné oceli*. *Občasník Povrcháři*. 2016, č. 2, s. 10-12. Praha: ČVUT v Praze, 2016. ISSN 1802-9833.
- [30] NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů* [online], VŠCHT: 2002 [cit. 2021-01-16] Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>

Seznam tabulek

Tabulka 1 Nejčastěji používané metody v defektoskopii [7] 31

Tabulka 2 Výběr a klasifikace zkušebních prostředků dle EN ISO 3452-1 [7] 33

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. č. 1 Schématické zobrazení vodní elektrárny [2] | 12 |
| Obr. č. 2 Turbína axiální (Kaplanova turbína) [1]..... | 13 |
| Obr. č. 3 Turbína radiální [1]..... | 13 |
| Obr. č. 4. Turbína radioaxiální (Francisova turbína) [1] | 13 |
| Obr. č. 5 Turbína radiální (Deriaz) [1]..... | 14 |
| Obr. č. 6 Turbína tangenciální (Peltonova turbína) [1]..... | 14 |
| Obr. č. 7 Skládání formy pro OK v podniku J. M. Voith [1]..... | 14 |
| Obr. č. 8 Forma z obr. 7 složená [1] | 14 |
| Obr. č. 9 Turbína elektrárny Lasele. H=52m. [1] | 15 |
| Obr. č. 10 OK pro elektrárnu Cimego (Itálie) [1]..... | 15 |
| Obr. č. 11 NDT OK ELI I..... | 16 |
| Obr. č. 12 Odlitek OK elektrárny ELI I..... | 16 |
| Obr. č. 13 OK elektrárny Lipno II | 16 |
| Obr. č. 14 Kavitační poškození u čepu OL..... | 17 |
| Obr. č. 15 OK elektrárna Hněvkovice | 17 |
| Obr. č. 16 Kavitační zápal OK EKO | 17 |
| Obr. č. 17 OK elektrárna EKO | 17 |
| Obr. č. 19 OK elektrárny EOR | 18 |
| Obr. č. 18 .Kavitační poškození OL elektrárny EOR..... | 18 |
| Obr. č. 20 OK elektrárny EKA | 19 |
| Obr. č. 21 Tlaková zkouška OK elektrárny EKA..... | 19 |
| Obr. č. 22 Kavitační poškození OL elektrárny ESL..... | 20 |
| Obr. č. 23 Nové OK elektrárny ESL..... | 20 |
| Obr. č. 24 Kavitační poškození náboje OK EST | 20 |
| Obr. č. 25 OK elektrárny EST | 20 |
| Obr. č. 26 Kavitační poškození OL EST III | 21 |
| Obr. č. 27 NDT na OK elektrárny EST III | 21 |
| Obr. č. 28 Mechanické poškození OL elektrárny EVR | 21 |
| Obr. č. 29 OK elektrárny EVR | 21 |
| Obr. č. 30 Kavitační poškození OL elektrárny EDA..... | 22 |
| Obr. č. 31 OK elektrárny EDA | 22 |



| | |
|--|----|
| Obr. č. 32 Tlaková zkouška OK, EMO..... | 22 |
| Obr. č. 34 NDT na OK elektrárny EDS | 23 |
| Obr. č. 33 Kavitační poškození OL elektrárny EDS..... | 23 |
| Obr. č. 35 Závislost kavitačního součinitele a šířky rozvaděče na ns [1]..... | 25 |
| Obr. č. 36 Rozložení tlaku na sací straně lopatky (Pogrebennyj) [1] | 26 |
| Obr. č. 37 Rychlostní profil napříč kanálu [1]..... | 26 |
| Obr. č. 38 Úprava OL proti kavitačnímu poškození, OK ESL..... | 27 |
| Obr. č. 39. Imploze kavitačních bublinek [2] | 27 |
| Obr. č. 40 Viditelný kavitační jev při modelových zkouškách z výzkumného ústavu vodních strojů ČKD Blansko [1] | 28 |
| Obr. č. 41 Modelové zkoušky OK TG3 elektrárny Slapy (2018) z výzkumného ústavu ČKD Blansko engineering, a.s.,..... | 28 |
| Obr. č. 42 Dolní a kritická kavitační hranice [1] | 28 |
| Obr. č. 43 Schéma vzniku důlkové koroze [29] | 29 |
| Obr. č. 44 Základní postup PT metody[7] | 33 |
| Obr. č. 45 Přenosný elektromagnet [26]..... | 35 |
| Obr. č. 46 Vystupování h siločar nad povrch materiálu[26]..... | 35 |
| Obr. č. 47 Demontáž turbíny TG1 | 37 |
| Obr. č. 48 Situační náčrt elektrárny EKO | 37 |
| Obr. č. 49 Kavítace na náboji OK 1. část | 38 |
| Obr. č. 50 Kavítace na náboji OK 2. část | 38 |
| Obr. č. 51 Kavitační poškození na hraně OL č. 1 u komory OK..... | 39 |
| Obr. č. 52 Celkový pohled na OL č. 2 / Kavitační poškození na tlakové straně OL | 39 |
| Obr. č. 53 Kavitační poškození na OL č. 2..... | 39 |
| Obr. č. 54 OL č. 3. Trhliny v materiálu / kavítace..... | 40 |
| Obr. č. 55 OL č. 3. Trhliny v materiálu / zápaly..... | 40 |
| Obr. č. 56 OL č. 4. Zápal/pittingy/ mechanické poškození | 40 |
| Obr. č. 57 OL č. 4. Kavitační poškození..... | 41 |
| Obr. č. 58 fluorescenční suspenze [26]..... | 41 |
| Obr. č. 59 UV lampa Triled 365 [26] | 41 |
| Obr. č. 60 PTS Mag 165 [26]..... | 41 |
| Obr. č. 61 Kontrolovaná oblast na OK | 42 |



| | |
|--|--|
| Obr. č. 62 OL č. 3 sací strana, výstupní hraně výstupní hrana | Obr. č. 63 OL č. 3 tlaková strana, 43 |
| Obr. č. 64 OL č. 3 tlaková strana na okraji OL okraji OL | Obr. č. 65 OL č. 3 sací strana. na 43 |
| Obr. č. 66 Nanesení kontrastéru na OL | 44 |
| Obr. č. 67 OL č.3. Indikace PT | 44 |
| Obr. č. 68 OL č.4. Indikace PT | 45 |
| Obr. č. 69 OL č.2 Indikace PT | 45 |
| Obr. č. 70 Kontrola OL 3 pomocí metody UT | 46 |
| Obr. č. 71 MT kontrola po částečném výbrusu indikací na OL 3 | 46 |
| Obr. č. 72 OL č.3 po zavaření trhlin | 47 |
| Obr. č. 73 Kontrola OL 3 - PT bez indikací | 47 |
| Obr. č. 74 Kontrola PT po opravě | 47 |
| Obr. č. 75 Oprava kavitace EOR TG2 | 48 |
| Obr. č. 76 OL č.3 po finálním přebroušení | 48 |

