Α

R

т

Č

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



# N<sub>metS</sub> – Schválená metodika: Metodika zkoušek nízkocyklové únavy v prostředí

Konečný uživatel výsledků: **Státní úřad pro jadernou bezpečnost** Senovážné náměstí 9 110 00, Praha 1

**Název projektu:** Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí

Číslo projektu: TITSSUJB039

Řešitel projektu: ÚJV Řež, a. s., Hlavní 130, 250 68, Husinec-Řež

**Doba řešení:** 1.6.2021 – 31.12.2024

Účinnost metodiky: 2024

Interval, ve kterém bude řešitel ověřovat svou schopnost danou metodiku používat: 10 let

Interval, ve kterém bude řešitel ověřovat platnost metodiky: 5 let

**Důvěrnost a dostupnost**: Zpřístupnění informací je možné pouze s písemným souhlasem Konečného uživatele výsledků (SÚJB)



> www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



#### Informace o autorském týmu:

Ing. Petr Kadečka

Ing. Miroslav Žamboch

Ing. Miroslava Ernestová

Ing. Ivana Schnablová

Ing. Miroslav Pošta

Ing. Marek Postler

RNDr. Vladislav Pištora CSc.

Ing. Dalibor Kárník

Bc. Miroslav Pejša

Vladimír Minář

Michal Málek





Program veřejných zakázek v aplikovaném výzkumu a inovacích pro potřeby státní správy BETA2 byl schválen usnesením vlády České republiky č. 278 ze dne 30. 3. 2016 a je zaměřen na podporu aplikovaného výzkumu a inovací pro potřeby orgánů státní správy. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



#### Další informace o projektu:

Projektový rámec: Jaderný průmysl čelí mnoha důležitým výzvám. Mezi ně patří dlouhodobý provoz (LTO) stávajících jaderných elektráren (JE), zajištění otázek bezpečnosti a vývoj nových jaderných zařízení. Maximální bezpečnost je společným cílem v obou scénářích, což vyžaduje odpovídající řízení provozu komponent a inovativní návrhy nových komponent. V tomto smyslu je při řešení otázek bezpečnosti v JE vždy klíčovou otázkou únava materiálů.

Únavové stárnutí materiálů používaných v jaderných elektrárnách je způsobeno přechodovými provozními jevy, které mají za následek deformační a napěťové namáhání části konstrukce.

Do hodnocení vlivu prostředí na únavové poškozování materiálů vstupuje množství faktorů, které jsou často oceňovány empiricky (např. střední napětí, doba výdrže na maximální hodnotě zatížení, nebo drsnost povrchu,) bez odpovídajících obecně uznávaných fyzikálních modelů. V současné době neexistuje ve světě jednotný přístup k ocenění vlivu prostředí na únavu, používané únavové křivky zohledňující vliv prostředí jsou založeny na experimentech realizovaných v průběhu několika desetiletích a na odlišných materiálech, než jsou materiály používané v jaderných elektrárnách VVER.

V současné době neexistuje odpovídající databáze znalostí o únavovém poškozování materiálů reaktorů VVER v provozním prostředí, která by následně mohla být použita pro vypracování postupu hodnocení rozvoje únavy za provozu právě pro tyto materiály.

Rostoucí mezinárodní tlak na prokazování dlouhodobého provozu zvyšování, zvyšování požadavků na zajištění bezpečnosti při dlouhodobém provozu vyžaduje pro dotčené komponenty hodnocení únavy s vlivem prostředí.

Projekt má za cíl vypracovat celkem tři Výsledky projektu:

- Hneleg: Návod na hodnocení (výpočty) únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER s uvažováním vlivu prostředí, včetně zjištěných korekčních faktorů pro rozhodující materiály
- 2) Vsouhrn: Souhrnná zpráva s výsledky projektu včetně databáze výsledků materiálových zkoušek
- 3) Nmet: Metodika zkoušek nízkocyklové únavy v prostředí



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



# Obsah

Se	znam	zkra	tek	6
1	Úvo	od		7
	1.1	Cíle	metodiky	7
	1.2	Pop	vis metodiky, srovnání "novosti postupů", související a použitá literatura	7
	1.3 Uplatnění metodiky			7
2	Exp	perim	entální metodika	8
	2.1	Sou	visející normy	8
	2.2	Pož	adavky na materiál a zkušební vzorky	8
	2.2.	.1	Výroba zkušebních vzorků	8
	2.2.	.2	Výběr zkušebních těles pro jednotlivé fáze experimentálního programu – ra	ndomizace.9
	2.2.	.3	Stav povrchu zkušebních vzorků	9
	2.2. výs	.4 ledno	Zhodnocení skutečné geometrie zkušebních těles vůči požadované geometri é parametry testu	i a vliv na 10
	2.3	Pož	adavky na testovací zařízení	
	2.3.	.1	Požadavky na testovací zařízení	
	2.3.	.2	Stanovení korekčního faktoru deformace	
	2.3.	.3	Stanovení souososti	12
	2.3.	.4	Chemický rám a chemické prostředí zkoušek	12
	2.4	Pos	tup zkoušky	14
	2.5	Pro	tokol o výsledcích zkoušky	14
	2.6	Pož	adavky na dokumentaci stavu povrchu ZT po provedení testu	15
	2.7	Нос	lnocení kvality dat	19
	2.8	Exp	ertní posouzení nevyhovujících testů	22
	2.9	Met	odika výpočtového stanovení korekčního faktoru deformace pomocí MKP	23
	2.9.	.1	Definice kalibračních konstant	23
	2.9.	.2	Významné faktory ovlivňující určení kalibračních konstant	26
	2.9.	.3	Materiálové vlastnosti pro provedení numerických simulací	29
	2.9.4		MKP simulace	
	2.9.	.5	Vyhodnocení výsledků numerických simulací	40
	2.9.	.6	Příklad MKP výpočtu	41
	2.9.	.7	Souhrn kapitoly výpočtového stanovení korekčního faktoru	47



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



3	Závěr	9
4	Literatura	0



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



## Seznam zkratek

ASTM International	(dříve "American Society for Testing and Materials"), mezinárodní společnost pro normalizaci			
CDK	cyklická deformační křivka			
ČSN	chráněné označení Českých technických norem, vydávaných Českou agenturou pro standardizaci			
ISO	"International Organization for Standardization", Mezinárodní organizace pro normalizaci			
КК	kalibrační konstanta (korekční faktor pro řízení deformace pracovní části vzorku pomocí indukčního čidla posuvů)			
МКР	metoda konečných prvků			
Ν	značení počtu cyklů			
NCÚ	nízkocyklová únava			
RFT	referenční těleso pro měření souososti			
RT	pokojová teplota (room temperature)			
SE	sekundární elektrony			
SW	software			
VČP	indukční čidlo posuvu			
ZT	zkušební těleso			



> www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



## 1 Úvod

## 1.1 Cíle metodiky

Cílem metodiky je stanovit postup pro experimentální testování nízkocyklového únavového poškození kovových materiálů zařízení jaderných elektráren za současného působení prostředí, včetně všech návazných operací.

## 1.2 Popis metodiky, srovnání "novosti postupů", související a použitá literatura

Před zahájením projektu existovala metodika pro experimentální testování únavy v prostředí pouze jako interní dokument řešitele projektu. Tato metodika vychází z požadavků norem pro hodnocení únavy, zkušeností získaných z vlastního testování únavového poškození v prostředí a z dobré praxe vytvořené a akceptované v rámci realizace mezinárodních projektů v této oblasti. Seznam souvisejících českých i mezinárodních publikací a norem je uveden v kapitole 2.1. Jednotlivé zdrojové dokumenty jsou odkazovány v textu a souhrnně uvedeny v závěrečné kapitole Literatura, viz kapitola 4.

## 1.3 Uplatnění metodiky

Metodika je určena pro organizace, které mají k dispozici zařízení pro experimentální testování únavy v prostředí a plánují tento typ zkoušek provádět. Její dodržování je nezbytný předpoklad k tomu, aby testování bylo věrohodné a dosažené výsledky bylo možné porovnat mezi jednotlivými experimentálními pracovišti.

Č

Α

R

Т

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



# 2 Experimentální metodika

Všechny níže uvedené požadavky na materiál a zkušební vzorky, experimentální zařízení, postup zkoušky, dokumentaci povrchu a hodnocení kvality dat musejí být dodrženy pro to, aby bylo dosaženo věrohodných výsledků, které lze vzájemně porovnávat.

## 2.1 Související normy

Pro testy nízkocyklové únavy (NCÚ) v prostředí neexistují v České republice speciální normy. Dostupné jsou pouze následující normy pro testy NCÚ na vzduchu se zmínkou o prostředí:

- ČSN 42 0363 ZKOUŠKY ÚNAVY KOVŮ Metodika zkoušení (uvažováno zkoušení pouze při teplotě 20 ± 10 °C, kapitola "Zkouška za koroze" uvádí pouze požadavek na stálost parametrů korozního prostředí a uvedení specifikace prostředí do protokolu) [1],
- ČSN 42 0362 ZKOUŠKY ÚNAVY KOVŮ Základní pojmy a značky,
- ČSN EN ISO 11782-11 Koroze kovů a slitin Zkoušení korozní únavy Část 1: Zkoušky cyklováním do porušení (v AJ, kapitola "Environmental consideration" uvádí pouze požadavek kontroly podmínek prostředí pomocí monitorování faktorů prostředí).

Podle zkušeností z mezinárodních projektů hodnocení NCÚ v prostředí se dále doporučuje používání následujících norem:

- ASTM E606 Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing [2],
- ISO 12106 Metallic materials Fatigue testing Axial-strain-controlled method [3],
- ISO 23788 Metallic materials verification of the alignment of fatigue testing machines
- ASTM E1012 12 Verification of testing frame and specimen alignment under tensile and compressive axial force.

Ze všech výše uvedených norem lze stanovit, jaké požadavky by zařízení pro testy NCÚ v prostředí mělo splňovat pro dosažení platných a reprodukovatelných výsledků. Tyto lze rozdělit na požadavky na materiál a zkušební vzorky, experimentální zařízení, postup zkoušky, protokol o provedené zkoušce a dokumentace stavu povrchu ZT po testu. Jednotlivé požadavky jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

## 2.2 Požadavky na materiál a zkušební vzorky

Materiál zkušebních vzorků musí odpovídat materiálu, pro který se hodnotí vliv prostředí na NCÚ. Týká se to jak základního materiálu, tak všech použitých svarových kovů, případně návarů. Vždy je nutné ověřit, že chemické složení a základní mechanické vlastnosti materiálu použitého pro výrobu vzorků odpovídají normovaným hodnotám.

## 2.2.1 Výroba zkušebních vzorků

Orientaci materiálu pro výrobu vzorků je doporučeno volit tak, aby se trhlina šířila ve stejné rovině a směru, ve které se předpokládá šíření trhliny v reálně komponentě.

Velikost zkušebního tělesa (ZT) souvisí s použitým zařízením a silami, které je schopné vyvodit. Tato metodika doporučuje provádění testů od středního po horní rozsah deformace nebo síly daného zařízení. Limitní parametry ZT jsou definovány normami, a to zpravidla jako násobky průměru pracovní



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



části tělesa. V těchto normách jsou dále popsány typ tělesa, průměr a délka pracovní části tělesa, drsnost povrchu, rádiusy, rozměry a provedení koncových částí tělesa a celková délka tělesa.

Je nutné konstatovat, že některé parametry zkušebních těles jsou v jednotlivých normách specifikovány mírně odlišně a normy nejsou vzájemně zcela kompatibilní. Například norma ISO stanovuje minimální průměr pracovní části tělesa (d) na 5 mm, norma ASTM [2] doporučuje 6,35 mm (0,25"). Norma ISO [3] určujte rádius přechodu pracovní části do místa upnutí jako minimálně 8d, norma ASTM 4d ± 2d a norma ČSN [1] minimálně 3d.

Rozměry zkušebního tělesa se stanoví na základě technických parametrů testovacího zařízení a vlastností testovaného materiálu.

Vyrobené zkušební těleso musí být nesmazatelně označeno na obou koncích (hlavách) ZT co nejdále od měřené části s kruhovým průřezem. Po vyčištění v ultrazvukové pračce se ZT uchovávají v exsikátoru bez přítomnosti vzdušné vlhkosti, aby se zabránilo korozi.

## 2.2.2 Výběr zkušebních těles pro jednotlivé fáze experimentálního programu – randomizace

Při výrobě základního bloku materiálu může dojít k ovlivnění vlastností materiálu v závislosti na pozici v původním bloku materiálu, zejména v závislosti na vzdálenosti od vnějšího povrchu. Přestože jsou výrobní technologie navrhovány tak, aby k tomuto jevu nedocházelo, nedá se mu zcela zabránit. Je způsoben různou rychlostí vychlazování, různou mírou prokování, různou difuzivitou chemických prvků a případně dalšími vlivy. Standardní praxí je nepoužívat povrchové vrstvy základního bloku materiálu pro výrobu zkušebních těles.

Dalším faktorem, který může ovlivnit kvalitu (vlastnosti) jednotlivých zkušebních těles, je proces obrábění a úpravy povrchu. V průběhu výroby někdy značného počtu jednotlivých zkušebních těles se v závislosti na stupni opotřebení může měnit kvalita obráběcích nástrojů, dále se mohou měnit parametry vnějšího prostředí (teplota, vlhkost ...) a operátor výroby. Situaci, kdy dochází ke změně vlastního výrobního zařízení by mělo být zabráněno.

Pro zabránění ovlivnění výsledků výše uvedenými jevy se používá princip randomizace, tedy náhodný výběr zkušebních těles pro každý jednotlivý test.

Pro provedení randomizace je vhodné vyrobit všechna zkušební tělesa před zahájením vlastních testovacích prací.

Možné postupy pro randomizaci jsou použít generátory náhodných (hardwarové), pseudonáhodných (softwarové) čísel nebo nealgoritmické metody (losování, náhodný výběr ze skupiny ...)

## 2.2.3 Stav povrchu zkušebních vzorků

Vlastní opracování povrchu vzorku je nutné provést třískovým obráběním postupně se stále menším úběrem tak, aby nemohlo dojít ke změnám mikrostruktury, tváření povrchových vrstev za studena a ke vzniku vnitřních pnutí, které by ovlivnily průběh a zkreslily výsledky zkoušky. Z tohoto důvodu je vhodné provést na zkušebním vzorku metalografické hodnocení na příčném řezu a změřit hloubku deformované vrstvy, která vznikla po obrábění povrchu.

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost

Α

R



Jeden z faktorů ovlivňujících únavovou životnost je finální stav povrchu. Zpravidla je specifikován jednotlivými normami pro zkoušky únavy bez vlivu prostředí. Např. norma ASTM [2] stanovuje drsnost pracovní části vzorku Ra 0,2, norma ČSN [1] stanovuje jako finální operaci zkušební části vzorku jemné vyhlazení brusnými pasy a maximální drsnost Ra 0,4. Dále je ve stejné normě uvedeno, že při zkoušení jiného způsobu opracování a s tím souvisejícím dosažení jiné kvality povrchu, je nutno tento fakt uvést do protokolu o zkoušce.

Z literatury je známo, že stav povrchu zkušebních vzorků má vliv na únavovou životnost při testování v prostředí. Únavová životnost vzorků s leštěným povrchem testovaných při nižších amplitudách deformace do 0,3 % může být až dvojnásobná oproti vzorků s broušeným povrchem [4], [5].

Z tohoto důvodu je považován stav povrchu zkušebních vzorků za jeden z důležitých parametrů testování vlivu prostředí na nízkocyklovou únavovou životnost a některé projekty přímo sledují jeho vliv [9].

Je tedy možné zvolit tři přístupy k finálnímu stavu povrchu vzorku:

- Vyrobit vzorek tak, aby odpovídal požadavkům normy s tím, že se jedná o nominální stav povrchu.
- Pokud se provádí měření únavové životnosti konkrétní součásti, vyhodnotit stav jejího povrchu (drsnost a hloubku deformované podpovrchové vrstvy) a odpovídajícím způsobem nastavit parametry výroby zkušebních těles.
- Zvolit dva limitní stavy povrchu zkušebních těles, například leštěný a broušený na hrubo, viz [9].
   Testováním obou typů těles získáme hraniční údaje, přičemž životnost reálné komponenty se s největší pravděpodobností bude pohybovat uvnitř těchto hranic.

# 2.2.4 Zhodnocení skutečné geometrie zkušebních těles vůči požadované geometrii a vliv na výsledné parametry testu

Klíčovými hodnotami pro nastavení požadovaného namáhání při zkouškách nízkocyklové únavy (amplituda deformace, případně napětí) jsou délka pracovní částí zkušebního tělesa a průměr pracovní části zkušebního tělesa. Tyto hodnoty jsou obvykle zjišťovány měřidly různých technických typů v závislosti na vybavení zkušební laboratoře. Standardní přístup akreditovaného zkušebního postupu je používat skutečné rozměry.

V případě, že skutečná (změřená) délka pracovní části zkušebního tělesa se od výkresové odlišuje o více než 1 %, se doporučuje:

- Použít zkušební tělesa se skutečnou délkou pracovní části odlišující se od výkresové o méně než 1 %.
- 2) V případě, že to není možné (nedostatek materiálu, zkušebních těles ...) provést zhodnocení vlivu geometrie na stav napjatosti zkušebního tělesa při realizaci testu, a to formou MKP analýzy pro vybrané ZT reprezentující maximální odchylku reálné geometrie od požadované.

Pro provedení MKP analýzy je potřebné zjistit skutečnou geometrii ZT včetně geometrie přechodové části mezi pracovní částí zkušebního tělesa a částí sloužící k upnutí do autoklávu a tuto zjištěnou geometrii použít při tvorbě MKP modelu. Dalším krokem je provedení MKP modelového testu, kdy je



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



MKP model zkušebního tělesa zatížen ve shodě s navrženými parametry testu. Na základě výstupů z MKP modelového testu pak mohou být upraveny parametry testu tak, aby byla dosažena požadovaná úroveň zatížení i pro tělesa s geometrií s odchylkou od výkresové.

## 2.3 Požadavky na testovací zařízení

## 2.3.1 Požadavky na testovací zařízení

Zkušební zařízení musí být schopno provozu při cyklických frekvencích (které odpovídají požadovaným deformačním rychlostem pro testy v prostředí obvykle 0,01 %/s, lépe v rozsahu 0,1-0,002 %/s s požadovanými tvary zatěžování – sinus, pila, výdrže v maximu deformace/síly, popř. v průběhu cyklu). Dále musí být toto zařízení vybaveno odpovídajícím měřidlem cyklů a monitorovacím systémem zatížení.

Jednou z možností je použít zařízení zatěžující zkušební tělesa na základě rozdílných tlaků nad a pod vlnovcem, který je spojen s tažnou hřídelí. Tlak pod vlnovcem je vytvářen hydraulickým tlakovacím zařízením, tlak nad vlnovcem je vytvářen oběhovým čerpadlem či tlakem plynu z tlakové lahve v režimu testování na vzduchu. Vlnovec má schopnost značné deformace; je-li tlak pod vlnovcem větší než tlak nad vlnovcem, vlnovec se smršťuje a vzorek je zatěžován do tlaku. Je-li tlak pod vlnovcem nižší, vlnovec se natahuje a vzorek je zatěžován do tahu.

Konstrukce zařízení musí zaručovat souosost aplikovaného zatížení. Vyrovnání zařízení se provede opakovaně jednou ročně postupem uvedeným v normě pro testy na vzduchu [3]. Tuhost zařízení musí být opakovaně měřena pro tahové/tlakové fáze cyklu a uvažována při řízení a vyhodnocování testu.

Snímač síly musí být navržen speciálně pro testování únavy s následujícími charakteristikami:

- vysokou odolností vůči ohybu,
- vysokou axiální tuhostí,
- vysokou linearitou,
- přesností a citlivostí,
- nízkou hysterezí,
- velkou tuhostí v okamžiku maxima a minima a
- vysokou boční tuhostí.

Extenzometry musí projít dynamickým ověřením a musí mít certifikát dodavatele a musí být kalibrovány v souladu s normou. Třída extenzometru musí odpovídat požadavku měřit délky odpovídající délce měřené části ZT s kruhovým průřezem. Deformace se musí měřit na délce měřené části ZT. Používají-li se extenzometry na ramenech (tzv. závěsové), musí být kalibrovány pro zajištění spolehlivého stanovení vlivu ramen na měřenou deformaci.

## 2.3.2 Stanovení korekčního faktoru deformace

Během únavových zkoušek vzorků v prostředí v autoklávu se nedoporučuje používat extenzometr na pracovní části vzorku, aby se odstranilo riziko preferenční koroze a iniciace únavových trhlin z kontaktních bodů extenzometru. Namísto toho se doporučuje použít princip řízení deformace podle čidla posuvu instalovaného v oblasti závěsů vzorku. Následně je nutné aplikovat korekční faktor, který zajistí, že pracovní část vzorku je vystavena působení požadované hodnoty amplitudy deformace.

TA ČR Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu BETA2

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Korekční faktor je odvozen při zkouškách prováděných ve vzduchu cyklováním vzorků s připojenými extenzometry, případně s použitím video-extenzometru – kamery se speciálním software, který hodnotí úroveň deformace s použitím referenčních bodů na vzorku. Jeho pracovní část je nutné nastříkat kontrastní barvou.

Výsledkem měření je kalibrační konstanta, která vyjadřuje podíl celkové změřené deformace zatěžovacího systému autoklávu a požadované deformace pracovní části vzorku.

Při testování různých typů materiálu je nutné pro každý z nich stanovit kalibrační konstantu zvlášť. Důvodem jsou odlišné mechanické vlastnosti, především houževnatost, které způsobují odlišné chování materiálů při mechanickém zatěžování.

U některých testovacích zařízení může být stanovení kalibrační konstanty přímým měřením příliš komplikované; v takovém případě je možné provést výpočet s pomocí metody konečných prvků [5]. Pro výpočet se jako vstupní údaje používají geometrie vzorku, znalosti mechanických vlastností a cyklického deformačního zpevnění. Tento výpočet může sloužit také pro ověření kalibrační konstanty změřené s pomocí video-extenzometru.

## 2.3.3 Stanovení souososti

Zatěžování zkušebního tělesa musí být prováděno co nejpřesněji v podélné ose, aby nedocházelo k vyvozování nežádoucích ohybových momentů, které vnášejí do měření únavového poškození chybu. Měřením souososti zatěžovacího zařízení se zabývá norma ČSN ISO 23788 [8], která popisuje princip měření a stanovuje dovolené hodnoty odchylek souososti.

Dle této normy se měří souosost při pokojové nebo pouze lehce zvýšené teplotě tak, aby bylo zajištěno dokonalé spojení tenzometrů se ZT. Měření souososti zatěžovacího stroje je doporučeno provádět každých 12 měsíců nebo po každém zásahu do stroje, který může mít na souosost vliv.

Měřicí soustava sestává z referenčního tělesa (RFT), tenzometrických snímačů síly s vývodem vodičů a měřicí aparatury. RFT pro ověřování souososti strojů je těleso upínané do horního a dolního upínacího systému stroje stejným způsobem, jakým se upíná běžné zkušební těleso pro zkoušení únavové životnosti. RFT je osazeno celkem osmi tenzometrickými snímači ve dvou příčných rovinách po obvodu dříku (horní a dolní tenzometrická rovina).

RFT se standardním způsobem upne do zatěžovacího stroje, celý systém se stabilizuje minimálně 30 minut a zahájí se zatěžování. V průběhu zatěžování se měří deformace jednotlivých tenzometrů. Maximální použitá deformace na tělese musí být dostatečně nízká na to, aby byla jistota, že zůstane bezpečně v oblasti hodnot pružných deformací, hluboko pod mezí kluzu, aby nedošlo k poškození RFT.

Všechny změřené deformace z jednotlivých tenzometrů se vyhodnotí podle vztahů uvedených v normě a následně je podle postupu uvedeného v normě stanovena třída souososti stroje.

## 2.3.4 Chemický rám a chemické prostředí zkoušek

Účelem chemického rámu je udržovat chemické parametry oběhového média obklopujícího vzorek na hodnotách, které odpovídají zadání testu. Chemickým rámem lze regulovat vodivost pomocí demi stanice, obsah plynů v médiu pomocí probublávání rezervoáru plynem z přenosné tlakové lahve.



Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu BETA2 www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Kapalné médium s chemickým složením o určitém pH a vodivosti se vytváří v chemické laboratoři a následně se jím plní rezervoár ze zásobní nádrže umístěné v chemickém rámu. V chemickém rámu rovněž probíhá měření obsahu kyslíku a vodivosti média. Součástí chemického rámu je také oběhové čerpadlo, které vytváří tlak a průtok média.

Pro NCÚ testy v prostředí není nutné elektricky izolovat ZT vůči autoklávu. Aby se zabránilo galvanickým účinkům, použité konstrukční materiály musí být kompatibilní s nerezovou ocelí a doporučuje se pasivace nového zařízení a nových přípravků před testem.

Chemické složení prostředí pro testy uvedené následující tabulce je stanoveno tak, aby představovalo médium reprezentující prostředí VVER 440 a VVER 1000.

Složka	Množství	Poznámka
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> [g/kg]	5,0	Koncentrace kyseliny borité je proměnlivá v průběhu palivové kampaně, kyselina boritá je vyváděna z okruhu a její úbytek koriguje úbytek reaktivity paliva. Hodnota 5 g/kg představuje hodnotu v počáteční části kampaně.
KOH [mg/kg]	21,0	Koncentrace KOH, respektive koncentrace draslíku, je proměnlivá v průběhu palivové kampaně, protože KOH kompenzuje kyselost kyseliny borité.
NH <sub>3</sub> [mg/kg]	12,4	
O <sub>2</sub> [ppb]	≤ 5	
H <sub>2</sub> [ppm]	3	Vodík vzniká v aktivní zóně radiolýzou amoniaku, ke které při autoklávové zkoušce nedochází, a proto je nutné jej dodávkovat jako plyn. Na blocích VVER se koncentrace vodíku obvykle pohybuje na úrovni 20-60 Nml /kg H <sub>2</sub> a to v závislosti na předpisu pro konkrétní elektrárnu. Zvolená hodnota odpovídá 31,5 Nml/kg
Cl- [ppb]	< 50	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [ppb]	< 50	
Vodivost [µS/cm]	80 - 110	
рН	6,9 – 7,5	

Tabulka 1 - Složení chemického prostředí pro testy

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí

SUJB STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST

## 2.4 Postup zkoušky

Т

Č

Α

R

Před zahájením zkoušky musí být provedeny všechny požadované ověřovací testy a kalibrace zkušebního zařízení. Je provedena kontrola funkčnosti zařízení, naplnění provozními tekutinami, ověření elektronických systémů a řídícího software. Jsou k dispozici zkušební tělesa, včetně všech informací o původu materiálu a způsobu výroby. Jsou specifikovány podmínky testu, včetně parametrů zatěžování, teploty a chemického prostředí.

Vzhledem ke specifické interakci kovu a prostředí je nezbytné, aby korozní únavové zkoušky byly prováděny za přísně kontrolovaných podmínek prostředí. Aby byla zkouška věrohodná, je nezbytné monitorovat a zaznamenávat následující **parametry prostředí**:

- elektrochemický potenciál
- teplota
- chemické složení prostředí
- pH
- vodivost
- koncentraci rozpuštěných plynů
- průtok a tlak.

Zkušební těleso se založí do testovacího zařízení podle pokynů uvedených v pracovním postupu pro dané zařízení. Spustí se sběr data a nastaví se hodnoty ohřevu média a rychlosti ohřevu. Po dosažení požadovaných parametrů je nutné ponechat systém stabilizovat tak, aby nedocházelo k výrazným výchylkám. Absolutní hodnoty povolených výchylek jsou dané v konkrétním pracovním postupu, obecně lze doporučit maximální výchylky pro teplotu ±2 °C, pro tlak ±0,1 MPa a pro vodivost ±10 µS/cm.

Po stabilizaci systému lze zahájit zatěžování cyklováním podle zadaných parametrů; to je zpravidla řízeno s pomocí speciálního ovládacího software.

Po dokončení testu se postupně snižuje teplota a tlak provozního média, vypne se oběhové čerpadlo média, zkušební zařízení se částečně demontuje a vyjme se zkušební vzorek, aby bylo možné provést dokumentaci stavu povrchu ZT po provedení testu

## 2.5 Protokol o výsledcích zkoušky

Protokol o výsledcích zkoušky musí být jednoznačně identifikován, musí obsahovat datum provedení zkoušky, datum vydání protokolu, jméno autora protokolu a dále informace z následujících oblastí:

- 1. Zkušební stroj:
- Popis zkušebního zařízení, včetně způsobu ověřování dynamického monitorování zatížení, typu regulátoru a pohonu
- Způsob upnutí ZT
- Třídu souososti
- Kalibrační konstantu
- 2. Zkušební těleso:
- Jednoznačnou identifikaci ZT

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí



> www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



- Tvar vzorku a rozměry, odkaz na technický výkres, orientace ZT a jeho umístění vzhledem k polotovaru, ze kterého byl vyroben, případně odkaz na rozřezový plán
- Charakteristiku materiálu ZT: původ, chemické složení, tavbu a výrobní proces, tepelné zpracování, mikrostrukturu, velikost zrna, obsah příměsí, mechanické vlastnosti
- Způsob výroby ZT a stav povrchu měřené části ZT
- 3. Parametry prostředí:
- Parametry prostředí: chemické složení, pH, vodivost a elektrochemický potenciál, koncentraci kyslíku
- Teplotu/tlak média
- Dobu a rychlost ohřevu, dobu výdrže na teplotě před zahájením zkoušky, dobu výdrže na teplotě během zkoušky
- 4. Parametry zatěžování ZT:
- Amplitudu deformace, rozkmit deformace a faktor asymetrie cyklu R, rychlost deformace, čas výdrže a tvar zatěžování
- Kritérium porušení: úplné roztržení ZT nebo snížení maximální síly o dané procento, např. 25 %, z důvodu vzniku trhliny
- 5. Výsledky zkoušky
- Informace o platnosti zkoušky
- Počet cyklů do porušení, stanovených dle požadovaného kritéria porušení
- Graf napětí vs. počet cyklů (u zkoušky řízení silou). Doporučené parametry zatěžování závisí na podmínkách testu a zahrnují maximální napětí, střední napětí, minimální napětí, rozsah zatížení a / nebo amplitudy namáhání
- Graf deformace vs. počet cyklů (u zkoušky řízené deformací). Doporučené parametry deformace závisí na podmínkách testu a zahrnují maximální deformaci, střední deformací, minimální deformaci, rozsah deformace a / nebo amplitudy deformace.
- Únavovou životnost vynesenou do grafu deformace vs. únavová životnost (u zkoušky řízené deformací) nebo napětí vs. únavová životnost (u zkoušky řízené silou). Je obvyklé znázorňovat únavovou životnost (N, v cyklech) logaritmicky na vodorovné ose, zatímco deformace (napětí) je vynesena aritmeticky nebo logaritmicky na ose svislé.
- Informace o odchylkách od běžného postupu
- Dokumentaci stavu povrchu ZT po provedení testu: záznam místa lomu, dokumentaci lomové plochy, míst iniciace, stanovení charakteru lomu a přítomnosti vměstků, trhlin a objemových defektů přítomných před zkouškou, které mohly mít vliv na výsledek zkoušky.

## 2.6 Požadavky na dokumentaci stavu povrchu ZT po provedení testu

Analýza porušení po provedení testu slouží k objasnění jakékoliv neobvyklé příčiny poškození. Při dokumentaci vnějšího povrchu se stanoví přesné místo porušení ZT. V rámci analýzy porušení po provedení zkoušky se provede dokumentace inkluzí, dutin, vad a podobně, které nejsou reprezentativní pro celý objem materiálu, a jejichž výskyt může vést k neplatnému stanovení únavové životnosti. Stálé



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



porušování zkušebních těles v jedné poloze může signalizovat problémy se souosostí zařízení nebo vliv způsobu připojení extenzometru.

Důležitým faktorem sloužícím ke stanovení jakýchkoli neobvyklých příčin poškození a prokázání validnosti testu je fraktografické hodnocení obou povrchů ZT. Rastrovací elektronová mikroskopie [10] a transmisní elektronová mikroskopie lomových ploch, popřípadě replik, jsou dvě běžné používané metody.

Vzhledem k tomu, že se jedná o testování v korozním prostředí, je nutné odstranit korozní produkty vyskytující se na lomových plochách. Pro tyto potřeby se postupuje dle normy ČSN ISO 8407 [11]. V uvedené normě je stanovena metodika a postup odstraňování korozních zplodin, které se na lomových plochách ZT během expozice vytvoří.

Pro makroskopickou analýzu lomových ploch ZT se použije stereomikroskop s využitím obrazové analýzy. Z každé poloviny ZT je po provedeném tahovém testu před očištěním lomových ploch pořízena dokumentace. Poté je jedna polovina ZT podrobena chemickému čištění, druhá polovina je ponechána pro případné další analýzy. Pro následné mikroskopické studium lomové plochy ZT není bezpodmínečně nutné odstranění všech korozních úsad z povrchu lomu. Intenzivní chemické čištění může v konečném důsledku korozní produkty odstranit, ale také může dojít k nevratnému poškození lomové plochy.

Dále je potřebné pro prokázání validnosti testu provést detailní fraktografické hodnocení lomových ploch na rastrovacím elektronovém mikroskopu při zvětšení do 10.000x. Snímkování se provádí v sekundárních elektronech (SE) a je zaměřeno na makroskopické znaky lomové plochy, mezi které patří určení míst iniciace a na znaky mikroskopické, mezi které patří potvrzení přítomnosti striací, které jsou typickým představitelem únavového poškození materiálu.

Výstupem z fraktografického hodnocení je stručný popis stavu lomové plochy ZT doplněný obrazovou dokumentací z makro i mikroskopického hodnocení, stanovením poměru únavového lomu a dolomu vůči velikosti celkové lomové plochy ZT a stanovením hustoty striací na jednotku délky.

V následující tabulce jsou popsány stručně jednotlivé činnosti a zobrazeny vzorové snímky lomové plochy ZT.

Číslo činnosti	Popis činnosti
01	Po rozlomení zkušebního tahového tělesa se provede fotodokumentace obou částí na stereomikroskopu.
02	Změřením délky obou částí ZT se určí podélná pozice lomu. Pokud k lomu dojde mimo pracovní část tělesa, zkouška není platná.
03	Jedna polovina ZT se předá k chemickému očištění, druhá se uloží do skladu vzorků.
04	Provede se chemické očištění lomové plochy dle ČSN ISO 8407.
05	Polovina ZT se vloží do komory mikroskopu a provede se fraktografické hodnocení.

Tabulka 2 - Postup a popis jednotlivých úkonů k hodnocení provedeného testu

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Číslo činnosti	Popis činnosti			
06	Lomová plocha se zdokumentuje při přehledovém zvětšení a stanoví se celková plocha ZT. Dokumentace se provádí ve zobrazovacím módu SE.			
	Stanoví se místo/místa iniciace trhlin na lomové ploše.			
07	Att 20 0 kV Henre 18, 261       Et #: EE Detector 2 mm       2 mm       Vega STreacon UV, a. b.			
08	Dle charakteru lomové plochy a počtu iniciačních míst se stanoví výběr míst pro detailní			
09	Provede se detailní dokumentace ve zobrazovacím módu SE při zvětšení: 250x, 500x, 1.000x, 2.500x, max. 10.000x.			



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Číslo činnosti	Popis činnosti	
	SKIM MAC: 1:00 kar HY: 20.0 kV Name: IM_28-4	SKEI MAQ: 250 kX HY: 20 0 kV Nome: IN_26-5
10	Stanoví se počet striací na jednotku délky.	SEM MAG: 1.00 kx       DET: SE Detector         HY: 20.0 kV       DATE: 08/20/18         Name: IN_28-4       UUV, a. s.
11	Provede se dokumentace ZT při náklonu stol při stejném zvětšení ve zobrazovacím módu S	ku mikroskopu 30°. Dokumentace se provádí E s rotací vzorku 360°. ZT otočit vždy o 90°.

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí



> www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost





## 2.7 Hodnocení kvality dat

Po dokončení testu se provede vyhodnocení kvality získaných dat. Cílem tohoto kroku je rozborem dat zajistit odpovídající kvalitu a reprodukovatelnost testu. To znamená, že jsou úplná, testování proběhlo za požadovaných podmínek a zatěžování vzorku odpovídá specifikacím, a že vzorek byl po dokončení testu příslušným způsobem vyhodnocen.

Parametry pro kontrolu kvality jsou stanoveny na základě zkušeností s prováděním testů a s postupy aplikovanými při mezinárodních projektech, na kterých se podílí více laboratoří.

Konkrétní hodnoty jednotlivých úrovní akceptovatelnosti jsou v některých případech odvozeny od požadavků norem. Například dovolená odchylka teploty testování je stanovena normou ASTM [2] na ± 2 °C; tato hodnota byla pro tuto metodiku převzata jako rozhodující.

Obecně se uvažují tři kategorie kvality dat:

- 1. Vyhovuje bez výhrad
- 2. Vyhovuje s výhradami (konkrétní posouzení použitelnosti výstupu se provede s ohledem na danou neshodu)
- 3. Nevyhovuje, pokud neprojde expertním posouzením vlivu nesplnění parametrů kvality dat na konečný výsledek a není-li uznán za vyhovující z hlediska kap. "2.8 Expertní posouzení nevyhovujících testů" (výsledek je pak pouze informativní, odchylka od požadované hodnoty je natolik závažná, že výsledek testu nelze použít pro finální hodnocení odolnosti materiálu).



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Jednotlivé parametry pro kontrolu kvality a relevantní úrovně akceptovatelnosti jsou uvedeny v následující tabulce, pro lepší přehlednost jsou seskupeny do čtyř oblastí (úplnost dat a hodnocení vzorku, parametry prostředí, parametry zatěžování a hodnocení povrchu lomové plochy). Pokud není uvedeno jinak, všechny hodnoty daného parametru naměřené v průběhu celého testu musí splňovat kritérium dané kategorie.

V některých případech nelze přesně kvantifikovat odchylku od ideálního stavu, představovaného Kategorií 1. Jedná se například o tvar hysterezní smyčky napětí/deformace nebo o stanovení odchylek od únavového charakteru lomové plochy při fraktografickém hodnocení. Tyto parametry jsou hodnoceny ad-hoc posouzením konkrétní odchylky.



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



#### Tabulka 3 – Parametry kvality testu a jejich hodnoty pro kategorie kvality 1 – 3.

Parametr	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3		
	Úplnost dat a hodnocení vzorku				
Úplnost dat	Protokol [viz kapitola 2.5] obsahuje všechna data	Některá data nejsou k dispozici*			
Úplnost hodnocení po provedeném testu	Hodnocení provedeno dle postupu kapitoly 2.6	Hodnocení po ukončení testu nebylo provedeno kompletně dle metodiky*			
Sta	bilita parametrů prostředí testu	– odchylky od určených hodi	not		
Maximální odchylka deformace během 4 h před startem zatěžování	0,003 %	Vyšší hodnoty znamenají nestabilitu testovacího zařízení, což je nepřípustný stav			
Maximální odchylka síly během 4 h před startem zatěžování	0,1 kN	Vyšší hodnoty znamenají nestabilitu testovacího zařízení, což je nepřípustný stav			
Maximální změna napětí v maximech či minimech během 10-ti cyklů ve 2. až 8. desetině cyklování	≤ 5 MPa	Vyšší hodnoty znamenají nestabilitu testovacího zařízení, což je nepřípustný stav			
Nejvyšší odchylka teploty	≤ 2 °C	≤ 4 °C	> 4 °C		
Nejvyšší odchylka tlaku	≤ 0,5 MPa	≤ 1,0 MPa	> 1,0 MPa		
Rozpuštěný kyslík**	≤ 4 ppb	≤ 6 ppb	> 6 ppb		
Nejvyšší odchylka vodivosti**	≤ 2 μS/cm	≤ 4 µS/cm	> 4 µS/cm		
рН	Od 6,9 do 7,5	Od 6,8 do 7,6	< 6,8 nebo > 7,6		
Průtok**	Od 1,75 l/h do 2,25 l/h	Od 1,5 l/h do 2,5 l/h	< 1,5 l/h nebo > 2,5 l/h		
Stabilita zatěžování					
Nejvyšší odchylka maxima a minima deformace v prvních 20. cyklech	0 – 15 % stanovené hodnoty deformace	15 – 30 % stanovené hodnoty deformace	> 30 % stanovené hodnoty deformace		
Odchylka průměru maxim deformace zatěžování	≤ 1 % stanovené hodnoty deformace	≤ 2 % stanovené hodnoty deformace	> 2 % stanovené hodnoty deformace		
Odchylka nejvyšší hodnoty deformace zatěžování***	≤ 2 % stanovené hodnoty deformace	≤ 4 % stanovené hodnoty deformace	> 4 % stanovené hodnoty deformace		
Odchylka průměru minim deformace zatěžování	≤ 1 % stanovené hodnoty deformace	≤ 2 % stanovené hodnoty deformace	> 2 % stanovené hodnoty deformace		
Odchylka nejnižší hodnoty deformace zatěžování***	≤ 2 % stanovené hodnoty deformace	≤ 4 % stanovené hodnoty deformace	> 4 % stanovené hodnoty deformace		
Tvar hysterezní křivky (1., 10., 100. a 1000. cyklus)	Tvar odpovídá typické hysterezní smyčce	Jsou zjištěny odchylky od typického tvaru hysterezní křivky*			
Tvar křivky zatěžování (1., 10., 100. a 1000. cyklus)	Tvar odpovídá křivce požadovaného průběhu zatěžování	Jsou zjištěny odchylky od tvaru křivky požadovaného zatěžování*			
Změny teploty laboratoře v průběhu testu	≤ 3 °C	≤ 6 °C	> 6 °C		
	Hodnocení pozice lomu a p	ovrchu lomové plochy			
Pozice lomu s ohledem na pracovní část vzorku	Celý lom se nachází v rozmezí středních 15 mm	V rozmezí středních 15 mm se nenachází celý lom, ale pouze jeho část	Celý lom je mimo středních 15 mm pracovní části vzorku		



> www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Parametr	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3
Fraktografické hodnocení lomové plochy	Lomová plocha má charakter únavového lomu	Na lomové ploše se vyskytují oblasti, které nejsou reprezentativní únavovému poškození*	

\* Stanovení kategorie kvality a použitelnosti dat daného testu bude provedeno ad-hoc posouzením konkrétní odchylky od stavu určeného pro Kategorii 1.

\*\* Nebude hodnoceno pro testy na vzduchu/inertním prostředí

\*\*\*Platí od 21. cyklu

## 2.8 Expertní posouzení nevyhovujících testů

Po zkušenostech získaných z testování vzorků se ukazuje, že nastavení hranic platnosti pro jednotlivé kategorie je značně konzervativní pravidlo. Jestliže dojde k jejich výraznému překročení, jak z hlediska absolutní hodnoty překročeného parametru, tak z hlediska doby trvání překročení, je zřejmé, že takový test nebyl proveden za odpovídajících podmínek, není platný a jeho výsledky nelze použít. Pokud je ale překročení malé (typicky do jednotek procent) a časově omezené (jednotky cyklů), praktické negativní ovlivnění podmínek testu je zcela zanedbatelné. V takovém případě se doporučuje provádět ad-hoc expertní panelem specialistů s využitím všech ostatních informací získaných z provedeného testu (fraktografie, počet cyklů do lomu, adekvátnost zatěžování a jiné). V úvahu je nutné brát i ekonomickou stránku celého testování, kdy se cena jednoho testu pohybuje řádově ve stovkách tisíc Kč.

Předpokládá se, že k takovému posuzování v rámci jednoho zkušebního programu, který běžně zahrnuje testování desítek vzorků, bude docházet pouze v nízkých jednotkách případů.

 Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu BETA2
 R www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost

Т

Č



## 2.9 Metodika výpočtového stanovení korekčního faktoru deformace pomocí MKP

V této kapitole je podrobně popsán postup (metodika) pro numerické stanovení kalibračních konstant (KK) na zařízení Pluto 6. Tato metodika je ovšem přenositelná i pro jiná zařízení (autoklávy) a jiná zkušební tělesa (ZT).

Během nízkocyklové únavové zkoušky na autoklávovém zařízení Pluto 6 je deformace pracovní části vzorku řízena pomocí čidla posuvů instalovaného v oblasti závěsů vzorku. Při tom je třeba aplikovat korekční faktor (kalibrační konstantu, KK), který zajistí, že pracovní část vzorku je vystavena působení požadované hodnoty amplitudy deformace, viz kap. 2.3.2.

Tento korekční faktor pro autoklávové zařízení, v tomto případě Pluto 6, lze stanovit za pokojové teploty na vzduchu cyklováním vzorků a měřením deformace na pracovní části ZT pomocí video-extenzometru. Pro zvýšené teploty však přímé experimentální stanovení korekčního faktoru není možné a je nutné použít numerickou simulaci a vstupní materiálová data reprezentující chování materiálu v oblasti cyklické plasticity za požadované zvýšené teploty. Doporučený postup dle této metodiky spočívá ve stanovení KK pro zvýšené teploty pomocí numerického výpočtu. Numericky určené KK je v souladu s touto metodikou doporučeno používat pro řízení deformace v testovacím programu. Výpočetní model je vhodné validovat porovnáním experimentálně stanovených KK pro pokojovou teplotu s numericky stanovenými KK pro pokojovou teplotu.

I v případě, kdy mají být stanoveny KK pouze pro pokojovou teplotu, je vhodné provádět vzájemnou validaci experimentálního a výpočetního postupu pro stanovení KK.

## 2.9.1 Definice kalibračních konstant

Hodnoty kalibračních konstant závisí na konstrukci zařízení a uchycení indukčního čidla posuvů na zkušebním vzorku. Proto je důležité sestavit výpočtový model, který bude v souladu s experimentálním zařízením, aby způsob určení KK pomocí MKP byl v souladu s experimentálním přístupem.

Níže, na Obr. 2-1 je uveden schématický řez experimentálním zařízením Pluto 6 s připojeným označením (popisem) jeho částí. Zkušební těleso (ZT), které je schematicky popsáno na Obr. 2-6 a jehož výkres je na Obr. 2-7, je umístěno na spodní straně v tažné hřídeli a na horní straně je přes horní šroub, hvězdu a aretační šroub usazeno v kleci. Ta je pomocí šroubů přimontována ke střední části zařízení.

Jak je zmíněno výše v textu, ZT je na spodní straně závitovou částí umístěno v tažné hřídeli, která vykonává pracovní cyklus na ZT. Na vrchní straně je ZT uloženo přes závitovou část v tuhé kleci. Za přechodovou částí ZT na jeho spodní straně je umístěn držák tyček, který je spojen přes tyčky s čidlem posuvů (LVDT), které slouží k řízení experimentu při zatěžování deformací. Držák tyček a tyčky přenášejí posunutí ze spodní rozšířené části ZT na indukční čidlo posuvů VČP, které je umístěno nad klecí v horní části zařízení. Schématické zobrazení ZT a umístění držáku tyček indukčního čidla je uvedeno na Obr. 2-2. Na tomtéž obrázku je schematicky označeno odečítání posunutí indukčním čidlem, označeno jako  $\Delta$ P. Dále je zde patrná deformace pracovní části, jejíž délka je v nedeformovaném stavu označena jako L1 a ve stavu při deformaci jako L2. Hodnota L2 odpovídá dosažené maximální nebo minimální deformaci (úvrati), protože *KK* se stanovují pouze pro maximální a minimální deformaci na cyklu. Pomocí veličin L1, L2 a  $\Delta$ P se stanovují KK, které slouží k tomu, aby byla v průběhu zkoušky NCÚ dosažena požadovaná amplituda deformace  $\varepsilon_a$ . Přesněji řečeno, kalibrační konstanta KK slouží

 T
 A
 Tento projekt je financován se státní podporou.

 Technologické agentury ČR
 v rámci programu BETA2

 Č
 R
 www.tacr.cz

 Výzkum užitečný pro společnost



k přepočtu posuvu ΔP měřeného indukčním čidlem posuvů na prodloužení pracovní části vzorku  $\Delta L = L2 - L1$ , resp. deformaci pracovní části vzorku  $\Delta L/L1$ .

Kalibrační konstantu KK definujeme jako poměr deformace na pracovní části vzorku ku posuvu odečtenému čidlem posuvů  $\Delta P$ . Pro snazší porovnání se staršími výsledky ještě přenásobujeme takto stanovenou kalibrační konstantu délkou celé pracovní části vzorku  $L_{prac}$  = 15 mm.

$$KK = \frac{\frac{\Delta L}{L1}}{\Delta P} L_{prac} = \frac{\Delta L \cdot L_{prac}}{L1 \cdot \Delta P} = \frac{(L2 - L1) \cdot L_{prac}}{L1 \cdot \Delta P}.$$
(2.1)

Veličiny L1, L2 a ΔP se stanovují během experimentální nebo výpočtové kalibrace zařízení.

Během samotné únavové zkoušky stanovuje řídící jednotka zařízení deformaci pracovní části vzorku  $\varepsilon_{NCU}$  z posunutí  $\Delta P_{NCU}$  odečteného čidlem posuvů v úvratích podle vztahu:

$$\varepsilon_{NCU} = \frac{\mathrm{KK} \cdot \Delta P_{NCU}}{L_{prac}}.$$
(2.2)

Poznamenejme, že veličina  $L_{prac}$  nehraje v celém procesu podstatnou roli a bylo by možné ji (současně) z obou výše uvedených rovnic odstranit. Do obou rovnic byla zavedena pouze pro snazší porovnání experimentálně stanovených kalibračních konstant se staršími výsledky a s hodnotami z literatury.

Při výpočetním a experimentálním stanovení KK se ukázalo, že vzdálenost L1 je vhodné volit o něco menší, než je délka celé pracovní části vzorku  $L_{prac}$ , protože v opačném případě by byla hodnota KK (mírně) ovlivněna poklesem osové deformace v blízkosti radiusových přechodů ZT. To by pak při únavové zkoušce vedlo k dosažení vyšší deformace ve středu pracovní části ZT, než jaká byla předepsána.

Nerovnoměrné rozložení deformace v blízkosti radiusových přechodů ZT při cyklování vzorku je patrné z výsledků testovacího výpočtu prezentovaného dále v kapitole 2.9.6 a na Obr. 2-15, Obr. 2-16.



Obr. 2-1 Schéma horní části experimentálního zařízení Pluto 6 s popisem a barevným označením jednotlivých částí.





www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Obr. 2-2 Schématické znázornění ZT a popis jednotlivých částí.

## 2.9.2 Významné faktory ovlivňující určení kalibračních konstant

Jak již bylo zmíněno v úvodu kap. 2.9, cílem numerických simulací je stanovit kalibrační konstanty (KK) pro dané podmínky zkoušky NCÚ. K tomu jsou využívány možnosti numerických simulací pro různé podmínky, na kterých KK závisí. Podmínky (faktory), které ovlivňují velikost KK, jsou:

- a) amplituda deformace,
- b) rychlost deformace,
- c) teplota při zkoušce NCÚ, tj. teplota pro kterou má být KK stanovena,
- d) materiál, ze kterého je ZT vyrobeno,
- e) cyklické chování materiálu v průběhu zkoušky.

Postupně bude blíže diskutován vliv jednotlivých faktorů, které ovlivňují KK.

a) <u>Amplituda deformace</u>: Amplituda deformace pracovní části vzorku má podstatný vliv na stanovené KK, jako je např. uvedeno v článku [12] z projektu INCEFA+, kde je z prezentovaných výsledků patrné, že pro amplitudy 0,3 % a 0,6 % je dosaženo rozdílných hodnot KK. Je to dáno rozložením deformace na vzorku, hlavně v pracovní a přechodové části vzorku. V závislosti na amplitudě deformace se mění míra zplastizování přechodové oblasti ZT (tj. oblasti s proměnným průměrem), což ovlivňuje hodnotu KK.

Při experimentálním i výpočetním stanovení KK je tedy důležité dodržet požadovanou amplitudu deformace na pracovní části ZT tak, aby odpovídala prováděným zkouškám NCÚ.

b) <u>Rvchlost deformace</u>: Rychlost zatěžování může mít určitý vliv na míru cyklického zpevňování materiálu. Vliv změny rychlosti deformace pro některé austenitické nerezové materiály (které nejsou předmětem tohoto projektu) je jako příklad uveden na Obr. 2-3 [21].



Figure 16. Effect of strain rate on cyclic-hardening behavior of wrought and cast SSs in air at 288°C

Obr. 2-3 Průběh amplitudy napětí pro různé rychlosti zatěžování materiálu [21].

Rychlost deformace při zatěžování je doporučeno volit v souladu s parametry experimentů, pro které je kalibrace prováděna, a to proto, aby nebyla výrazně ovlivněna odezva materiálu při únavových zkouškách a při stanovení jeho cyklických vlastností pro MKP výpočty (pro stanovení KK).

c) <u>Teplota pro stanovení KK</u>: Teplota má výrazný vliv na chování materiálů. Všeobecně se dá říct, že vlivem zvýšení teploty dochází ke změně vlastností kovových materiálů. To lze demonstrovat např. na základních mechanických vlastnostech materiálu: dochází k poklesu meze kluzu a meze pevnosti. Tím dochází k dřívějšímu přechodu z elastického chování do plastického (překročení meze kluzu) a z celkového pohledu dochází k poklesu křivky napětí – deformace. Na Obr. 2-4 je jako příklad vyobrazen vliv teploty na tahovou křivku austenitického materiálu 08Ch18N10T.

Hodnoty KK je vhodné stanovit pro předepsanou teplotu zkoušky NCÚ. Tato teplota se v numerických simulacích zohlední zadáním materiálových vlastností stanovených pro tuto teplotu. Mezi ně patří zejména Youngův modul a tahové či cyklické materiálové vlastnosti.



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost

Α

R





Obr. 2-4 Vliv teploty na průběh křivek napětí – deformace materiálu 08Ch18N10T.

d) <u>Materiál, ze kterého je vyrobeno ZT</u>: Chemické složení, tepelné zpracování a další faktory, jako například předdeformace, ovlivňují mechanické, tahové a cyklické vlastnosti materiálu. Proto je tyto faktory nutné zohlednit při stanovení KK. Je tedy vhodné pro každý materiál stanovit vlastní KK pro zvolenou teplotu.

e) <u>Cyklické chování materiálu</u>: V průběhu tvrdého cyklického zatěžování (které může být řízeno silově anebo deformačně) každý materiál vykazuje určitý průběh maxim a minim síly (resp. napětí) v závislosti na počtu cyklů a také na amplitudě deformace. Například tavba materiálu 08Ch18N10T zkoušená v článku [14] při nižších amplitudách deformace (cca do 1,5 % celkové deformace) v prvních desítkách cyklů vykazuje cyklické zpevnění s následným cyklických změkčením do saturovaného stavu. U vyšších amplitud deformace (nad 1,5 % celkové deformace, ovšem amplitudy nad 1 % se v tomto projektu neuplatní) vykazuje tato tavba v celém průběhu únavové zkoušky cyklické zpevňování, bez dosažení saturovaného stavu, a to až do lomu. Je to znázorněno na Obr. 2-5 převzatém z publikace [14].

Různé nerezové austenitické materiály vykazují různé průběhy zpevnění či změkčení v průběhu zatěžování. Toto chování je samozřejmě ovlivněno i tepelným zpracováním a deformačním zpevněním.

Z výše uvedeného plyne, že v průběhu únavové zkoušky může docházet ke změnám hodnoty KK. Výpočetní i experimentální stanovení KK je proto vhodné provádět v ustálené (saturované) oblasti cyklického zatěžování, která zpravidla zahrnuje většinu únavové životnosti zkušebního tělesa. Smyslem je zajistit, aby KK, potažmo amplituda deformace, byla během zkoušky NCÚ aplikována korektně v co nejdelší části únavové životnosti zkušebního vzorku.





Nutno podotknout, že výše uvedené informace se týkají především testů řízených deformací se symetrickým cyklem (tedy bez střední deformace). Pokud se budou předpokládat jiné druhy zatížení, jako např. nesymetrický zátěžný cyklus se střední deformací, je chování materiálu ovlivněno dalšími cyklickými jevy, jako např. relaxace středního napětí, což platí i pro případ silového zatížení (tzv. měkké zatížení).



Figure 3. Force evolution during fatigue life test for various strain-amplitude levels.

## Obr. 2-5 Průběhy sil v závislosti na počtu cyklů a amplitudě deformace [14].

Vlivy diskutované v této kapitole je vhodné zohlednit při stanovení mechanických (cyklických) vlastností pro numerické simulace. Zohlednění těchto vlivů přispívá k přesnějšímu numerickému stanovení kalibračních konstant KK.

## 2.9.3 Materiálové vlastnosti pro provedení numerických simulací

Pro provedení numerických simulací, které budou sloužit pro stanovení KK, jsou důležitým vstupním údajem materiálové parametry. Požadavky na materiálové vstupy do simulací jsou závislé na tom, jaký druh analýzy bude prováděn. V případě stanovení korekčního faktoru pro nízkocyklové únavové zkoušky se jedná o cyklické analýzy v oblasti plasticity, kde rozložení celkové deformace na pracovní části ZT hraje významnou roli a dalším významným příspěvkem ovlivňujícím hodnotu KK je distribuce celkové deformace na přechodových oblastech ZT. Čím vyšší bude hladina aplikované amplitudy deformace, tím vyšší bude příspěvek v přechodových oblastech do stanovení KK, neboť přechodové oblasti se budou více deformovat. Pro numerické simulace je tedy nezbytné definovat elasto-plastický materiálový model, který popisuje rozložení celkové deformace na pracovní části a v přechodových oblastech ZT.

Т

Č

Α

R

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Pro stanovení korekčního faktoru deformace pro zařízení Pluto 6 byl použit Chabocheův materiálový model, který na základě kalibrace materiálových konstant dokáže popsat cyklické elasto-plastické chování materiálu. Výhodou Chabocheova modelu je, že je již implementován v komerčních softwarech pro výpočty MKP, např. v software Abaqus, a jeho materiálové parametry je možné relativně snadno naladit, např. s využitím zabudovaných funkcí software Abaqus. K naladění materiálových parametrů Chabocheova modelu jsou nezbytné vstupní údaje v podobě cyklické křivky, anebo širokých hysterezních smyček. Není-li možné získat materiálová data popisující cyklické chování materiálu, lze v krajním případě použit statickou tahovou křivku, která ovšem nepopisuje správně cyklickou odezvu materiálu a při jejím použití budou hodnoty KK stanoveny s menší přesností. Z tohoto důvodu se použití statické tahové křivky obecně nedoporučuje, ale je v krajním případě možné.

Chabocheův model, popsaný v kap. 2.9.4, vykazuje dostatečnou přesnost materiálové odezvy pro cyklování s konstantní amplitudou deformace, viz např. [12]. Pro případnou simulaci nesymetrických cyklů je nutné buď tento model modifikovat, nebo použít komplexnější model. Větší komplexnost modelu ovšem souvisí s náročnější kalibrací modelu, větším množstvím parametrů a větším množstvím vstupních materiálových dat potřebných pro jeho kalibraci. Navíc komplexnější modely většinou nejsou implementovány v komerčních softwarech pro výpočty MKP a jejich vlastní vývoj často bývá časově velmi náročný.

Na základě výše uvedených informací byl jako konstitutivní materiálový model v této zprávě použit Chabocheův model plasticity, který umožňuje využít kterékoli ze tří výše uvedených vstupních dat pro stanovení materiálových konstant. Detailní popis práce s Chabocheovým konstitutivním modelem a jeho naladění je uveden níže v kap. 2.9.4.

Tato metodika umožňuje použití i jiných materiálových modelů. Vzhledem k široké škále dostupných materiálových modelů, které se liší svým zaměřením, komplexností a přístupem k popisu materiálového chování, je vždy nutné provést validaci zvoleného materiálového modelu na požadovanou elasto-plastickou odezvu. Nutno připomenout, že pro naladění komplexnějšího modelu může být potřeba více vstupních materiálových vlastností, což s sebou nese potřebu rozsáhlejšího materiálového testování a náročnější kalibrace materiálového modelu.

V průběhu testovacího programu (zkoušky NCÚ na vzduchu a v korozním prostředí) byly testy řízeny na celkem třech hladinách amplitudy celkové deformace a to 0,3 %, 0,6 % a 0,9 %. Pro tyto hladiny deformace je důležité znát materiálové vstupy.

Tato metodika doporučuje využívat materiálové vstupy odpovídající hladinám amplitudy celkové deformace, které slouží jako řídicí parametry testů v rámci testovacího programu.

Využití časově nezávislých modelů plasticity je možné vždy, pokud jsou testy prováděny při konstantních rychlostech deformace (eliminuje se vliv změny rychlosti na cyklické zpevnění) a pokud materiál během testů nevykazuje creepové chování. V projektu jsou předpokládány testy, které budou prováděny při konstantních velikostech rychlostí deformace 0,005, 0,01 a 0,1 %/s, je z pohledu simulací možné využít kvazistatického přístupu. Tedy využít modely časově nezávislé plasticity (rate independent). Pro stanovení cyklické deformační křivky, případně široké hysterezní smyčky, je vhodné



SUJB STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST

využít rychlosti deformace odpovídající testovacímu programu zkoušek NCÚ. Z praktických důvodů se jako nejvhodnější jeví rychlost deformace 0,1 %/s nebo mírně nižší.

Jak je tedy výše v této kapitole uvedeno, pro numerické simulace metodou konečných prvků jsou důležitá vstupní data pro konkrétní materiál a konkrétní teplotu odpovídající teplotě při zkoušce NCÚ:

- Youngův modul pružnosti *E*, který je možné převzít z norem, příruček nebo stanovit z experimentálního měření.
- Cyklická křivka anebo saturované široké hysterezní smyčky, stanovené alespoň pro úrovně amplitudy deformací 0,3 %, 0,6 % a 0,9 %,
- V krajním případě statická tahová křivka pokud nejsou dostupná relevantní cyklická data,
- Poissonova konstanta, lze použít normativní hodnotu 0,3.

Výše zmíněná materiálová data jsou nutná pro provedení numerických simulací. Z těchto dat jsou potom dále stanovovány materiálové konstanty zvoleného konstitutivního modelu do numerických simulací.

## 2.9.4 MKP simulace

Pro provedení numerické simulace pomocí metody konečných prvků (MKP) sloužící ke stanovení korekčního faktoru je potřeba přistupovat individuálně. Simulaci je potřeba definovat dle konfigurace autoklávu, geometrie a materiálu ZT, způsobu zatížení, podmínkám testů, způsobu měření a umístění čidla měření deformace atd. Obecně se simulace skládá z několika částí:

- MKP model
  - Geometrie modelu,
  - Diskretizace modelu → vytvoření sítě konečných prvků,
  - Aplikace okrajových a zátěžných podmínek,
  - o Volba materiálového modelu (konstitutivního modelu),
- Nastavení výpočtu:
  - Druh analýzy,
  - Velikost časového kroku a řešený časový úsek,
  - Ukládání potřebných dat.

Všechny výše uvedené body je potřeba při definici MKP simulace zohlednit a budou diskutovány níže.

1. <u>Geometrie modelu:</u>

Tvorba geometrie MKP modelu vychází z výkresové dokumentace zařízení a zkušebního tělesa.

Na základě rozboru zařízení Pluto 6, bylo přistoupeno k řešení pouze lokálního problému ZT a oblasti horního upevnění šroubu. Model je řešen jako 2-D rotačně symetrický problém. Geometrie modelu zahrnuje celé ZT (bez závitů), horní šroub a upevnění horního šroubu, které bylo modelováno za pomoci dvou rigidních skořepinových (shellových) prvků. Geometrie ZT byla vytvořena v souladu s výkresovou dokumentací tělesa, viz Obr. 2-7 a další zahrnuté části jsou v souladu s jejich výrobními výkresy a dokumentací autoklávu. Názorný pohled na geometrii MKP modelu je uveden na Obr. 2-6, kde je uveden i popis jednotlivých částí modelu. Dle finální geometrie byla vytvořena síť konečných prvků.





Na základě analýzy konstrukce autoklávu a upevnění ZT bylo zjištěno, že všechny při testu zatěžované komponenty autoklávu mají řádově větší tuhost než vlastní ZT a horní šroub. Proto bylo v rámci určování KK modelováno pouze ZT a horní šroub. Okrajové podmínky modelu jsou popsány níže. Samotné závity nebyly zahrnuty v konečnoprvkové síti, protože mají pouze lokální vliv.



Obr. 2-6 Geometrie ZT, horního šroubu a jeho upevnění pro numerické stanovení KK. Celá pracovní část ZT má délku 15 mm, pro experimentální a výpočtové stanovení KK se používá kratší délka o velikosti 10 mm.



ČR

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost





Obr. 2-7 Výkres zkušebního tělesa.

## 2. Diskretizace modelu (MKP síť):

Dalším krokem je tvorba MKP sítě modelu, v tomto případě ZT a horního šroubu.

Pro tvorbu korektní MKP sítě modelu se doporučuje provést sítovou konvergenci pomocí několika variant sítě s postupně zjemňovanými prvky, zejména v přechodových oblastech vzorku. Síť lze považovat za dostatečně kvalitní, pokud změna celkového prodloužení vzorku nepřesáhne 1 % při zatížení vyvolávající maximální testovanou amplitudu deformace v pracovní části vzorku.

Geometrie ZT uvedená na Obr. 2-6 je diskretizována pomocí konečných prvků. Z uvedeného náhledu na obrázku je patrné, že geometrie ZT byla rozdělena na části (partitions) tak, aby mohla být geometrie ZT rovnoměrně vysíťována se zaměřením na dostatečně jemnou síť v nejvíce namáhaných oblastech, tj. v oblasti pracovní a přechodové části ZT. Cílem bylo vytvoření co nejkvalitnějších prvků ve zmíněných oblastech, aby popis napěťově deformační odezvy byl dostatečně přesný a aby byl odstraněn vliv sítě. Nebylo tedy využito automatické tvorby sítě, což je metoda, kterou nabízí veškeré komerční MKP nástroje, ale geometrie vzorku byla rozdělena na několik jednoduchých částí, které byly vysíťovány strukturovanou sítí (structured mesh) pomocí kvadratických prvků. Náhled na MKP síť tělesa je uveden Obr. 2-8 a na síť horního šroubu na Obr. 2-9.

R

Α

Т

Č

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost





Obr. 2-8 Vyobrazení MKP sítě ZT.

R

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Poslední revize dokumentu: 3. 12. 2024

Po délce celé pracovní části ZT (15 mm) bylo vytvořeno 80 prvků a v radiálním směru ZT 20 prvků. V obou přechodových oblastech bylo vytvořeno 40 prvků po délce a 20 prvků radiálně. V rozšířených částech ZT, kde je uchyceno čidlo snímače posuvů (držák tyček), bylo vytvořeno 42 prvků po výšce a 20 prvků radiálně, což odpovídá pracovní části vzorku. Náběžná hrana v závitové části je po délce vysíťována 5 prvky a radiálně 10 prvky. Celkem je tedy pomyslná závitová část síťována radiálně 30 prvky. Po délce je závitová část vysíťována 60 prvky s BIAS faktorem 3.

Geometrie horního šroubu byla stejně jako geometrie ZT rozdělena na části. Pro tvorbu elementů horního šroubu bylo využito automatické tvorby sítě v programu ABAQUS. Přibližná velikost elementů byla zvolena 0,2 mm. MKP síť horního šroubu je vidět na Obr. 2-9.

Dvourozměrný rotačně-symetrický model obsahuje 13 241 osmi uzlových bikvadratických prvků s redukovanou integrací typu CAX8R. Celkový počet uzlů v modelu je 41 075.

MKP síť modelu je obecně třeba navrhnout tak, aby korektně zachycovala plastickou deformaci a napětí v pracovní části a v přechodových oblastech ZT. Tím se minimalizuje vliv sítě na přesnost stanovení KK.

Obr. 2-9 MKP síť horního šroubu.

T A Č R Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu BETA2

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



## 3. Aplikace okrajových podmínek, zátěžných podmínek a kontaktních párů

Model (v tomto projektu) je řešen jako rotačně symetrický 2-D. Z provedeného rozboru, uvedeného výše v kap. 2.9.1 a z Obr. 2-1, je patrné, že vrchní část ZT je pevně uložena v horní části klece v horním šroubu. ZT je v místě kontaktu s horním šroubem "slepen" (v programu ABAQUS označeno jako tie). Kontakt mezi horním šroubem a prvky reprezentující upevnění horního šroubu (analytické tuhé plochy reprezentovány skořepinovými prvky) jsou definovány jako kontaktní páry s nulovým třením. Prvkům reprezentující upevnění horního šroubu je zamezeno posunutí ve všech směrech.

Na spodní straně je ZT uloženo v tažné hřídeli, která vykonává zatěžující pohyb. ZT zde ale není zašroubován do tažné hřídele po celé výšce závitové části. Horní úsek závitové části je překryt tzv. "hardlinem", jehož výška činí 10 mm. Pod hardlinem je vzorek zašroubován, viz Obr. 2-1. Na této "zašroubované" ploše byla aplikována zatěžující podmínka v podobě posunutí. Tato podmínka byla zadána do výpočtu přes řídící uzel, který je pevně spojený s plochou zašroubované závitové části ZT. Hodnota posunutí je řízena prostřednictvím subrutiny programu ABAQUS s názvem UAMP (Userdefined Amplitude). Zjednodušeně řečeno se hodnota posunutí zvětšuje do té míry, než je na pracovní části ZT o velikosti 10 mm dosaženo požadované amplitudy deformace, poté se otočí znaménko posunutí a ZT je deformováno opačným směrem opět do požadované amplitudy deformace na pracovní části ZT o délce 10 mm.

Okrajové podmínky definované na MKP modelu spolu s místy vyhodnocených výstupů použitých pro stanovení KK jsou vyobrazeny na Obr. 2-10.





## 4. Volba a kalibrace materiálového (konstitutivního) modelu:

Jak bylo výše v textu uvedeno, jako materiálový model je pro stanovení KK v tomto projektu použit Chabocheův konstitutivní model [19]. Ten je vhodný pro popis materiálové odezvy v ustáleném (saturovaném) stavu. Chabocheův model je nelineární kinematické pravidlo, které je založeno na kinematickém pravidle Armostronga-Fredericka. Chaboche pravidlo Armstronga-Fredericka rozšířil o M-částí kinematického tenzoru napětí do podoby:

$$\alpha = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i, \tag{2.3}$$

přičemž je pro každou část uvažována evoluční rovnice dle Armstronga-Fredericka

$$d\alpha_i = \frac{2}{3}C_i d\varepsilon_p - \gamma_i \alpha_i dp.$$
(2.4)

 $C_i$  a  $\gamma_i$  jsou materiálové konstanty a dp je přírůstek akumulované plastické deformace (v tenzorové formě) a  $d\varepsilon_p$  je tenzor přírůstku plastické deformace.

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí

Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu BETA2 www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost

Α

R



Pro kalibraci (stanovení parametrů) tohoto kinematického materiálového modelu je možné využít experimentální data ze statické tahové křivky, z cyklické deformační křivky, anebo z široké hysterezní smyčky, viz kap. 2.9.3. Nebude zde rozebírána teorie odvození vztahů, ale budou zde pouze uvedeny vztahy pro možné naladění materiálových vstupů z uvedených experimentálních testů. Odvození níže uvedených vztahů je uvedeno např. v [20] a zde jsou uvedeny pouze výsledné vztahy.

Pro stanovení materiálových parametrů z tahové křivky materiálu je možné využít vztah

$$\sigma = \sigma_Y + \sum_{i}^{M} \frac{C_i}{\gamma_i} (1 - e^{-\gamma_i \varepsilon_p}).$$
(2.5)

Pro cyklickou deformační křivku je možné využít vztah:

$$\sigma_a = \sigma_Y + \sum_i^M \frac{C_i}{\gamma_i} \tanh(\gamma_i \varepsilon_{ap}), \qquad (2.6)$$

kde v uvedených rovnicích je  $\sigma$  aktuální hodnota napjatosti,  $\epsilon_p$  aktuální hodnota plastické deformace,  $\sigma_a$  amplituda napětí,  $\varepsilon_{ap}$  je amplituda plastické deformace a  $\sigma_Y$  je mez kluzu (cyklická). Díky podobným vlastnostem funkcí tanh(x) a  $(1 - e^{-x})$  je možné využít stejný přístup pro odhad parametrů jak ze statické, tak i cyklické deformační křivky [20].

Jako poslední možnost je možné využít vztah pro odvození materiálových parametrů pro širokou hysterezní smyčku, a to pomocí vztahu:

$$\sigma = \sigma_Y + \sum_{i}^{M} \frac{C_i}{\gamma_i} \left( 1 - 2e^{-\gamma_i(\varepsilon_p - (-\varepsilon_L))} \right), \tag{2.7}$$

kde  $\varepsilon_L$  odpovídá maximální deformaci v tlakové větvi (záporná hodnota amplitudy deformace).

Chabocheho model je dostupný a dobře dokumentovaný v programu Abaqus, verze 2022. Níže bude uveden popis možností práce s konstitutivními modely v tomto konečnoprvkovém programu a jejich možným nastavením. Je ale nutné připomenout, že volba materiálového modelu vždy závisí na dostupnosti materiálových dat, jako jsou CDK nebo široká hysterezní smyčka pro daný materiál.

Abaqus umožňuje definici Chabocheova kinematického pravidla pomocí tří různých nastavení (pomocí 3 různých vstupních údajů):

- Specifikace materiálových parametrů  $C_i$ ,  $\gamma_i$  a  $\sigma_Y$ ,
- o Definice kinematického zpevnění specifikací "Half-cycle test data",
- Definice kinematického zpevnění specifikací materiálových dat ze stabilizovaného cyklu.

Pokud se využije první možnost, tak je nejdřív potřeba stanovit konstanty materiálového modelu. K tomu lze využít vztahy uvedené výše v této kapitole. Materiálové konstanty se pak stanoví z dostupných experimentálních dat například s pomocí metody nejmenších čtverců. Výsledkem je stanovení materiálových konstant  $C_i$ ,  $\gamma_i$  a  $\sigma_Y$ , které se zadají do Abaqusu.

 Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu BETA2
 R výzkum užitečný pro společnost



V případě druhé možnosti se do programu Abaqus vkládají data z jednoosého experimentálního zatěžování ve formě skutečného napětí a skutečné plastické deformace. Jedná se o data z prvního cyklu zatěžování. V manuálu programu je proto doporučeno tuto možnost využít pouze v případě, že simulace bude zahrnovat pouze několik prvních cyklů zatěžování. Na základě vložených dat si software Abaqus sám stanoví materiálové konstanty, které ve výpočtu použije.

Třetí možností je definice materiálových konstant z ustáleného cyklu při symetrickém deformačním zatěžování. Do programu se vkládá pouze tahová část (horní část) saturované široké hysterezní smyčky, a to až do bodu, ve kterém začíná odtěžování (do dosažení amplitudy). Plastická deformace je spočtena zarovnáním počátku do  $\varepsilon_p^0$ . Postup uvedený v manuálu využívá následující vztah pro definici plastické deformace a je i schematicky zobrazen na Obr. 2-11:

$$\varepsilon_i^{pl} = \varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} - \varepsilon_p^0 \tag{2.8}$$



Obr. 2-11 Názorné schéma kalibrace kinematických částí modelu [20].

Tohoto postupu, kdy se vkládá pouze tahová část horní větve stabilizované hysterezní smyčky, bylo využito pro stanovení KK v článku [20].

5. <u>Nastavení výpočtu:</u>

Úloha v tomto projektu byla řešena jako statická úloha v oblasti velkých deformací s fixním časovým krokem. Vzhledem k použití Chabocheho materiálového modelu, který nepopisuje viskózní chování materiálu (materiálová odezva není závislá na čase), je samotné řešení nezávislé na velikosti časového kroku. Fixní časový krok byl zvolen 0,1 a v každém časovém okamžiku byla aplikována hodnota



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



posunutí pomocí subrutiny UAMP, jak je popsáno v textu výše. Obecně je nutné definovat časový krok a případnou subrutinu tak, aby se v simulaci podařilo zachytit úvratě zatěžování, ve kterých je dosaženo požadované deformace pracovní části a ve kterých má být provedeno stanovení KK. Délka výpočtu byla zvolena individuálně tak, aby došlo k ustálení zatěžovacích cyklů.

Pro stanovení KK byly z MKP simulace zaznamenány hodnoty posunutí  $\Delta P$  a prodloužení pracovní části vzorku  $\Delta L$  v úvratích ustáleného zatěžovacího cyklu. Ostatní veličiny byly uloženy pro kontrolu a validaci výpočtu, např. pro srovnání vypočtené a naměřené široké hysterezní smyčky.

## 2.9.5 Vyhodnocení výsledků numerických simulací

Výše, v kap. 2.9.1 až 2.9.4, je uveden popis přípravy numerického modelu pro stanovení KK. V této kapitole je uveden popis zpracování výsledků numerické simulace a stanovení výsledné hodnoty KK.

## 2.9.5.1 Deformace na pracovní části ZT

V experimentální části projektu byly naplánovány 3 úrovně amplitudy deformace, pro které byly provedeny zkoušky NCÚ, přičemž hodnota amplitudy deformace na pracovní části ZT je řízena pomocí čidla posunutí. V numerických simulacích, které budou použity pro stanovení KK, je nutné dodržet odpovídající amplitudy deformace. Ta je řízena odpovídajícím posunutím na závitové části vzorku tak, aby průměrná celková deformace na pracovní části ZT odpovídala požadované amplitudě deformace, viz informace v bodě č. 4 kap. 2.9.4. Je doporučeno provádět průměrování deformace na vzdálenosti 10 mm (na každou stranu od středu pracovní části ZT 5 mm) z důvodu vlivu přechodových oblastí ZT na rozložení deformace na pracovní části. Více je tato problematika rozebrána v kap. 2.9.6.2.

## 2.9.5.2 Stanovení KK pomocí numerické simulace

Výpočet výsledné hodnoty KK vychází ze stanovení (změření nebo vypočtení) posunutí na pracovní a rozšířené části ZT, viz kap. 2.9.1. Z provedených numerických simulací, reprezentujících saturovaný stav (saturované deformační cykly), je potřeba pro určení KK znát:

- Posunutí ve dvou bodech definujících prodloužení pracovní části ZT. Vzdálenost bodů pro export posunutí je doporučena 10 mm (na každou stranu od středu pracovní části ZT 5 mm). Z těchto posunutí (ve dvou bodech) je potom stanoveno (osové) prodloužení pracovní časti ZT ΔL (úsečky délky 10 mm na pracovní části ZT).
- Posunutí rozšířené části ZT, kde je umístěno čidlo posuvu. Toto posunutí, stanovené z MKP modelu, odpovídá posunutí ΔP, které je ve skutečnosti konstrukci odečítáno indukčním čidlem posuvů, viz Obr. 2-2. Protože držák tyček je upevněn svěrným spojem na ZT po celé ploše spodní rozšířené části ZT, je posunutí z MKP modelu odečítáno jako průměrné osové posunutí celé spodní rozšířené části ZT.

Prodloužení  $\Delta L$  a posunutí  $\Delta P$  musí být stanovena v úvratích zatěžování, protože KK jsou experimentálně stanovovány taktéž v úvratích zatěžování. Výše popsané hodnoty  $\Delta L$  a  $\Delta P$  jsou potom přímým vstupem do vztahu (2.1) pro stanovení KK, který je uveden v kap. 2.9.1. Postup zpracování posunutí z numerických výsledků je uveden níže, v kap. 2.9.6.3.

> www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost

т

Č

Α

R



## 2.9.5.3 Kontrola naladění parametrů materiálového numerického modelu

Jako materiálové vstupy se do výpočtu použijí buď materiálové konstanty, anebo přímo experimentálně změřené tahové, cyklické nebo hysterezní křivky, resp. jejich části, jak je detailně uvedeno v kap. 2.9.3. Je doporučeno provést kontrolu naladění materiálových parametrů následujícím způsobem:

- Pokud jsou do výpočtu vloženy materiálové parametry pro širokou hysterezní smyčku či její tahovou část, viz výše, je doporučeno provést vykreslení a porovnání širokých hysterezních smyček z numerické simulace a z experimentálního měření.
- Pokud se do výpočtu vkládají parametry pro cyklickou křivku, je vhodné vykreslit z numerické simulace několik širokých hysterezních smyček a porovnat je v úvratích zatěžování s cyklickou deformační křivkou. Úvratě numericky stanovených širokých hysterezních smyček by měly ležet na experimentálně stanovené cyklické deformační křivce.

## 2.9.6 Příklad MKP výpočtu

Jako příklad pro osvětlené metodiky výpočtu KK byla zvolena hladina zatěžování s amplitudou deformace 0,9 %. Pro tuto amplitudu jsou největší plastické deformace, tedy zde existuje riziko největší nepřesnost mezi MKP simulací a experimentem.

V rámci stanovení hodnoty KK byl proveden výpočet na prezentovaném MKP modelu, který byl sestaven podle postupu doporučeného v kap. 2.9.4. Jako zvolený materiálový vstup byla využita změřená saturovaná hysterezní smyčka pro materiál 08Ch18N10T, získána z cyklického testování na hladině deformace 0,9 %, viz Obr. 2-12. Tato vybraná hysterezní smyčka byla zpracována a použita ve výpočtu.



Obr. 2-12 Saturovaná hysterezní smyčka použitá do testovacího výpočtu pro hladinu deformace 0,9 %.

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Jak bylo popsáno výše, je možné do programu Abaqus zadat tahovou část horní větve saturované hysterezní smyčky. Tohoto přístupu bylo využito spolu s kinematickým pravidlem Chabocheova modelu.

Data pro kinematické pravidlo byla zpracována dle výše uvedeného postupu, viz Obr. 2-11 a takto byla následně vložena do programu Abaqus.

Níže jsou prezentovány výsledky numerických simulací pro amplitudu deformace 0,9 %, která byla součástí experimentálního programu.

## 2.9.6.1 Rozložení napjatosti na ZT

Na Obr. 2-13 je uvedeno rozložení redukovaného napětí von Mises na ZT při hladině deformace 0,9 %. Je patrné, že maximální napětí je dosaženo v pracovní části ZT a to 470 MPa. Je patrné, že v přechodové oblasti ZT je značný gradient napětí.

Na Obr. 2-14 je uvedeno rozložení napětí v osovém směru ZT. Rozložení napjatosti v osovém směru svým rozložením odpovídá rozložení redukovaného napětí a ze zobrazených hodnot je patrné, že osová složka napjatosti je dominantní. Stejně jako u redukovaného napětí je patrný značný gradient v přechodové oblasti ZT.



Obr. 2-13 Rozložení redukovaného napětí von Mises v modelu při tahovém cyklu.

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí



Obr. 2-14 Rozložení osového napětí na pracovní části ZT, tahový cyklus – levá strana, tlakový cyklus – pravá strana

## 2.9.6.2 Rozložení deformace na ZT

Na Obr. 2-15 je uvedeno rozložení osové skutečné plastické deformace na ZT. Je patrné, že rozložení plastické deformace na pracovní části vzorku není zcela konstantní. Na obou koncích pracovní části ZT se v blízkosti přechodové oblasti uplatňuje změna tvaru a ještě před začátkem přechodové oblasti (tj. ještě v pracovní části ZT) dochází k poklesu plastické deformace. Dále je také patrný značný gradient plastické deformace na začátcích přechodových oblastí ZT. To odpovídá tomu, že plastická deformace s narůstajícím průměrem vzorku klesá a v rozšířené části je hodnota plastické deformace řádově nižší než na pracovní části ZT.

Na Obr. 2-16 je uveden průběh plastické, elastické a celkové deformace na pracovní části ZT při tahovém cyklu. Průběh je uveden od středu pracovní části až do jejího konce a částečně i v přechodové oblasti ZT (pracovní část je dlouhá 7,5 mm od středu ZT a na uvedeném obrázku je černou svislou čarou označen konec pracovní části ZT). Je patrné, že pro úroveň amplitudy celkové deformace 0,9 % je plastická složka dominantní a je skoro třikrát vyšší než elastická složka. Zhruba ve vzdálenosti 5 mm od středu vzorku dochází k poklesu plastické složky, a totéž platí i pro elastickou složku. Zde se již začíná uplatňovat tuhost přechodové oblasti, což ovlivňuje rozložení deformací na pracovní části.

PRO JADERNOU BEZPEČNOST



Obr. 2-15 Rozložení osové skutečné plastické deformace na ZT, tahový cyklus – levá strana, tlakový cyklus – pravá strana.



Obr. 2-16 Vyobrazení průběhů plastické a elastické složky osové deformace na pracovní části ZT.

Na dalším Obr. 2-17 je uveden průběh celkové osové deformace na pracovní části ZT. Deformace je stanovena jako průměrná deformace na vzdálenosti 10 mm (jde o poměrnou deformaci úsečky





s počáteční délkou 10 mm umístěné symetricky ve středu pracovní části vzorku), což odpovídá vzdálenosti měřicích bodů při experimentálním stanovení KK.



*Obr. 2-17 Průběh průměrné celkové osové deformace na pracovní části ZT – vzdálenost bodů 10 mm.* 

Pro kontrolu materiálového modelu je na Obr. 2-18 je uvedeno porovnání široké hysterezní smyčky z numerické simulace s experimentálním měřením. Z porovnání je patrná velmi dobrá shoda s experimentálními daty pro tahový i tlakový cyklus.





Α

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost





Obr. 2-18 Vykreslení široké hysterezní smyčky z experimentálního měření a z numerické simulace.

## 2.9.6.3 Stanovení KK z numerických simulací

Postup stanovení KK je uveden v kap. 2.9.1 a 2.9.5.2. Z výsledků numerické simulace pro hladinu zatěžování 0,9 % byly vyexportovány potřebné parametry pro stanovení KK. Dle definice uvedené v kap. 2.9.5.2 jsou potřebné vstupy pro určení KK:

- Posunutí ve dvou bodech umístěných symetricky na pracovní části ZT vzdálených od sebe 10 mm, viz Obr. 2-19,
- Posunutí spodní rozšířené části ZT, kde je umístěno čidlo posunutí Δ*P*, viz Obr. 2-20.

Z dostupných posunutí dvou bodů na pracovní části ZT bylo stanoveno prodloužení  $\Delta L$  pracovní části ZT (přesněji řečeno prodloužení úsečky délky 10 mm umístěné symetricky uprostřed pracovní části ZT) a posunutí rozšířené části ZT  $\Delta P$ , kde je uchyceno čidlo posuvů. Posunutí spodní rozšířené části ZT  $\Delta P$  bylo stanoveno jako průměrné posunutí celé spodní rozšířené části. Průběhy prodloužení  $\Delta L$  a posunutí  $\Delta P$  jsou zobrazeny na Obr. 2-20.



Т

Α

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost





Obr. 2-19 Posunutí bodů na pracovní části ZT ve vzdálenosti 10 mm.



Obr. 2-20 Průběhy prodloužení pracovní části (pro počáteční délku 10 mm) a posunutí spodní rozšířené části ZT.

Výsledná hodnota KK byla stanovena jako průměrná hodnota KK pro tahovou a tlakovou úvrať. Hodnota byla stanovena dle vztahu (2.1) uvedeného v kap. 2.9.1.

## 2.9.7 Souhrn kapitoly výpočtového stanovení korekčního faktoru

Kapitola 2.9 podrobně popisuje postup (vytvořenou metodiku) pro numerické stanovení kalibračních konstant (KK) pro zařízení Pluto 6. Tato metodika je přenositelná i pro jiná zařízení (autoklávy) a jiná zkušební tělesa (ZT), jejichž zatěžování je řízeno pomocí LVDT snímače.

TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí

T A Č R Tento projekt je financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu BETA2

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



Pro korektní numerické stanovení kalibračních konstant je důležité vytvořit MKP model ZT a definovat okrajové a zátěžné podmínky v souladu s experimentálním přístupem. Ke tvorbě MKP modelu a definici okrajových a zátěžných podmínek je potřeba přistupovat individuálně dle konfigurace autoklávu, geometrie a materiálu ZT, způsobu zatížení, podmínkám testů, způsobu měření a umístění čidla měření deformace atd. Kromě toho je pro korektní stanovení kalibračních konstant klíčové vhodně definovat a kalibrovat elasto-plastický materiálový model (konstitutivní model popisující plastickou část deformace). Tento model ovlivňuje rozložení celkové deformace na pracovní části a přechodových oblastech ZT a to má přímý vliv na správné stanovení kalibračních konstant. V této zprávě byl použit Chabocheův materiálový model. Ve stanoveném postupu ovšem není striktně definováno použití Chabocheova modelu, ale umožňuje využití i jiných konstitutivních modelů. **Vždy je nutné validovat použitý materiálový model s ohledem na požadovanou elasto-plastickou odezvu**. Podrobněji je nastavení MKP simulace popsáno v kapitole 2.9.4.

Pro dosažení co nejpřesnějších hodnot numericky stanovených KK se doporučuje určovat materiálové vlastnosti na základě saturovaných širokých hysterezních smyček získaných při únavových zkouškách. Tyto únavové zkoušky je vhodné provádět za podmínek odpovídajících navrženým podmínkám testů v autoklávu. Tyto podmínky zahrnují konkrétní teplotu, amplitudu deformace, typ zatěžování (např. symetrické zatěžování) a rychlost deformace.

Numericky stanovené kalibrační konstanty dle této metodiky jsou doporučené použít v experimentálním programu.

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



## 3 Závěr

Α

R

Т

Č

Byla vytvořen metodický postup pro zkoušky nízkocyklové únavy s vlivem prostředí. V úvodní části zprávy byly shrnuty normy související s metodikami zkoušení únavy kovových materiálů a vybrané postupy dle mezinárodní praxe a zkušeností z mezinárodních projektů věnovaných NCÚ. Na základě doporučení, praxe a existujících norem jsou následně v metodice definovány požadavky na realizaci zkoušek nízkocyklové únavy v prostředí v následujícím rozsahu:

- Materiál a dimenze zkušebních vzorků
- Testovací zařízení
- Postup provedení zkoušky
- Interpretace výsledků zkoušky:
  - Protokol z měření
  - Dokumentace stavu povrchu vzorku po provedení testu

Významná část práce byla věnována výpočtovému stanovení korekčního faktoru deformace pomocí MKP pro konkrétní testovací zařízení Pluto 6. Tento postup je obecně použitelný pro jakékoliv autoklávové zařízení pro únavové zkoušky.

Doporučuje se, v případě, že jsou k dispozici příslušná materiálová data a výpočetní nástroje, stanovovat KK MKP výpočtem. Dále se, pro dosažení co nejpřesnějších hodnot numericky stanovených KK doporučuje určovat materiálové vlastnosti na základě saturovaných širokých hysterezních smyček získaných při únavových zkouškách.

R

www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost



#### 4 Literatura

- [1] ČSN 42 0363 Zkoušky únavy kovů, Metodika zkoušek, 1987
- ASTM E606 Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2021 [2]
- [3] ISO/DIS 12106 Metallic materials - Fatigue testing - Axial-strain-controlled method, 2017
- [4] Fukuta; Effect of surface finish and loading on LCF, 2013
- [5] Le Duff; Simonovski, I.; Effect of loading signal shape and surface finish on LCF, 2010
- Vankeerberghen, M. et al.: Calculated Shoulder to Gauge Ratio of Fatigue Specimens in PWR [6] Environment, Open Access Metallurgy Journal, 2021
- Vankeerbeghen, M. et. Al.: Strain Control Correction for Fatigue Testing in LWR Environments, [7] PVP2020-21373, Pressure Vessels & Piping Conference (ASME), 2020 :
- [8] ČSN ISO 23788 (420393) Kovové materiály, Ověřování souososti strojů na zkoušení únavy, 2013
- [9] **INCEFA+ Specimen Manufacturing Instructions**, 2017
- ASM Handbook, Volume 12 Fractography, 2004 [10]
- ČSN ISO 8407, Koroze kovů a slitin Odstraňování korozních zplodin ze vzorků podrobených [11] korozním zkouškám, 2013
- Simonovski, I.; Mclennan, A.; Mottershead, K.; Gill, P.; Platts, N.; Bruchhausen, M.; Waters, J.L.; [12] Vankeerberghen, M.; Moreno, G.B.; Gomez, S.A.; Novotny, R.: Calculated Shoulder to Gauge Ratio of Fatigue Specimens in PWR Environment. Metals 2021, 11, 376. https://doi.org/10.3390/met11030376
- [13] FUMFERA, J, J DŽUGAN, J KUŽELKA, R PROCHÁZKA a M ŠPANIEL.: Strain-amplitude dependent cyclic hardening of 08Ch18N10T austenitic stainless steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, 179. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/179/1/012026
- HALAMA, Radim, Jaromír FUMFERA, Petr GÁL, Tadbhagya KUMAR a Alexandros [14] MARKOPOULOS. Modelling the Strain Range Dependent Cyclic Hardening of SS304 and 08Ch18N10T Stainless Steel with a Memory Surface. Metals. 2019, 9(8). ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9080832
- NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE A.S.I., SEKCE II, Charakteristiky materiálů pro [15] zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, NTD ASI-II-2020, 2020.
- R. Basan, M. Franulović, I. Prebil a R. Kunc, Study on Ramberg-Osgood and Chaboche models [16] for 42CrMo4 steel and some approximations, Journal of Constructional Steel Research, 2017.
- J. L. Caboche; J. Lemaitre, Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press, [17] Cambridge, 1990, ISBN: 0-521-47758-1.
- R. Halama, J. Sedlák, M. Šofer: Phenomenological Modelling of Cyclic Plasticity. Book -[18] Numerical modelling, 2012.
- LEMAÎTRE, J. Handbook of materials behavior models. San Diego, CA: Academic Press, c2001. [19] ISBN 9780124433410.
- [20] SIMONOVSKI, Igor, Alec MCLENNAN, Kevin MOTTERSHEAD, et al. Calculated Shoulder to Gauge Ratio of Fatigue Specimens in PWR Environment. Metals. 2021, 11(3). ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met11030376
- NUREG/CR-5704, ANL-98/31 [21]



www.tacr.cz Výzkum užitečný pro společnost





TITSSUJB039 – Návrh hodnocení únavové životnosti zařízení jaderných elektráren typu VVER se zahrnutím vlivu prostředí