

AV ČR, v. v. i.

Název:

V4: SOFTWARE A REPREZENTATIVNÍ MODEL – VÝZKUMNÁ ZPRÁVA POPISUJÍCÍ VÝPOČETNÍ MODELY

Autoři:

Ing. Jan Štefan, Ph.D.; Ing. Dušan Gabriel, Ph.D.; Ing. Jan Masák.; Ing. Josef Krofta, Ph.D.; Ing. Michal Mračko; Ing. Aleš Materna, Ph.D.; Ing. Ondřej Kovářík, Ph.D.; Ing. Jaroslav Joch, CSc.

Obory podle RIV:		OECD kód:
JF - Jaderná energetika		20305
JS - Řízení spolehlivosti a kvality, zkušebnictví		20306
JL - Únava materiálu a lomová mechanika		20306
Počet stran textu: 26	Počet obrázků: 17	

Počet a druh příloh: 3

Souhrn:

Tato výzkumná zpráva tvoří součást závazného výstupu "V4: Software a reprezentativní model" projektu TK01030108 (NEMENUS), který je podle metodologie poskytovatele podpory – Technologické agentury České republiky – výstupem typu "R – software". Výstup je v rámci projektu pracovně označován jako digitální dvojče a sestává ze dvou částí. Tou první je model únavové životnosti, který slouží k provádění numerických simulací kinetiky šíření únavové trhliny modelovou konstrukcí ve formě potrubí mechanicky zatěžovaného cyklickým čtyřbodovým ohybem. Druhou částí je model ultrazvukových vln, který provádí numerické simulace šíření vln vysílaných do modelové konstrukce s defektem prostřednictvím piezoelektrických budičů, a který slouží k hodnocení odezvy konstrukce na toto buzení. Cílem této zprávy je podat podrobné informace o principu fungování modelů, podat srozumitelnou formou manuál k ovládání modelů a prezentovat vybrané konkrétní výsledky simulací.

Vazba na předchozí zprávy autora nebo na zprávy vydané v rámci téhož úkolu:

Tato zpráva částečně navazuje na zprávu Z1603/19 vypracovanou v rámci téhož projektu.

Číslo a název úkolu:

404180 – projekt TAČR TK01030108: Inovativní posuzování bezpečnosti jaderných elektráren na základě nových technologií SHM a návazných procedur-NEMENUS (New Methods for Nuclear Safety)

Vedoucí pracovník úkolu: Ing. Jaroslav Joch, CSc.	Vydáno dne:
Vedoucí oddělení: Ing. Dušan Gabriel, Ph.D.	Pořadové číslo výtisku:
Ředitel ústavu: doc. Ing. Miroslav Chomát, CSc.	Knihovní záznamy:

Výzkumná zpráva č. Z 1631/21

ÚSTAV TERMOMECHANIKY AV ČR, v. v. i.

V4: Software a reprezentativní model – výzkumná zpráva popisující výpočetní modely

Výsledek č. 4 projektu TK01030108: Inovativní posuzování bezpečnosti jaderných elektráren na základě nových technologií SHM a návazných procedur - NEMENUS (New Methods for Nuclear Safety)

Autoři:

Ing. Jan Štefan, Ph.D. ^(1, 2); Ing. Dušan Gabriel, Ph.D. ⁽¹⁾; Ing. Jan Masák ⁽¹⁾; Ing. Josef Krofta, Ph.D. ⁽¹⁾; Ing. Michal Mračko ⁽¹⁾; Ing. Aleš Materna, Ph.D. ⁽²⁾; Ing. Ondřej Kovářík, Ph.D. ⁽²⁾ Ing. Jaroslav Joch, CSc. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i. Dolejškova 1402/5, 18200 Praha.
 ⁽²⁾ České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra materiálů (ČVUT-FJFI-KMAT). Trojanova 13, 120 00 Praha.

© Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i. 2021

Obsah

Obsahi				
Seznam zkratek a veličinii				
1. Úvod				
2. Model únavové životnosti				
2.1 Definice řešené úlohy 5				
2.2 Experimentální aparatura, potrubní zkušební tělesa, modelová zjednodušení 6				
2.3 Lomově mechanické výpočty pro kinetiku únavové trhliny11				
2.4 Zdrojový kód modelu únavové životnosti / technický manuál k obsluze 12				
2.5 Výsledky simulací				
3. Model ultrazvukových vln 17				
3.1 Základní informace17				
3.2 Popis modelu				
3.2.1 Použité programové vybavení				
3.2.2 Definice řešené úlohy				
3.3 Výsledky simulací				
3.3.1 Model potrubí z materiálu Ochnotu bez vlnovodů19				
3.3.2 Model potrubí z materiálu 12ChM s vlnovody				
3.3.3 Souhrnné zhodnocení modelu ultrazvukových vln				
4. Závěr				
Seznam příloh				
Bibliografie				

Seznam zkratek a veličin

<u>Zkratka</u>	<u>Význam</u>		
ČVUT-FJFI-KMAT	České vysoké učení technické – Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská – Katedra materiálů		
FA	fraktografická analýza		
JE	jaderná elektrárna		
МКР	metoda konečných prvků		
NDT	"Non-Destructive Testing" – nedestruktivní zkoušení		
NWMS	"Nonlinear wave modulation spectroscopy"		
SEM	"Scanning electron microscope" – řádkovací elektronový mikroskop		
SHM	"Structural Health Monitoring"		
TAČR	Technologická agentura České republiky		
TWIN	"Digital twin" – digitální dvojče		
UT	"Ultrasound testing" – ultrazvukové metody (NDT)		
ÚTAV	Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.		
ZS	zkušební stroj / zkušební systém		
ZT	zkušební těleso		

veličina	popis	
a (mm)	hloubka eliptické trhliny v trubce	
2c (mm)	"obvodová délka" eliptické trhliny v trubce,	
	$2c = D \arcsin\left(\frac{2c}{D}\right)$	
	viz obr. 2-3 na str. 7.	
2 <i>c</i> * (<i>mm</i>)	"tětivová délka eliptické trhliny" – délka hlavní poloosy eliptické trhliny v trubce, viz obr. 2-3 na str. 7.	
D (mm)	vnější průměr trubky	
f (Hz)	frekvence cyklického zatěžování	
$J_y (mm^4)$	kvadratický moment průřezu trubkovitého ZT pro ohybové namáhání	
$K (MPa m^{1/2})$	faktor intenzity napětí	
M (Nm)	ohybový moment	
N (-, c, kc)	počet zátěžných cyklů při únavové zkoušce; uváděno zpravidla v jednotkách tisíců cyklů (kc)	
P(N,kN)	zátěžná síla	
R (-)	parametr asymetrie cyklu, $R = P_{min}/P_{max}$	
$S_1(mm)$	rozteč dvojice válečků na hlavici působící zatížení ZT (S "Span")	
$S_2(mm)$	rozteč podpor v uložení ZT	
t (mm)	tloušťka stěny trubky	
v (mm/c)	rychlost únavového šíření trhliny, $v = da/dN$	
Y (-)	tvarová funkce pro faktor intenzity napětí	

<u>index</u>	<u>Význam</u>	
_0	počáteční hodnota	
_min	minimum v cyklu	
_max	maximum v cyklu	
Δ	rozkmit, $\Delta X = X_{max} - X_{min}$	
_a	amplituda, $X_a = \Delta X/2$	
m	střední hodnota: $X_m = (X_{min} + X_{max})/2$	

1. Úvod

Tato výzkumná zpráva tvoří součást závazného výstupu "V4: Software a reprezentativní model" projektu TK01030108 (NEMENUS), který je podle metodologie poskytovatele podpory – Technologické agentury České republiky – výstupem typu "R – software". Výstup je v rámci projektu pracovně označován jako digitální dvojče (TWIN) a do kontextu odborného řešení projektu zapadá tím způsobem, že tvoří jednu z významných komponent hlavního výstupu projektu (výstup V6), kterým je tzv. reprezentativní SHM model (RSHMM). RSHMM je v podstatě laboratorní model (funkční vzorek), na němž má být demonstrován možný způsob monitorování vytipovaného mechanismu provozní degradace, se kterými se setkávají provozovatelé českých jaderných elektráren (JE), a na němž má být současně prokázána schopnost predikce rozvoje poškození, resp. zajištění včasné indikace mezního stavu konstrukce. Mezi hlavní komponenty RSHMM patří zejména:

- modelová konstrukce (tj. zkušebního tělesa, ZT) ve formě segmentu bezešvého ocelového potrubí s lokálním defektem vrubem,
- servohydraulický zkušební stroj (ZS),
- experimentální aparatury nedestruktivního testování (NDT),
- digitální dvojče (V4).

Ve zkušebním stroji je ZT podrobeno dlouhodobému časově proměnlivému mechanickému zatěžování, které vyvolává proces únavového porušování potrubí, tedy jeden z klasických scénářů provozní degradace. Prostřednictvím NDT snímačů instalovaných na povrchu ZT a návazných aparatur je prováděno nedestruktivní monitorování rozvoje únavového porušování, tj. šíření únavové trhliny.

Digitální dvojče, které celý systém zastřešuje, je v podstatě počítačovým programem pracujícím částečně na bázi metody konečných prvků (MKP), který má za úkol co nejpřesněji reprezentovat modelovou potrubní konstrukci a sloužit k provádění základních numerických simulací. TWIN tedy plní funkci výpočetní podpory, a je rozděleno na dva modely:

- 1) Model únavové životnosti slouží k provádění numerických simulací kinetiky šíření únavové trhliny cyklicky zatěžovaným potrubím. Cílem modelu je tedy zajistit prognózu kinetiky únavového šíření trhliny na bázi poznatků lomové mechaniky.
- 2) Model ultrazvukových vln provádí simulace šíření vln vysílaných do konstrukce prostřednictvím piezoelektrických budičů a slouží k hodnocení její odezvy na toto buzení, resp. zajišťuje tímto způsobem podporu ultrazvukovým NDT metodám.

Cílem této výzkumné zprávy je podat podrobné informace o principu fungování modelů, podat srozumitelnou formou manuál k ovládání modelů a prezentovat vybrané konkrétní výsledky simulací. Zpráva je strukturována do dvou hlavních kapitol, ve kterých jsou samostatně popsány oba výpočetní modely. Každá z kapitol zahrnuje:

- definice řešených úloh,
- popis přijatých modelových zjednodušení úloh,
- popis elementárních principů modelů, resp. numerických a výpočetních metod,
- systematický popis zdrojových kódů a návod k obsluze programů,
- prezentace vybraných výsledků získaných při řešení konkrétních úloh.

2. Model únavové životnosti

2.1 Definice řešené úlohy

Cílem úlohy bylo vyvinout počítačový model, který je schopen provádět numerickou simulaci kinetiky únavového porušování potrubních zkušebních těles vyvolaného časově proměnlivým mechanickým zatěžováním v experimentech prováděných v rámci projektu NEMENUS.

Únavové experimenty jsou prováděny v Laboratoři termomechaniky materiálů Ústavu termomechaniky (ÚTAV) na zkušebním systému, jehož základem je servohydraulický stroj Instron 8852, který je pro potřeby projektu konstrukčně upraven speciálním ohybovým přípravkem. Obrázek 2-1 dokumentuje uložení ZT ve dvojici podpor – ložiskových domků. Horní zatěžovací hlavice pevně spojená pístem stroje působí na ZT shora dynamickým cyklickým tlakovým zatěžováním skrze dvojici kontaktních bodů – ocelových válečků. Tímto způsobem je ve střední části trubky, ve které se nachází vrub, vyvíjen stav ohybové napjatosti vyvolávající růst únavové trhliny.





Jiným slovy, model únavové životnosti je program, který je schopen na základě vstupních dat vyhodnotit rychlost šíření trhliny, resp. závislost hloubky trhliny na počtu zátěžných cyklů, tedy závislost a = a(N), která je hlavním výstupem modelu. Mezi nezbytná vstupní data modelu patří zejména:

- tvar a rozměry potrubního ZT,
- tvar a rozměry počátečního defektu vrubu,
- geometrické parametry uložení ZT v ohybovém přípravku ZS,
- parametry dynamického cyklického mechanického zatěžování ZT ve stroji, včetně případných změn těchto parametrů v učiněných v průběhu experimentů,
- mechanické vlastnosti materiálů potrubních těles.

Vývoj modelu byl přitom realizován pro dva typy potrubí ze dvou odlišných typů ocelí, které se sice významně liší v obsahu legur, struktuře a vlastnostech, avšak které jsou obě zároveň citovány Normativní technickou dokumentací Asociace strojního inženýrů [1] a poradenskou příručkou [2] jako materiály doporučené pro primární potrubí JE s reaktory typu VVER:

1) austenitická korozivzdorná ocel 08Ch18N10T, tzv. "Ochnot" – nerezová ocel charakterizovaná velmi vysokou tažností a houževnatostí,

(1)

2) feritická nízkolegovaná chrom-molybdenová ocel **12ChM** (ČSN 15 121) pro tlaková zařízení za zvýšených teplot.

V navazujících kapitolách je podán podrobný popis všech výše uvedených aspektů vyvinutého únavového modelu včetně popisu lomově mechanických výpočtů a stručné uživatelské příručky. V poslední kapitole pak budou prezentovány výsledky simulací a jejich porovnání s výsledky experimentů.

2.2 Experimentální aparatura, potrubní zkušební tělesa, modelová zjednodušení

Geometrie experimentální sestavy

Základní modelové zjednodušení úlohy spočívalo v aproximaci trubkovitého ZT nosníkem délky L = 1000 mm umístěném na podporách s předepsanou roztečí $S_2 = 800 \text{ mm} - \text{viz}$ obr. 2-2. Zatížení bylo realizováno přes dvojici horních kontaktních bodů s roztečí $S_2 = 400 \text{ mm}$. Jedná se tedy o klasický čtyřbodový ohyb, který podle teorie pružnosti a pevnosti vyvolá ve střední sekci ideálního přímého prutu, tj. v sekci nacházející se mezi dvojicí zatěžovacích bodů, stav čistého ohybu. Ohybový moment M vyvolaný celkovou silou pístu P je roven:



Obr. 2-2: Modelové zjednodušení potrubního ZT s defektem uložené ve dvojici ložiskových domků a zatěžované cyklickým tlakem horního pístu.

Modelový nosník má prstencový profil o vnějším nominálním průměru D = 60,3 mma tloušťce stěny t = 8,74 mm pro trubky z materiálu Ochnotu, resp. t = 11 mm pro trubky z feritické oceli 12ChM. Ohyb trubky vyvolává v jejím příčném průřezu axiální napětí σ působící rovnoběžně s hlavní osou nosníku, které roste se vzdáleností od neutrální osy a dosahuje maximální hodnoty v krajním vlákně, tzn. na vnějším povrchu trubky. Maximální napětí je v ideálním prstencovém profilu bez vrubu rovno:

$$\sigma_{max} = M D / (2 J_y) \tag{2}$$

resp. rozkmit napětí je definován rozkmitem ohybového omentu, resp. zátěžné síly:

$$\Delta \sigma_{max} = \Delta M D / (2 J_y) \tag{3}$$

 J_v je kvadratický moment příčného průřezu definovaný vztahem:

$$J_{y} = \frac{\pi}{64} \left[D^{4} - (D - 2t)^{4} \right]$$
(4)

Geometrie vrubu

Obrázek 2-3 schematicky znázorňuje příčný průřez trubkovitého zkušebního tělesa ve vzdálenosti 500 mm od obou konců ZT, tzn. přesně v místě vrubu, a dokumentuje charakteristické rozměry ZT (D, t) a únavové trhliny šířící se z vrubu $(a, 2c, 2c^*)$. Výroba vrubů je v kompetenci partnerské společnosti ATG, s. r. o. která pro tento účel používá technologii laserového vypalování.



Obr. 2-3: Profil trubky v oblasti defektu eliptického tvaru umístěného na vnějším povrchu trubky.

Parametry počátečního defektu, tj. geometrie, rozměry a další charakteristiky vrubu, mají na proces únavového porušování potrubního tělesa naprosto zásadní vliv. Při vývoji modelu únavové životnosti byly z tohoto důvodu zohledněny informace získané prostřednictvím tzv. fraktografické analýzy (FA), tedy metody pozorování a hodnocení lomových ploch porušených ZT s využitím technik řádkovací elektronové mikroskopie ("scanning electron microscopy", SEM) a světelné mikroskopie. V následující pasáži jsou shrnuty nejdůležitější zobecněné poznatky o charakteru vrubu a kinetice šíření únavových trhlin, které se podařilo získat prostřednictvím FA všech doposud testovaných, tj. zcela porušených potrubních ZT. Na úplný závěr jsou pak prezentovány hlavní závěry, které z těchto poznatků vyplývají pro modelování a numerické simulace procesu únavového šíření trhlin.

Na obrázku 2-4 je zobrazen odřezek lomové plochy zkušebního tělesa z materiálu Ochnotu porušeného v experimentu #3. Snímek zachycuje polohu lokálního vrubu vypáleného laserem na vnějším povrchu ZT a několik tzv. postupových čar, které byly v průběhu únavového experimentu záměrně vytvořeny procesem přetížení ZT. Postupové čáry slouží při FA jako fraktografické značky, které jednoznačně identifikují tvar a rozměry únavové trhliny po definovaném počtu zátěžných cyklů. Např. čáry (a), (b) odpovídají porušenému stavu ZT, kdy trhlina již prorostla přes vnitřní stěnu trubky. Čára (c) identifikuje stav poškození trubky při poslední odstávce provedené před průnikem trhliny k vnitřnímu povrchu. Čára (c) společně s řadou předcházejících postupových čar pak dokazuje, že rostoucí únavová trhlina byla v souladu s předpoklady skutečně charakterizována zhruba eliptickým tvarem. Další důležité informace jsou dokumentovány formou série snímků na obr. 2-5 a 2-6 dokumentujících tutéž lomovou plochu pomocí SEM:

- Vrub je možné charakterizovat jako oblast masivního hloubkového podtavení vyvolaného laserovým vypalováním. Zhruba do poloviční hloubky je podtavení odstraněno mechanickým obrobením.
- Z hlediska mikromorfologie je možné oblast podtavení charakterizovat zhruba jako soustavu paralelně seřazených "krápníkovitých" dutin. Soustavu hrotů krápníků zobrazených na obr. 2-5d-f lze považovat za součást reálného kořene vrubu.

- Poloměr kořene vrubu lze na základě obrazové dokumentace odhadnout v řádu jednotek mikrometrů. To činí z vrubu mimořádně ostrý útvar, ze kterého může velmi snadno a rychle iniciovat únavová trhlina. Podrobnější fraktografickou analýzou se podařilo prokázat, že se trhlina začala z vrubu šířit prakticky okamžitě.
- Z obr. 2-5c-d a celé série snímků 2-6 vyplývá zásadní informace, že první postupová čára (označená šipkami) kopíruje tvar vrubu. Tato skutečnost dokládá, že na začátku testu došlo k iniciaci únavové trhliny rovnoměrně podél kořene vrubu.

Z výše doložených faktů vyplývají pro modelování / numerickou simulaci únavového šíření trhliny následující významné závěry:

- Navzdory morfologické komplikovanosti výchozího defektu (vrubu) způsobené technologií laserového vypalování vede aplikace definovaného typu cyklického zatěžování vždy k vytvoření únavové trhliny, která v nejranějších etapách šíření nejprve kopíruje kořen vrubu (zhruba trojúhelníkového tvaru) a následně se velmi brzy změní do tvaru "půlelipsy". Vyvinutý model únavové životnosti aproximuje trhlinu jako symetrický <u>semieliptický</u> útvar v rovině kolmé na hlavní osu trubky.
- Naprosto zásadní zjištění spočívá v tom, že v rámci "únavového života" potrubních ZT cyklicky zatěžovaných v našich experimentech prakticky chybí etapa nukleace a šíření mikrotrhliny (trhliny). Resp. etapy nukleace a šíření mikrotrhliny jsou vzhledem k celkové životnosti trubky (řádově ~10⁵ zátěžných cyklů) zcela zanedbatelné. Z toho vyplývá, že na rozdíl od klasického scénáře únavového života konstrukcí sestávajícího z etap "nukleace šíření mikrotrhliny šíření makrotrhliny dolom" [3] je celý experiment výhradně šířením makrotrhliny, tedy defektu hloubky větší než 1 mm.
- Z předešlého závěru vyplývá, že pro simulaci šíření únavové makrotrhliny v trubkovitém ZT lze použít poznatků lineární lomové mechaniky. Jinými slovy, pro vyvinutý model únavové životnosti není relevantní tzv. problematika krátkých trhlin, u kterých jsou tyto poznatky zpochybněny [3].
- Pozn.: V případě mikrotrhlin o rozměrech srovnatelných se strukturními zrny je vliv mikrotrhliny jako vrubu zanedbatelný a rozhodující jsou zde procesy plastické deformace povrchových zrn. Platnost poznatků lineární lomové mechaniky může být pro různé materiály narušena až do rozměru řádově ~10¹ průměrů zrn. Velikost zrn byla v materiálu potrubí z Ochnotu prostřednictvím metalografického rozboru vyhodnocena na zhruba 44 μm – viz výzkumnou zprávu E-KMAT-1095/20 [4] odevzdanou ve formě přílohy k průběžné zprávě projektu NEMENUS za rok 2020. Struktura materiálu potrubí z 12ChM byla ještě jemnější – byla charakterizována zhruba polovičním rozměrem zrn.



Obr. 2-4: Lomová plocha zkušebního tělesa z materiálu Ochnotu porušeného v experimentu #3.



Obr. 2-5: Detailní fraktografická dokumentace oblasti vrubu z obrázku 2-4 pořízená v řádkovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Detailní snímky špiček "krápníkovitých" útvarů (d, e ,f) vytvořených důsledkem hloubkového podtavení, na které navazuje oblast únavového šíření trhliny.



Obr. 2-6: První postupová čára za kořenem vrubu vyvolaná procesem jednorázového přetížení ZT. Na obr. "b" lze identifikovat také druhou postupovou čáru (označeno druhou šipkou).

2.3 Lomově mechanické výpočty pro kinetiku únavové trhliny

K popisu napjatosti v potrubním ZT s trhlinou se v modelu používá faktor intenzity napětí ("stress intensity factor") K závisejícím obecně na geometrických parametrech ZT, geometrii trhliny a intenzitě zatížení. Pro výpočet faktoru intenzity napětí platí základní vztah:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} Y \tag{5}$$

Pro výpočet napětí σ lze použít sérii vztahů (1) až (4). Y je tzv. tvarová funkce závisející na mnoha geometrických parametrech. Pro vnější eliptickou trhlinu v trubce existuje celá řada řešení, viz např. publikace [5–8]. Pro náš konkrétní model bylo adoptováno řešení z publikace [6], ve které jsou hodnoty tvarové funkce tabelovány pro různé kombinace poměrů délky a hloubky trhliny (c/a), hloubky trhliny a tloušťky stěny (a/t) a vnitřního poloměru trubky a tloušťky stěny (R_i/t).

V rámci vývoje vlastního modelu byla realizována simulace s využitím metody konečných prvků, jejímž cílem bylo získat vlastní nezávislé ověření vztahu (5) pro naši konkrétní úlohu při aplikaci tvarové funkce Y podle [6]. Simulace byla provedena pro konkrétní hodnotu hloubky a = 4 mm. Podrobný popis MKP simulace a jejích výsledků lze nalézt ve výzkumné zprávě ČVUT-FJFI-KMAT číslo VKMAT-1088-20 [9], která bude odevzdána v lednu 2022 ve formě přílohy Odborné zprávy k průběžné zprávě projektu NEMENUS za rok 2021. Výsledky vlastní MKP simulace potvrdily velmi uspokojivou shodu s popsanou metodou. Díky tomu bylo možné pro následný vývoj modelu kinetiky únavového šíření používat namísto náročných MKP simulací vztahy podle [6] a tím docílit razantního zjednodušení modelu a úspory celkové výpočetní náročnosti úlohy.

Princip modelu kinetiky únavového šíření spočívá v empirické závislosti mezi rychlostí šíření trhliny v a rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK . Ten je obecně definován vztahem (6) analogickým k (5):

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \, Y \tag{6}$$

V průběhu cyklování dochází ke vzniku lokálních tlakových pnutí, která přitlačují líce trhliny k sobě a tím ji uzavírají. Pro kinetiku trhliny je rozhodující efektivní část cyklu, ve které je trhlina zcela otevřena. Efektivní rozkmit faktoru intenzity napětí je dán vztahem:

$$\Delta K_{eff} = U \,\Delta K \tag{7}$$

Parametr *U* závisí zejména na asymetrii zátěžných cyklů *R* a stavu napjatosti před čelem trhliny. Závislosti U = U(R) jsou pro různé skupiny materiálů různé.

Růstovou křivku lze vyjádřit tzv. Formanovým vztahem:

$$v = C \left(\Delta K_{\rm eff}\right)^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{\rm th}}{\Delta K}\right)^p}{\left(1 - \frac{K_{\rm max}}{K_{\rm c}}\right)^q},\tag{8}$$

C, n, p, q, ΔK_{th} , K_c jsou materiálové parametry charakterizující kinetiku únavového šíření trhliny. Za účelem vyhodnocení těchto parametrů pro oba hodnocené materiály bylo přijato rozhodnutí o realizaci vedlejšího experimentálního programu testování lokálních mechanických vlastností. Program spočíval v odběru miniaturních vzorků z přebytečných kusů potrubních polotovarů, výrobě ZT pro únavové testy a jejich otestování na unikátním zkušebním zařízení KMAT, tzv. "Surface Fatigue Tester" / "Kmitátko" [10–12]. Vedle toho byl také proveden metalografický rozbor materiálu a standardní tahové zkoušky pro vyhodnocení elastických modulů, meze pevnosti, meze kluzu, atd.

Výsledky programu testování lokálních materiálových vlastností Ochnotu byly publikovány ve výzkumných zprávách ČVUT-FJFI-KMAT číslo E-KMAT-1092/20 [13] a číslo E-KMAT-1095/20 [4], které byly odevzdány formou příloh průběžné zprávy za rok 2020. Výsledky téhož programu zaměřeného na feritický materiál 12ChM jsou zdokumentovány formou výzkumných zpráv E-KMAT-1118/21 [14] a E-KMAT-1136/21 [15], které budou předloženy současně s průběžnou zprávou za rok 2021 odevzdávanou v lednu 2022.

2.4 Zdrojový kód modelu únavové životnosti / technický manuál k obsluze

Zdrojový kód modelu únavové životnosti je poskytnut ve formě balíku textových souborů a tvoří přílohu č. 1 této zprávy. Prostým přejmenováním souborů z formátu ".txt" do formátu ".m" je lze transformovat ve skripty, které lze spustit v programovacím prostředí MATLAB. Balík modelu únavové životnosti sestává z pěti skriptů:

- 1) *CPS* ("central processing script")
 - ústřední skript, kterým lze v programovacím prostředí MATLAB spustit simulaci šíření únavové trhliny
- 2) calculationCrackKinetics
 - skript, který je vyvolán při spuštění skriptu CPS a který provádí samotný výpočet šíření trhliny
- 3) Kfaktor
 - funkce pro výpočet faktoru intenzity napětí
- 4) *v_DK*
 - funkce pro výpočet rychlosti únavového šíření trhliny
- 5) v_12ChM_Segment
 - funkce popisující křivku $v = v(\Delta K_{eff})$ pro materiál 12ChM

Celý zdrojový kód je ve skriptech doprovázen detailními komentáři, které uživatele informují o fungování jednotlivých sekcí a zároveň jej srozumitelnou formou navádějí k nastavení adekvátních parametrů výpočtů. Kromě toho je zdrojový kód stručně a přehledně zdokumentován v následující pasáži, kterou lze považovat za stručný manuál k obsluze:

<u>Skript CPS</u>

- SEKCE 01 Sekce pro zadání parametrů výpočtu: geometrie trubky: D(mm), t(mm), geometrie experimentální aparatury: $S_1(mm)$, $S_2(mm)$, velikost výchozího defektu $a_0 \equiv a(1) (mm)$, $c_0 \equiv c(1) (mm)$, úrovně cyklického zatěžování P_{min} (N), P_{max} (N), atd.
- SEKCE 02 Automatický výpočet ohybového momentu M (N mm) a ohybového napětí σ_{max} (MPa) v trubce na základě rovnic (1) až (4).
- SEKCE 03 Definice a názvy adresářů pro ukládání vyhodnocených dat.
- SEKCE 04 Na základě geometrických parametrů trubky a vrubu a parametrů zatížení dosazených v sekci 01 je proveden výpočet počátečních hodnot rozkmitu faktoru intenzity napětí v referenčních místech *A*, *C* (viz obr. 2-3). Tento výpočet slouží k získání rychlého odhadu o skutečné počáteční intenzitě namáhání trubky.

SEKCE 05 Spuštění skriptu "calculationCrackKinetics", který spustí numerickou simulaci únavového šíření trhliny.

Doporučení: Výpočet může být v závislosti na dosazených parametrech geometrie a intenzity zatěžování poměrně zdlouhavý, a to zejména v případě volby příliš nízké zátěžné síly P v kombinaci s malými rozměry počáteční trhliny a_0 , c_0 . Z tohoto důvodu se doporučuje před zahájením simulace dočasně deaktivovat sekci 05 (např. "zakomentováním" textu "calculationCrackKinetics"), tj. spustit skript CPS bez sekce 05. Prostřednictvím sekce 04 jsou vyhodnoceny počáteční hodnoty rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK_{A0} ($MPa \ m^{1/2}$), ΔK_{C0} ($MPa \ m^{1/2}$) a následně je možné ověřit, zda se tyto hodnoty nachází v adekvátní části růstové křivky $v(\Delta K)$, viz obr. 2-7 a 2-8.





Obr. 2-7: Růstové křivky vyhodnocené pro nerezový materiál potrubí, Ochnot, na trojici miniaturních ZT odebraných ze stěny trubky.



Obr. 2-8: Růstové křivky vyhodnocené pro feritický materiál potrubí, 12ChM, na trojici miniaturních ZT odebraných ze stěny trubky.

<u>Skript calculationCrackKinetics</u>

- SEKCE 01 Vlastní simulace kinetiky únavového šíření trhliny spočívající v opakování několika dílčích kroků:
 - Výpočet rozkmitu faktoru intenzity napětí na kraji ΔK_c a uprostřed čela trhliny ΔK_A , a to prostřednictvím skriptu *Kfaktor*
 - Snížení rozkmitu faktoru intenzity napětí na kraji čela o 10 %, tj. rozhodná veličina pro výpočet rychlosti šíření na kraji čela je 0,9 ΔK_c . Tento empirický koeficient odráží rozdílné stísnění materiálu podél čela trhliny a umožňuje lépe vystihnout skutečný tvar čel trhliny [16].
 - Přepočet na efektivní část cyklu s využitím parametru *U* (vztah 7).
 - Výpočet rychlosti pro kraj a střed čela podle vztahu (8).
 - Výpočet přírůstku délky trhliny za přírůstek počtu cyklů ΔN na kraji a ve středu čela podle vztahu $\Delta c = \frac{dc}{dN} \Delta N$, $\Delta a = \frac{da}{dN} \Delta N$, a sice prostřednictvím skriptu $v_D K$
 - \blacktriangleright Přírůstek ΔN byl nastaven na 1 cyklus, což sice značně prodlužuje dobu simulace, ale současně zpřesňuje vyhodnocení celkové doby růstu trhliny.



Obr. 2-9: Zobrazení výsledku numerické simulace šíření trhliny v nerezové trubce. Postupové čáry dokumentují přírůstky trhliny v intervalu 10 000 cyklů.

<u>Skript Kfaktor</u>

Skript definuje funkci, která na základě vstupních hodnot *c*, *a*, *D*, *t*, $\Delta\sigma_{max}$ provede výpočet rozkmitu faktoru intenzity napětí na okraji (ΔK_C) a uprostřed čela trhliny (ΔK_A). Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3, při výpočtu faktoru intenzity napětí podle vztahu (5) se tvarová funkce *Y* vyhodnocuje na základě tabulkových hodnot z publikace [6]. Tabulkové hodnoty jsou v rámci modelu interpolovány a extrapolovány pro celou oblast šíření ve studované geometrické konfigurace trubky s trhlinou, a to s využitím Akimova algoritmu, který modifikuje Hermitovu po částech kubickou interpolaci v místě lokálních extrémů (v prostředí Matlab funkce 'interpn' s parametrem 'makima').

Skript (1) v DK a skript (2) v 12ChM Segment

Skript v_DK definuje funkci, která na základě vstupní hodnoty ΔK vyhodnotí okamžitou hodnotu rychlosti šíření trhliny v (mm/cyklus). Skript v_DK je rozvětven prostřednictvím funkce *switch*, která na základě vstupního parametru *material* aktivuje buď formanovský vztah (8) pro výpočet Ochnotu, nebo skript $v_12ChM_segment$ pro výpočet feritu 12ChM. Důvod odlišnosti ve výpočtu pro každý z materiálů spočívá v tom, že růstovou křivku $v(\Delta K)$ materiálu 12ChM nebylo možné dostatečně přesně reprezentovat funkcí formanovského typu (8), a to kvůli atypickému tvaru růstové křivky. Jak je vidět na obrázku 2-8, v parisovské oblasti, která je standardně charakterizovaná lineární závislostí mezi log(v) a log(ΔK), byla zhruba kolem $\Delta K \approx 18 MPa m^{1/2}$ identifikována změna směrnice křivky. Z tohoto důvodu byla růstová křivka 12ChM definována prostřednictvím lineární lomené funkce ve skriptu $v_12ChM_segment$.

2.5 Výsledky simulací

Model únavové životnosti byl nejprve vyvíjen pouze pro materiál 08Ch18N10T – Ochnot. První výsledky numerických simulací byly prezentovány v odborné zprávě tvořící přílohu výroční průběžné zprávy projektu za rok 2020, která byla odevzdána v lednu 2021. Ve zprávě byly prezentovány výsledky numerické simulace a jejich porovnání s experimentem #2 realizovaném na potrubním ZT z Ochnotu v říjnu 2020. Byla konstatována velmi dobrá shoda výsledků numerické simulace s experimentálním pozorováním.

V mezičase došlo v rámci vývoje reprezentativního SHM modelu k zásadnímu rozhodnutí spočívajícímu ve změně materiálu potrubí, tedy k přechodu na alternativní feritický materiál 12ChM. Rozhodnutí bylo motivováno mnoha faktory, z nichž ten nejzásadnější spočíval v podstatě v nepříznivých vlastnostech materiálu Ochnotu z hlediska šíření akustických / ultrazvukových vln (silný útlum materiálu), které způsobovaly významné komplikace při vývoji a ladění nedestruktivních diagnostických prvků vyvíjeného systému. Navíc bylo rozhodnuto, že definitivní reprezentativní funkční vzorek, který je hlavním závazným výstupem (V6) projektu bude též sestrojen na feritickém potrubí. Z tohoto důvodu bude následující pasáž zaměřena na výsledky pro materiál 12ChM.

V době zpracování této zprávy jsou k dispozici experimentální data z dvojice únavových testů provedených v průběhu roku 2021 na potrubních ZT z materiálu 12ChM; v kontextu celého vývoje se jedná o experimenty č. 4 a č. 5. V experimentu č. 4 se bohužel nepodařilo vyhodnotit závislost hloubky trhliny na počtu cyklů, a = a(N), a to proto, že způsob fraktografického značkování lomové plochy, který byl s úspěchem uplatňován na materiálu Ochnotu, se na materiálu 12ChM ukázal jako neefektivní. Z tohoto důvodu nebyla z experimentu č. 4 získána data, na jejichž základě by bylo možno ověřit věrohodnost numerické simulace. Naproti tomu v experimentu č. 5 se to již podařilo – viz obrázek 2-10 zobrazující lomovou plochu porušeného potrubního ZT. Validace modelu byla proto provedena následujícím způsobem:

- Z pořízené obrazové dokumentace byly stanoveny hodnoty hloubky trhliny pro známé počty cyklů viz tabulku 2-1.
- Následně byla pomocí vyvinutého modelu provedena simulace experimentu s výchozím defektem o rozměrech odpovídajícím skutečnému stavu poškození podle postupové čáry č. 7 z obrázku 2-10, tj. a₀ = 5 mm, c₀ = 10,8 mm, a s reálnými parametry zatěžování, P_{min} = 4 kN, P_{max} = 40 kN, atd.
- Byla vyhodnocena míra shody simulace s experimentem.

fraktogr. značka č.	hloubka trhliny (mm)	počet tisíců cyklů (kc) od referenčního stavu — od fraktografické značky č. 7	
		experiment	numerické simulace
7	5.0	0	0
6	5.5	40	37
5	6.0	80	68
4	6.8	120	95
3	7.7	160	118
2	9.0	200	175
1	skrz	240	

Tab. 2-1:Porovnání výsledků numerické simulace únavového šíření trhliny se skutečnými
experimentálními data z testu č. 5.



Obr. 2-10: Lomová plocha potrubního ZT z feritické oceli 12ChM porušeného v experimentu č. 5. Postupové čáry 1 až 7 identifikují skutečné rozměry trhliny po definovaných počtech zátěžných cyklů.

Stručná interpretace výsledků validačního experimentu: S přihlédnutím k přijatým modelovým zjednodušením úlohy, značným rozměrovým nepřesnostem reálného potrubního tělesa ("šišatost trubky", resp. proměnlivost tloušťky stěny v různých částech nosného průřezu trubky) a extrémní citlivosti simulace na některé materiálové parametry (zejm. parametru *U* definujícího podíl efektivní části rozkmitu faktoru intenzity napětí) lze výsledek simulace prohlásit za téměř vynikající. Nejenom že simulace poskytla velmi relevantní informaci o rychlosti šíření trhliny v předepsaném rozsahu stavů poškození (max. chyba podle tab. 2-1 dosáhla 26 %), ale navíc byla získaná informace tzv. konzervativní, tzn. že reálný stav poškození modelové konstrukce je z hlediska provozu mnohem příznivější (tzn. intenzita degradace je pomalejší) než podle vyhodnocené prognózy. Díky tomu dochází fakticky k naplnění jednoho ze základních požadavků kladených na SHM systém spočívající ve včasné indikaci mezního stavu konstrukce.

V dalších plánovaných únavových experimentech feritického potrubí se předpokládá zdokonalení techniky fraktografického značkování lomové plochy do té míry, že bude možné vyhodnotit stavy podstatně menšího poškození, tzn. menších hloubek trhliny. Za tohoto předpokladu bude možné provést validaci modelu únavové životnosti v širším rozmezí stavů poškození.

3. Model ultrazvukových vln

3.1 Základní informace

Smyslem projektu je fyzicky vytvořit laboratorní systém s prvky SHM na modelové potrubní konstrukci (tj. zkušebním tělese), ve které je uměle vyvolán proces únavového porušování, a demonstrovat na tomto systému schopnost kontinuální nedestruktivní diagnostiky. Ústředním prvkem diagnostického systému je aparatura ultrazvukového testování (UT), jejíž fungování je zajištěno soustavou čtyř piezoelektrických snímačů typu Dakel IDK-9 permanentně nainstalovaných na monitorovaném potrubním ZT. Princip UT spočívá v monitorování rozvoje poškození ZT na základě změn parametrů lineární a nelineární odezvy elastických vln při různých stavech poškození, tj. při různých délkách trhliny. Měření se v praxi provádělo především při provozních odstávkách, tedy v neztíženém stavu ZT, avšak později bylo možné díky pořízení výkonnějšího HW aplikovat UT přímo v průběhu dynamického zatěžování. Prostřednictvím vybraného snímače jsou do ZT vysílány komplexní ultrazvukové signály, které při průchodu ZT interagují s trhlinou. Výsledné signály sbírané prostřednictvím ostatních snímačů nesou informaci o změnách stavu ZT, resp. o rozvoji únavového poškození. Pro uvažovaný test byly vytipovány následující metody NEWS:

- 1) Analýza růstu harmonických frekvencí. Byl vyšetřován růst podílu třetí a druhé harmonické frekvence při růstu amplitudy budícího signálu.
- 2) NWMS ("Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy")
- Vyhodnocení vzniku intermodulačních a vyšších harmonických frekvencí při buzení více frekvencemi.
- 3) ESAM & PI ("Excitation Symmetry Analysis & Pulse Inversion")
- Odhad konstant nelinearity druhého a třetího (případně i vyšších) řádů závislosti výstupního signálu na vstupním. Odhad je proveden superpozicí rekonstrukce vhodně zvolených signálů technikou "Time reversal".

Z mnoha možných lineárních metod byl vybrán parametr útlumu (tedy lineárního jevu) signálu se širokým spektrem (CHIRP energy transfer). V průběhu měření jsou jednotlivé snímače postupně přepínány jako vysílače, resp. přijímače signálu —jeden snímač funguje jako vysílač a ostatní snímače jako přijímače, aby bylo zajištěno pokrytí pláště trubky s trhlinou (např. snímač č. 1 vysílá a snímače č. 2, 3 a 4 přijímají – viz obr. 3-1). Konfigurace snímačů byla zvolena tak, aby se počáteční vrub a trhlina nacházely přibližně na spojnici dvou snímačů. Na základě zvolených metod jsou pro každou cestu vyhodnoceny parametry, jejichž velikost vyznačuje přítomnost či nepřítomnost defektů v okolí dané spojnice. Signály jsou zpracovávány přístrojem Tiepie HS-5 a počítačem s programem Matlab.

Funkce modelu ultrazvukových vln, který tvoří po boku modelu únavové životnosti druhou část digitálního dvojčete, spočívá v provádění numerických simulací šíření ultrazvukových vln potrubním tělese za podmínek shodných s výše popsaným experimentálním uspořádáním. Vstupní parametry modelu jsou charakterizovány matematickým popisem signálů vysílaných z jednoho piezoelektrického senzoru. Výstupem modelu jsou signály v polohách ostatních piezoelektrických senzorů. Fungování modelu je podrobně popsáno v následující sekci.

3.2 Popis modelu

3.2.1 Použité programové vybavení

Základem modelu ultrazvukových vln digitálního dvojčete je softwarový balík mFEM vyvíjený v Ústavu termomechaniky. mFEM je explicitní řešič pro lineární elasto-dynamické úlohy založený na metodě konečných prvků. Pro integraci v čase se používá metoda centrálních diferencí. Kód je spouštěn v softwaru Matlab. Podstatou řešení elasto-dynamických úloh je řešení rovnice:

$$\mathbf{M}\ddot{u} + \mathbf{K}u = \mathbf{F} \tag{9}$$

M je matice hmotnosti, **K** je matice tuhosti, **F** je vektor síly, *u* je vektor posuvů. K sestavení globálních matic **M** a **K** se používá jednobodová integrace. Matice **M** je diagonalizovaná, používá se stabilizace proti hour-glass módům. Podrobné informace týkající se fungování softwaru lze nalézt v manuálu k obsluze tvořícím přílohu č. 3 této výzkumné zprávy. Samotný softwarový balík mFEM tvoří přílohu č. 2.

3.2.2 Definice řešené úlohy

Cílem úlohy bylo provést numerickou simulaci šíření ultrazvukového signálu typu CHIRP potrubním ZT, a to za podmínek shodných se dvěma uskutečněnými experimenty:

- 1) experiment na potrubí z materiálu Ochnotu osazeném čtveřicí snímačů upevněných přímo k povrchu ZT,
- experiment na potrubí z materiálu 12ChM osazeném čtveřicí tenkých ocelových válečků ("komínků") simulujících vlnovody, přičemž UT senzory byly připevněny na koncích těchto komínků.

Absence vlnovodů v prvním modelu představuje podstatné zjednodušení v porovnání s druhým modelem, resp. velmi významné snížení numerické náročnosti úlohy. První model byl tvořen 1 727 988 elementy s 1 921 915 uzly. Geometrii modelu ukazuje obrázek 3-1a, detail sítě je zaznamenán na obrázku 3-1c. V místě vlnovodu č. 1 bylo provedeno bodové buzení signálem CHIRP. V místech vlnovodů 2 až 4 byly odečteny vybuzené hodnoty rychlostí. Do druhého modelu byly zahrnuty čtyři vlnovody připevněné k trubce. Model obsahoval celkem 2 163 571 elementů s 2 364 393 uzly. Obrázek 3-1b ukazuje geometrii a obr. 3-1d detail sítě na vlnovodu. Oba vytvořené modely obsahovaly pouze šestistěnné osmiuzlové elementy s délkou hrany 1 mm. Velikost elementu byla zvolena s ohledem na rychlost šíření vln a frekvenci vstupního signálu. Kritický časový krok výpočtu byl určen na základě maximální vlastní frekvence modelu, $\Delta t_{crit} = 2 / \omega_{max}$. Výpočty byly provedeny s časovým krokem 8·10⁻⁸ s, Courantovo číslo bylo nastaveno na hodnotu 0,93.



Obr. 3-1: Vizualizace MKP modelu ultrazvukových vln: model trubky bez vlnovodů (a) a s vlnovody (b), detailní obrázek dokumentující síť trubky (c) a síť v oblasti vlnovodu (d).

3.3 Výsledky simulací

3.3.1 Model potrubí z materiálu Ochnotu bez vlnovodů

Výsledky numerických simulací a jejich porovnání s experimentálně získanými daty jsou prezentovány formou obrázků 3-2 až 3-4. Porovnání signálů získaných simulací proběhlo ve třech místech trubky shodných s pozicemi snímačů č. 2, 3 a 4. Buzení bylo generováno z pozice snímače č. 1 formou krátkého CHIRP signálu (0,2 ms, 120-220 kHz). Ultrazvukový signál se šířil potrubním ZT ze snímače č. 1 do snímačů 2, 3, 4, kde byl zaznamenán.



Obr. 3-2: Výstupní signál v poloze snímače č. 2. Červená barva… naměřený signál, modrá barva… signál získaný numerickou simulací.



Obr. 3-3: Výstupní signál v poloze snímače č. 3. Červená barva… naměřený signál, modrá barva… signál získaný numerickou simulací.



Obr. 3-4: Výstupní signál v poloze snímače č. 4. Červená barva… naměřený signál, modrá barva… signál získaný numerickou simulací.

Velmi dobrou shodu mezi experimentem a simulací lze v případě trubky z Ochnotu bez vlnovodů pozorovat na časech příchodů událostí na jednotlivé kanály. Materiálové charakteristiky modelu a jeho základní geometrie odpovídají tedy reálnému vzorku velmi dobře. Nepříliš uspokojivá je však shoda tvaru signálů experimentálně získaných se signály vypočtenými simulací. Je třeba konstatovat, že prezentovaný model nedosáhl takového stupně aproximace reality, aby byl použitelný pro odhad velikosti trhliny pomocí nelineárních metod. Použitelný by zřejmě byl například pro lokalizaci emisních událostí.

3.3.2 Model potrubí z materiálu 12ChM s vlnovody

Druhý model byl v porovnání s prvním modelem podstatně složitější. Snímače č. 1, 2, 3 a 4 byly v tomto případě umístěny na konce vlnovodů připevněných k tělesu trubky. Výsledky numerických simulací a jejich porovnání s experimentálně získanými daty jsou prezentovány formou obrázků 3-5 až 3-7. Porovnání signálů získaných simulací proběhlo na třech vlnovodech, na kterých byly v průběhu experimentu připevněné snímače č. 2, 3 a 4. Buzení bylo generováno v poloze snímače č. 1 formou krátkého CHIRP signálu (0,2 ms, 120-220 kHz). Ultrazvukový signál se šířil vlnovody a potrubním tělesem ze snímače č. 1 do snímačů 2, 3, 4, kde byl zaznamenán.



Obr. 3-5: Výstupní signál v poloze snímače č. 2. Červená barva… naměřený signál, modrá barva… signál získaný numerickou simulací.



Obr. 3-6: Výstupní signál v poloze snímače č. 3. Červená barva… naměřený signál, modrá barva… signál získaný numerickou simulací.



Obr. 3-7: Výstupní signál v poloze snímače č. 4. Červená barva… naměřený signál, modrá barva… signál získaný numerickou simulací.

V případě tohoto modelu bohužel nelze pozorovat příliš dobrou shodu mezi simulací a experimentem, a to ani z hlediska časů příchodů událostí na jednotlivé kanály, ani z hlediska tvaru signálů. Nepodařilo se tedy dobře nastavit ani materiálové charakteristiky modelu a základní geometrii. Je třeba konstatovat, že prezentovaný model nedosáhl takového stupně aproximace reality, aby byl použitelný pro odhad velikosti trhliny pomocí nelineárních metod. Je však potřeba zdůraznit, že se zde jednalo o podstatně obtížnější úlohu než v případě první simulace.

3.3.3 Souhrnné zhodnocení modelu ultrazvukových vln

V rámci etapy A4 projektu NEMENUS se podařilo naprogramovat a vyvinout počítačový model na bázi MKP, který je schopen provádět numerickou simulaci šíření ultrazvukových vln potrubním zkušebním tělesem. Fungování modelu spočívá v tom, že na základě vstupních parametrů – matematického popisu ultrazvukových signálů uměle generovaných jedním z piezoelektrických snímačů – model vyhodnotí průběh výstupních signálů v místech trojice ostatních snímačů. Vytvořením digitálního dvojčete dochází k naplnění jednoho z významných výstupů projektu, neboť TWIN je jednou z nedílných součástí vyvíjeného reprezentativního SHM modelu.

Nutno však připustit, že model ultrazvukových vln bohužel ve stávající fázi vývoje stále zdaleka nesplňuje očekávání z hlediska přesnosti numerických simulací. S ohledem na extrémní numerickou náročnost, poněkud obtížnou definovatelnost některých okrajových podmínek a celkovou složitost úlohy je to však pochopitelné. Zdroje nepřesností lze obecně rozdělit do dvou kategorií:

- materiálový útlum, resp. nejistota ve vstupních parametrech charakterizujících materiálové vlastnosti,
- geometrický útlum.

V případě nerezových materiálů, mezi něž patří také Ochnot, je všeobecně znám silný akustický útlum, který v praxi často znesnadňuje aplikaci některých ultrazvukových metod a v některých případech jejich použití dokonce znemožňuje. Materiálový útlum Ochnotu byl bezesporu jednou z příčin nepřesnosti numerických simulací provedených na vyvinutém modelu a

prezentovaných v předešlých kapitolách. Tento zdroj chyb se do jisté míry podařilo eliminovat nahrazením Ochnotu feritickým materiálem 12ChM s podstatně příznivějšími vlastnostmi. V případě modelu trubky 12ChM pak do výpočtu vnáší určitou nejistotu parametry vlnovodů vyrobených z materiálu, který sice spadá do podobné kategorie ocelí (nelegované/ nízkolegované feritické oceli) avšak u něhož nebyly experimentálně ověřeny základní materiálové parametry, zejména modul pružnosti. Jedním z dalších podnětů pro další vývoj modelu a pro účely nedestruktivního testování pomocí nelineárních UT metod by bylo vhodné vybrat materiál se shodnými vlastnostmi s potrubním tělesem, nebo alespoň vyhodnotit přesné materiálové konstanty materiálu vlnovodů.

Ještě větší obtíže představují velké rozměry ZT, kvůli kterým je řešení úlohy na samotné hranici numerické výpočetní kapacity při použití dostupného hardwarového vybavení laboratoře. Značnou míru nejistoty do modelu vnáší také pevnost spojů vlnovodů s tělesem trubky. Jelikož se ve vývojovém programu reprezentativního SHM modelu i nadále počítá s používáním vlnovodů a pro jejich připevnění ke zkušebnímu tělesu budou i nadále využívány lepené spoje (nikoliv např. svarové spoje), bude nutné ověřit akustické parametry tohoto spojení, resp. věrnost simulace tohoto spojení v matematickém modelu.

Za velmi perspektivní směr další směřování vývoje modelu ultrazvukových vln lze označit jeho aplikaci v případném vedlejším vývojovém programu zaměřeném na testování zkušebních těles podstatně menších rozměrů a jednodušší geometrie, přičemž by toto testování rovněž zahrnovalo etapy iniciace trhliny a únavového porušování. Uvedené požadavky by dokonale splňovala zkušební tělesa typu SENT ("single edge notch tension"), které mají formu hranolů s čtvercovým nebo obdélníkovým příčným průřezem opatřených vrubem. Ve prospěch tohoto typu ZT svědčí také skutečnost, že prokazatelně poskytují velmi konzistentní lomově mechanické výsledky s ohybovými testy trubek [17, 18] a současně je lze snadno vyrobit rozřezáním disponovaných trubek a otestovat s dostupným laboratorním vybavením. Vývojový program by pak spočíval v provedení série únavových testů na ekvivalentních tělesech SENT, které by byly koncipovány zcela analogicky ke stávajícímu testování velkých potrubních ZT: SENT by byly osazeny sadou ultrazvukových snímačů a podrobeny cyklickému zatěžování za účelem vyvolání přesně definovaných stavů poškození. V definovaných provozních odstávkách by probíhala ultrazvuková měření a experimentální výsledky by byly korelovány s výsledky numerických simulací. Podstatné zjednodušení a zpřehlednění testovacích podmínek, resp. odstranění řady rušivých vlivů spojených s testováním ZT velkých rozměrů, by velmi pravděpodobně umožnilo efektivně odladit výpočetní modely a získané zkušenosti následně zužitkovat pro zpřesnění jejich prediktivní funkce na potrubních ZT velkých rozměrů.

4. Závěr

Tato výzkumná zpráva dokumentuje postup prací vykonaných v rámci aktivity A4 projektu NEMENUS a zároveň tvoří součást závazného výstupu "V4: Software a reprezentativní model", který je výsledkem těchto aktivit. Formou této výzkumné zprávy a přiložených zdrojových kódů je doloženo, že se podařilo vytvořit digitální dvojče, tedy počítačový program, který je schopen plnit předepsané diagnostické funkce spočívající v provádění numerických simulací za účelem (1) predikce kinetiky únavového porušování modelové potrubní konstrukce účinkem mechanického cyklického zatěžování čtyřbodovým ohybem - "model únavové životnosti" – a (2) hodnocení šíření ultrazvukových vln vysílaných do konstrukce prostřednictvím piezoelektrických budičů a hodnocení odezvy na toto buzení - "model ultrazvukových vln". Ve zprávě jsou prezentovány podrobné informace o principu fungování modelů a vybrané konkrétní výsledky simulací a současně jsou srozumitelnou formou podány instrukce pro ovládání modelů. Z výsledků prezentovaných ve zprávě vyplývá, že model únavové životnosti poskytuje velmi uspokojivý, realistický odhad skutečné rychlosti šíření únavové trhliny. Model ultrazvukových vln sice v době zpracovávání této výzkumné zprávy zatím neposkytuje takovou predikci dynamické odezvy, která by byla v uspokojivém souladu s experimentálním pozorováním, avšak jsou i nadále podnikány kroky pro zpřesnění modelu.

Vyvinutý počítačový program tvoří jednu z komponent vyvíjeného reprezentativního SHM modelu, který je hlavním výstupem projektu (závazný výstup V6), a který je z hlediska metodiky TAČR výstupem typu "G_{funk} – funkční vzorek". Termín vypracování tohoto závazného výstupu se v souladu s harmonogramem projektu nachází až v roce 2022. Z tohoto důvodu budou vyvinuté modely navzdory formálnímu konci etapy A4 i nadále zdokonalovány. Předloženým výstupem je však doloženo, že jsou aktivně podnikány kroky k naplnění dílčích cílů projektu a že jsou naplněny všechny předpoklady pro jeho úspěšné dokončení.

Seznam příloh

- 1. Model únavové životnosti softwarový balík Priloha01_ModelUnavoveZivotnosti.ZIP
- 2. Model ultrazvukových vln softwarový balík Priloha02_ModelUltrazvukovychVln.zip
- 3. Model ultrazvukových vln manuál Priloha03_mFEM_manual.pdf

Bibliografie

- [1] NTD ASI II 2017. *Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. Praha: Asociace strojních inženýrů. 2017
- [2] CUKR, B. et al. Poradenská příručka TEVÚH č. 17: Oceli pro jadernou energetiku I., Zahraniční zkušenosti. Praha: TEVÚH, 1976.
- [3] KUNZ, J. Základy lineární a nelineární lomové mechaniky pro inženýrskou praxi. 1. vydání. Praha: ČVUT, 2020. ISBN 978-80-01-06672-0.
- [4] ČECH, J. a J. KUNZ. *Charakterizace strukturních a mechanických vlastností materiálu potrubí, zpráva E-KMAT-1095/20*. Praha: ČVUT-FJFI-KMAT. 2020.
- [5] RAJU, I. S. a J. C. NEWMAN. Stress-Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes and Rods Under Tension and Bending Loads. NASA Technical Memorandum 87594. B.m.: Langley Research Center. 1985.
- [6] METTU, S. R., I. S. RAJU a R. G. FORMAN. Stress Intensity Factors for Part-through Surface Cracks in Hollow Cylinders, JSC Report 25685/LESC Report 30124. B.m.: Johnson Space Center/Lockheed Engineering Services Company Joint Publication. 1992.
- BERGMAN, M. Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* [online]. 1995, 18(10), 1155– 1172. Dostupné z: doi:10.1111/j.1460-2695.1995.tb00845.x
- [8] CARPINTERI, A., R. BRIGHENTI a A. SPAGNOLI. Part-through cracks in pipes under cyclic bending. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 1998, 185(1), 1–10. Dostupné z: doi:10.1016/S0029-5493(98)00189-7
- [9] MATERNA, A. Simulace šíření povrchové únavové trhliny v trubce z oceli AISI 321 zatěžované cyklickým 4-bodovým ohybem, zpráva V-KMAT-1088/20. Praha: ČVUT-FJFI-KMAT. 2020.
- [10] KOVÁŘÍK, O., A. JANČA a J. SIEGL. Fatigue crack growth rate in miniature specimens using resonance. *International Journal of Fatigue* [online]. 2017, **102**, 252– 260. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2017.02.015
- [11] KOVÁŘÍK, O., A. MATERNA, J. SIEGL, J. ČÍŽEK a J. KLEČKA. Fatigue Crack Growth in Plasma-Sprayed Refractory Materials. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2019, 28(1–2), 87–97. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-018-0790-3
- [12] KOVÁŘÍK, O., J. SIEGL, J. ČÍŽEK, T. CHRÁSKA a J. KONDAS. Fracture Toughness of Cold Sprayed Pure Metals. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2019, 29(1–2), 147–157. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-019-00956-z
- [13] KOVÁŘÍK, O., J. KUNZ a J. ČECH. Studium rychlosti šíření trhliny v oceli 08Ch18N10T, zpráva E-KMAT-1092/20. Praha: ČVUT-FJFI-KMAT. 2020.
- [14] ČECH, J. a J. KUNZ. Charakterizace strukturních a mechanických vlastností materiálu potrubí (ocel 12ChM), zpráva E-KMAT-1118/21. Praha: ČVUT-FJFI-KMAT. 2021.
- [15] KOVÁŘÍK, O., J. KUNZ a J. ČECH. Studium rychlosti šíření trhliny v oceli 12ChM, zpráva E-KMAT-1136/21. Praha: ČVUT-FJFI-KMAT. 2021.
- [16] NEWMAN, J. C. a I. S. RAJU. Analyses of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension or Bending Loads. NASA Technical Paper 1578. 1979.

- [17] SORET, C., Y. MADI, J. BESSON a V. GAFFARD. Use of the sent specimen in pipeline design. In: 20th JTM EPRG European pipeline research group. 2015, s. 34.
- [18] HAN, J. J., N. O. LARROSA, R. A. AINSWORTH a Y. J. KIM. The use of SE(T) specimen fracture toughness for FFS assessment of defects in low constraint conditions. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016, 2(0), 1724–1737. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2016.06.218