

VYUŽITELNOST ZKUŠEBNÍCH TĚLES TYPU „DRÁTOŘEZ“ PŘI VALIDACI SOFTWARE MODELUJÍCÍCH ULTRAZVUKOVÉ ZKOUŠENÍ

APPLICABILITY OF “WIRE-CAT” TYPE TEST BLOCKS FOR VALIDATION OF ULTRASONIC EVALUATION MODELING SOFTWARE

Petr Vlček a Pavel Mareš

Centrum výzkumu Řež s. r. o.

Abstrakt

Ve společnosti Centrum výzkumu Řež s.r.o. (dále CVŘ) byl vyroben a ověřen nový typ zkušebních těles s realistickými defekty, který je vhodný kromě standardního využití při ověřování navrženého postupu ultrazvukového zkoušení pro použití zejména při ověřování softwarových nástrojů modelujících ultrazvukové zkoušení. Nový typ zkušebních těles obsahuje vady, které jsou vyrobeny elektrojiskrovým obráběním pomocí drátu.

Aplikovatelnost tohoto typu zkušebních těles byla ověřena na cca 40 zkušebních tělesech z uhlíkové a austenitické oceli o dvou tloušťkách, kdy byly porovnávány výsledky dosažené při ultrazvukovém zkoušení technikou phased array a simulacích v softwaru CIVA.

V článku jsou uvedeny informace o výsledcích VaV projektu CVŘ řešeného v letech 2019-2020 v projektu NCK pro energetiku, dílčího projektu DP6 “Vývoj diagnostických metod pro charakterizaci klíčových komponent energetických celků“, pracovního balíčku PB1.14 „Perspektivní diagnostické metody“.

Abstract

A new type of test specimens with realistic defects was produced and verified in the Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ) research organization. This type of test specimen is suitable for use in verifying the proposed ultrasonic testing procedure, but especially for verifying software tools for ultrasonic testing modeling. These test specimens contain defects which are produced by electro-spark machining with wire.

The possibilities of using this type of test specimens were verified on about 40 test specimens made of carbon and austenitic steel with two thicknesses, when the results obtained in ultrasonic testing by phased array technique and simulations in CIVA software were compared.

The paper provides information on the results of CVŘ R&D project solved in 2019-2020 within the NCK project for energy, sub-project DP6 “Development of diagnostic methods for characterization of key components of energy units”, work package PB1.14 “Perspective diagnostic methods”.

Nedestruktivní zkoušení a kvalifikace

Nedestruktivní zkoušení slouží k prokázání nebo zjištění stavu materiálu nebo zařízení bez nutnosti jeho poškození nebo jen s minimální vlivem na jeho stav, aby bylo možné ho dále v případě vyhovujícího stavu provozovat. V případě hodnocení podpovrchového stavu materiálu je často nutné pro přesnou interpretaci výsledků nedestruktivního zkoušení provést ověření pomocí měření na zkušebních tělesech. Tento postup se označuje jako kvalifikace nedestruktivního zkoušení.

Při kvalifikaci jednotlivých metod nedestruktivního zkoušení se používají zkušební tělesa (ZT), která obsahují uměle vyrobené vady. Zkoušení provedená na těchto tělesech, u kterých je

známa velikost a pozice vad, umožní vyhodnotit přesnost použité metody a zvoleného postupu nedestruktivního zkoušení.

Zkušební tělesa pro nedestruktivní zkoušení

Ultrazvukové zkoušení (UT) je jedna z metod nedestruktivního zkoušení, která je zaměřena na detekci a hodnocení rozměrů vad, které se nachází uvnitř materiálu a které často komunikují s povrchem na opačné straně, než z které je prováděno zkoušení. Současně jsou i výsledky této metody v některých případech obtížně reprodukovatelné, jelikož na výsledek má vliv velké množství faktorů. K tomu se v poslední době používají ještě nové techniky zkoušení (Total Focusing Method, Full Matrix Capture, guided wave atd.), při kterých je získáno velké množství dat a interpretace výsledků je náročnější.

Z tohoto důvodu se u této metody velmi často používá proces kvalifikace, který prověří, zda navržený postup, zařízení, a i personál je schopen správně vyhodnotit naměřená data ze zkoušené oblasti, a v požadované kvalitě. Z důvodu komplikovanosti UT a rozvoji IT technologií se součástí návrhu postupů ultrazvukového zkoušení stává i počítačové modelování.

Nedílnou součástí ověření inspekčního postupu je měření na zkušebních tělesech, která představují model zkoušené součásti, ve které jsou vyrobeny vady. Vady v ZT musí naplňovat několik základních podmínek s cílem co nejvíce odpovídat reálným vadám a rozměrově splňovat podmínky pro naplnění kvalifikačních kritérií pro UT.

Při návrhu a výrobě vad je snaha vyrobit v ZT co nejvíce realistické vady, u kterých je ale nutné znát přesné rozměry, aby bylo možné určit nepřesnost stanovenou při vyhodnocení zkoušení.

Zkušební tělesa „drátořez“

Zkušební tělesa „drátořez“ (dále ZT drátořez) jsou pro vybrané případy UT velmi vhodná zkušební tělesa, která naplňují požadavky pro kvalifikaci, tj. jsou u nich známy přesné rozměry vad a oproti základním typům vad jako jsou vývrty, drážky nebo poloeliptické vady, je možno je profilovat do tvaru odpovídající reálné únavové trhlině. Vadu lze umístit do libovolné pozice v ZT.

Výroba ZT drátořez je realizována pomocí elektroerozivního obrábění, při níž se materiál odebrá drobnými elektrickými výboji (jiskrami) mezi obrobkem (zkušebním tělesem) a elektrodou (nástrojem – drátem) v kapalném dielektriku.

Pro výrobu vady se používá pohybující se drát standardně o tloušťce od 0,1 mm. Při hloubení se elektroda (drát) pohybuje směrem do zkušebního tělesa až do chvíle, kdy přeskočí elektrický výboj. Každý výboj oddělí mikroskopický kus materiálu, který je odplaven dielektrikem. Tímto způsobem se drát postupně „prořezává“ materiálem podle přesně stanovené trajektorie. Tvar vady je definován pohybem drátu, kdy přes CNC řízení obráběcího stroje lze velmi přesně vyrobit téměř libovolný profil i velikost vady.

Hlavním omezením celého procesu je možnost výroby vad pouze do rovinných těles o omezené šířce a tím, že profil (výška) vady je po celé její délce stejný. Výhodou ZT drátořez je jejich snadná a levná výroba. Způsob výroby umožňuje vymodelovat tvar trhlin, jejichž výskyt je v kontrolované komponentě zjištěn nebo předpokládán. Oproti zkušebním tělesům s realistickými vadami je jejich výroba výrazně jednodušší a levnější.

ZT drátořez je nový mezistupeň zkušebních těles mezi ZT s reálnými vadami a ZT s umělými vadami, kdy je možné získat při ultrazvukové kontrole těchto ZT velmi přesnou představu charakteru odezvy od reálných trhlin. Díky přesné znalosti profilu vady je možné provádět i ověření (validace) výpočtových softwarů modelující ultrazvukové zkoušení.

V roce 2020 byl společností Centrum výzkumu Řež s.r.o. typ ZT „drátořez“ zapsán jako užitečný vzor – „Zkušební těleso s přesnými tvary trhlin pro nedestruktivní zkoušení“ č. 34 208.

Validace softwaru CIVA pomocí zkušebních těles „drátořez“

V rámci projektu NCK PB 1.14 „Perspektivní diagnostické metody“ byly v bodu 1.14.1 provedena měření na zkušebních tělesech reprezentujících tvar reálné provozní vady a simulace v programu CIVA s cílem ověřit výpočtový software pro použití při UT. V rámci optimalizace výsledků simulace byly definovány i parametry, které významně ovlivňují shodu mezi výsledky měření a simulací.

Simulace ultrazvukového zkoušení bylo provedeno v softwarové platformě CIVA, která je vyvíjena a distribuována francouzskou firmou EXTENDE ve spolupráci s dalšími partnery jako CEA. Jedná se o celosvětově nejrozšířenější program pro modelování vybraných metod nedestruktivního zkoušení.

Experimentální měření

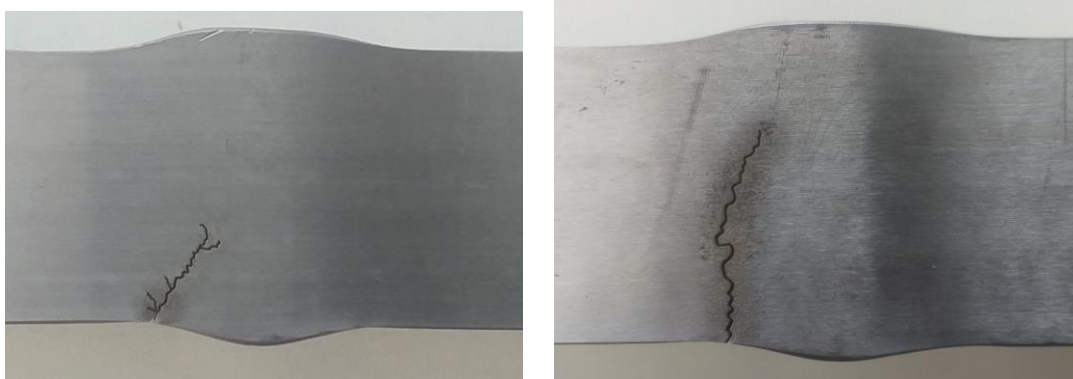
Měření a simulace byly provedeny na 44 zkušebních tělesech drátořez vyrobených z feritického a austenitického materiálu a na 2 referenčních měrkách. Měrky i ZT drátořez byly vyrobeny z materiálů, jejichž použití je běžné na jaderných elektrárnách typu VVER, tj. feritická ocel 12022.1 (ekvivalent 22K) a austenitická ocel X6CrNiTi18-10 (1.4541) (ekvivalent 08CH18N10T).

ZT drátořez byla rovinná tělesa o tloušťkách 12 a 35 mm, kdy polovina ZT drátořez byla homogenních a polovina se svarovým spojem (příklad ZT je na obr. 1). Vady byly navrženy podle nálezů a zdokumentování reálných trhlin, tj. jejich profilu a směru šíření v materiálu. Vady byly v programu CIVA modelovány jako rovinné s lomeným profilem nebo i větvené (obr. 2).

Pro porovnání simulace a měření byly vybrány základní lineární phased array sondy AM 3,5 MHz a AS 5 MHz s klíny pro příčné vlny. Měření probíhalo pohybem sondy po celé délce ZT, pokud to umožnila koruna svaru.



Obr. 1: Boční pohled na ZT drátořez



Obr. 2: Ukázka vad vyrobených do zkušebních těles

Výsledky zkoušení

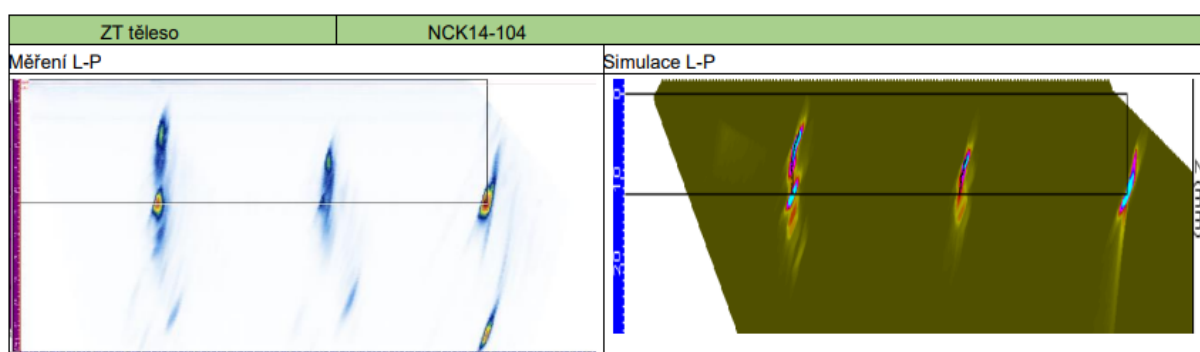
Porovnání výsledků zkoušení a simulací bylo prováděno několika způsoby. Základním hodnocením bylo porovnání hodnot maximální odezvy získané při pohybu sondy po tělese v axiálním směru. Druhým kritériálním hlediskem bylo porovnání celkové charakteristiky odezvy (tvar a profil zobrazených ech) v zobrazení Merged B-scan (boční pohled na ZT).

V případě zjištění odchylky mezi výsledky simulace a měření bylo provedeno detailní posouzení odezev získaných při simulaci a zkoušení, a to porovnáním pozice sondy a charakteristiky max. odezvy simulace a měření. V případě, že nebyla zjištěna příčina v geometrii ZT a modelu, bylo provedeno posouzení vlivu výpočetních parametrů v programu CIVA na výsledek.

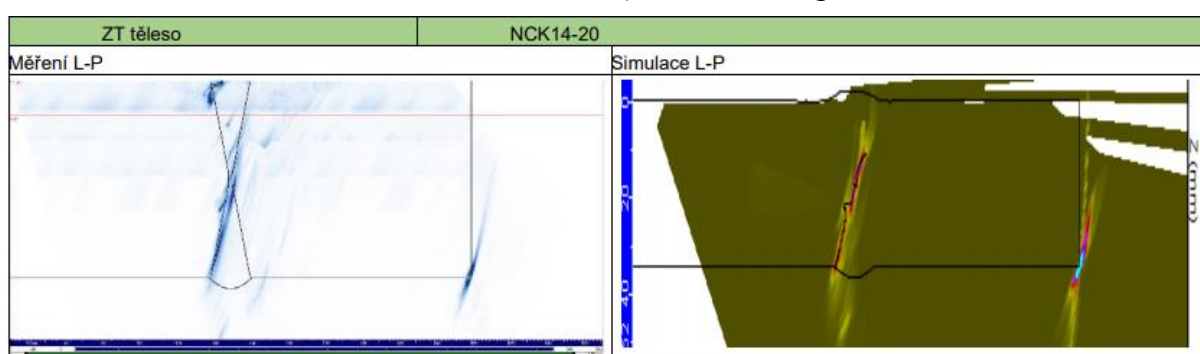
Dosažené výsledky byly závislé na materiálu, tloušťce a také výskytu svarového spoje v ZT, který měl vliv na přesnost modelování geometrie i materiálových vlastností zkušební tělesa.

Charakteristika odezvy od vad získaných při simulaci a phased array zkoušení byla získána u zkušebních těles bez svaru velmi obdobná ne-li až totožná (obr. 3 – zobrazené odezvy od vad v „bočním pohledu“). Rozdíly byly zjištěny v případě zkoušení a simulace ZT se svarovým spojem, a to zejména u austenitických těles, která měla z výroby výraznou korunu i kořen svaru.

U feritických těles byly koruna i kořen svaru nevýrazné, což umožnilo získat shodné výsledky mezi simulací i měřením i při skenování přes svarový spoj (obr. 4). U austenitických zkušebních těles se svarem bylo provedeno měření a vyhodnocení dat pouze ke koruně svaru, jak je standardně prováděno při ultrazvukovém zkoušení.



Obr. 3: Výsledky ultrazvukového zkoušení a simulace na ZT NCK14-104 – ZT austenitické bez svaru o tloušťce 12 mm (zobrazení Merged S-Scan)



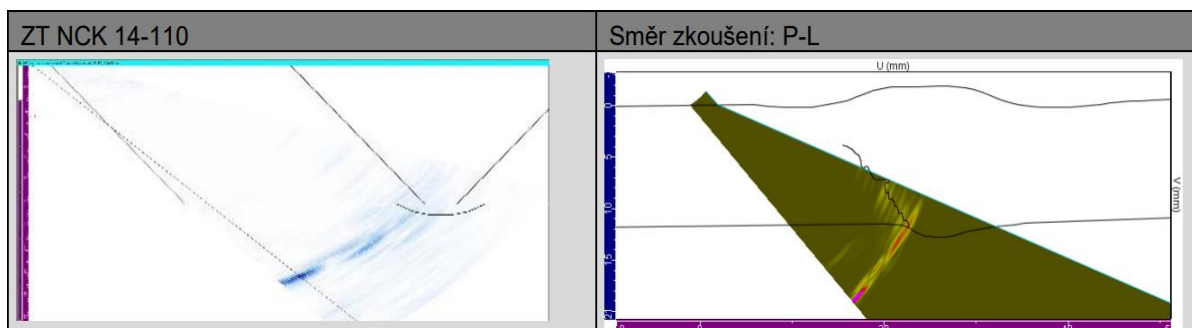
Obr. 4: Výsledky ultrazvukového zkoušení a simulace na ZT NCK14-20 – ZT feritické se svarem o tloušťce 35 mm (zobrazení Merged S-Scan)

V případě hodnocení intenzity odezvy u ZT, které jsou vyrobeny z oceli 12022.1, bylo možné díky nevýrazné a tvarově pravidelné koruně provést a porovnat i výsledky zkoušení a simulace při pohybu přes svar. Výsledky intenzit odezev získaných při simulaci jsou kromě několika případů ve shodě se zkoušením, tj. do rozdílu ± 3 dB. Rozdíly mezi simulací a zkoušením je převážně dáno vlivem geometrie kořene a potenciálně i koruny.

U austenitických zkušebních těles se významněji projevuje vliv a požadavky na nastavení vlastností materiálu v modelu ZT, a to zejména v případě výskytu svarového spoje.

Intenzity odezev od vad získaných při základní simulaci v porovnání s UT u austenitických zkušebních těles o tloušťce 12 mm dosahovaly velkého rozptylu hodnot, a to zejména u těles se svarem. Na základě analýzy parametrů ovlivňující simulaci/zkoušení a u ZT se svarem bylo provedeno hodnocení vad pouze při pohybu sondy ke svaru (obr. 5), byly získány již vyhovující výsledky mezi simulací a zkoušením, tj. do rozdílu ± 6 dB.

U zkušebních těles o tloušťce 35 mm prvotní výsledky mezi zkoušením a simulacemi vyšly diametrálně odlišně. Bylo provedeno stanovení útlumu pro jednotlivá ZT a zjištěno, že útlum se u jednotlivých ZT liší. Na základě optimalizování výsledků simulací došlo k zvýšení shody mezi výsledky v případě hodnocení vady na přilehlé straně svaru. Byly zde získány i výsledky, u kterých ani po detailní analýze dat nebyla určena příčina rozdílného výsledku. Důvodem jsou pravděpodobně nehomogenity austenitického materiálu, které nebylo možné bez metalografického posouzení svaru a tepelně ovlivněné oblasti odpovídajícím způsobem stanovit a pokusit se modelovat při výpočetním stanovení odezvy v programu CIVA.



Obr. 5: Výsledky ultrazvukového zkoušení a simulace austenitického ZT se svarem o tloušťce 12 mm – vyhodnocení dat pro vybranou pozici sondy pomocí zobrazení S-scan

Výsledky ukázaly nutnost prověřovat ultrazvukové parametry pro jednotlivá tělesa, aby bylo možno provést vhodné nastavení nejen pro porovnání se simulací.

Shrnutí výsledků

Výsledky ukázaly, že shoda mezi charakteristikami (tvarem) odezev od vad je u většiny měřených ZT drátořez velká. To je umožněno přesným vymodelováním vady i modelem ZT (u ZT bez svarového spoje) a homogenním materiálem. U ZT se svarem vyrobených z oceli 12022, kdy geometrie koruny a kořene svaru byly nevýrazné a plynulé, byla dosažena též velká shoda ve výsledcích.

Jako problematická ZT pro interpretaci výsledků a dosažení shody mezi simulací a měřením byla silnostěnná austenitická tělesa se svarem, kdy vlivem proměnlivosti struktury materiálu a velkého útlumu ultrazvukového signálu nebyla ve většině případů získána shoda mezi výsledky simulace a měřením.

Výsledky jsou souhrnně uvedeny v tab. 1, kdy bylo provedeno posouzení shody v intenzitě odezev mezi simulací a UT podle následujících kritérií: shoda – do rozdílu ± 3 dB, přípustná odchylka – do rozdílu ± 6 dB, zdůvodnitelná – do rozdílu ± 12 dB, nepřípustná – rozdíl 12 a větší. V případě rozdílu větší než 6 dB byly výsledky z ultrazvukového zkoušení a simulace analyzovány a hledána příčina rozdílu.

Tab. 1: Přehled dosažených výsledků při porovnání maximální odezvy mezi simulací a UT

Materiál ZT	Tloušťka ZT	Typ ZT	Počet hodnocení (P. h.)	Shoda		Přípustná odchylka		Zdůvodnitelná odchylka		Nepřípustná odchylka	
				P.h.	%	P.h.	%	P.h.	%	P.h.	%
12022	12	hom	20	20	100	0	0	0	0	0	0
12022	12	svar	10*	8	80	2	20	0	0	0	0
12022	35	hom	10	6	60	3	30	1	10	0	0
12022	35	svar	10*	9	90	1	10	0	0	0	0
X6CrNiTi18	12	hom	20	16	80	4	20	0	0	0	0
X6CrNiTi18	12	svar**	10*	5	50	1	10	0	0	4	40
X6CrNiTi18	35	hom	10	6	60	3	30	1	10	0	0
X6CrNiTi18	35	svar**	10*	3	30	0	0	0	0	7	70
Celkem			100*	73	73	14	14	2	2	11	11
Pozn.: *z hodnocení jsou vyřazeny vývrty, které se nacházejí v ose svaru. Nejsou předmětem validace a vliv geometrie svaru má zásadní vliv na detekci. ** u austenitických ZT je velký vliv geometrie koruny, a proto bylo provedeno měření pouze k koruně svaru											

Závěr

Pro ověření použitelnosti a schopnosti predikovat odezvu od vad vyrobených na ZT drátořez bylo navrženo a vyrobeno celkem 44 zkušebních těles z feritické oceli 12022.1 (ekvivalent 22K) a austenitické oceli X6CrNiTi18-10. Byla provedena simulace a následně i optimalizace simulace ultrazvukového zkoušení za účelem dosáhnout maximální shody mezi simulací a laboratorními zkouškami na ZT drátořez.

Na základě dosažených výsledků bylo prokázáno, že softwarová platforma CIVA umožňuje velmi dobře modelovat ultrazvukové zkoušení a že zkušební tělesa drátořez, ve kterých byly vyrobeny vady simulující reálné trhliny, jsou velmi vhodný typ zkušebních těles pro ověřování softwarových nástrojů.

Kromě této činnosti mohou být využity pro optimalizaci inspekčních postupů v rámci kvalifikace NDT, kvalifikace personálu a pomoci při interpretaci výsledků UT.

Předložený článek vznikl díky projektu podporovaného Technologickou agenturou České republiky TN01000007 v rámci Programu Národní centra kompetence – 1. VS.