



VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉHO MODELOVÁNÍ JAKO PODPORY PROVOZNÍCH KONTROL ULTRAZVUKEM A V PROCESU NDT KVALIFIKACÍ

P. Vlček, P. Mareš

ÚJV Řež, A.S., ČESKÁ REPUBLIKA

ABSTRAKT

Modelování a simulace ultrazvukového zkoušení je stále více aplikováno v různých oblastech průmyslového využití NDT včetně provozních kontrol na jaderných elektrárnách. Aplikace má velice širokou oblast využití při hodnocení a analýze získaných dat, modelování průběhu UZ měření, návrhu geometrie sondy a parametrů UZ zkoušení, atd.

Součástí NDT kvalifikací prováděných v ÚJV Řež je také podpora optimalizace inspekčních postupů a především technických zdůvodnění pomocí numerické simulace ve výpočtovém kódu CIVA. Softwarová platforma CIVA, vyvíjená firmou CEA, je zaměřena na počítačové modelování jednotlivých metod nedestruktivního zkoušení materiálů, především ultrazvukové zkoušení a měření pomocí vířivých proudů.

Při kvalifikacích je pomocí numerické simulace prováděna predikce velikosti UZ odezvy indikací od nečistot na CAD modelech odpovídající skutečným komponentům a potrubním systémům JE typu VVER 440 a VVER 1000. Mezi nejnovější aplikace také patří ověřování možností využití metody phased array v rámci NDT kvalifikací.

Klíčová slova: kvalifikace, simulace, sonda phased array, ultrazvuk

ÚVOD

Modelování a simulace procesů a fyzikálních jevů probíhajících při dané činnosti je velice účinný nástroj pro zvýšení produktivity a kvality této činnosti. To se týká zejména i oblasti NDT, kde výsledky měření a jejich interpretace je závislá na mnoha podmínkách a zkušenostech pracovníka.

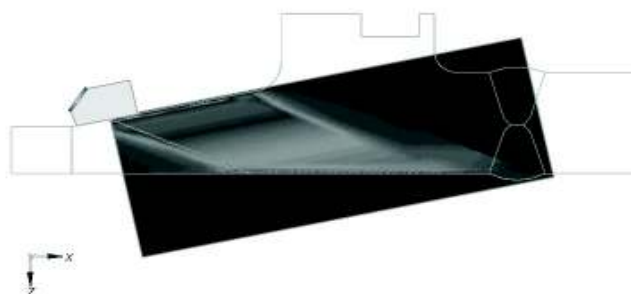
Počítačové modelování v oblasti UZ zkoušení si klade za úkol co nejpřesněji modelovat šíření UZ vlnění v materiálu a na základě tohoto modelu predikovat velikost odezvy od simulovaných defektů. Protože interpretace výsledků UZ měření je složitá a je nutné doložit, že použitá metoda je schopná nalézt v zkoušeném materiálu defekty podle nastavených kritérií, je v ČR před prováděním provozních kontrol svarů na JE požadováno provedení *kvalifikace*. V kvalifikačním procesu se ověřuje navržená metoda měření, zařízení a v neposlední části i personál. Kvalifikace mechanizovaného nebo ručního UZ měření se skládá z vypracování inspekčního postupu (IP), kde jsou navrženy sondy použité při měření, postup měření a kritéria pro vyhodnocení indikací. Po vypracování tohoto IP je provedeno měření a vyhodnocení naměřených výsledků. Pokud naměřené výsledky splňují zadané kritéria, je vypracováno technické zdůvodnění a možno proces kvalifikace ukončit. V případě, že není dosažen požadovaný výsledek, je nutné navrhnout nové sondy a znovu provést měření. Proces se opakuje až do doby, kdy výsledky splňují požadovaná kritéria.

CHARAKTERISTIKA SOFTWARE CIVA 8.1

Cílem počítačového modelování UZ zkoušení je matematicky popsat chování UZ vlnění při šíření v prostředí a při dopadu vln na rozhraní, které může představovat i defekt. Pro zobrazování naměřeného i vypočteného signálu se využívá elektrický signál zpracovaný pomocí Fourierovy transformace, která zobrazí elektrický signál v amplitudové charakteristice. Tato transformace se používá i v softwaru CIVA 8.1.

Programová platforma CIVA je vyvíjena ve výzkumném ústavu CEA v Saclay, Francie. Tato platforma je v současné době určena pro simulaci a modelování nedestruktivního zkoušení ultrazvukem nebo vířivými proudy. Aby byla zajištěna co nejlepší definice popisovaných dějů, které nastávají při nedestruktivní kontrole, je pro každý charakteristický děj vyvinut samostatný modul. Mezi moduly, které jsou využívány při simulaci UZ zkoušení, jsou **Civa US** a **Mephisto**. Modul **Civa US** je ještě rozdělen do tří módů - *Beam Computation*, *Defect Response* a *Zone Coverage*.

Mód *Beam Computation* slouží k výpočtu UZ pole sondy v nastaveném materiálu. V módu *Defect Response* je počítána odezva od navrženého defektu a v módu *Zone Coverage* je vypočtena oblast, v které se při zadaných limitách pohybu sondy šíří UZ vlnění. Výsledkem je pole, které ukazuje intenzitu akustického tlaku v jednotlivých místech materiálu (obr. 1). Výpočet lze provádět obecně, tj. bez vlivu geometrie defektu, nebo pro určitý defekt. Výpočtový modul **Mephisto** plní stejnou funkci jako mód *Defect Response*.



Obr. 1: Oblast „skenování“ sondy 55°T1,5 – pokles akustického tlaku (intenzity signálu) vlivem útlumu a rozptylu UZ vlnění

KVALIFIKACE ULTRAZVUKOVÉHO ZKOUŠENÍ

V procesu kvalifikace NDT se simulace UZ zkoušení zejména uplatňuje jako podpora optimalizace inspekčních postupů. To se týká především návrhu a optimalizaci parametrů UZ sond. Na základě zkušeností a znalostí z předchozích měření jsou navrženy sondy. V případě složitější geometrie tělesa je pro stanovení pole s rozlišením intenzity UZ signálu použit mód *Zone Coverage*. Na základě zobrazení intenzity UZ pole pro jednotlivé typy sond lze stanovit, jaký úhel sondy je nejvhodnější pro detekci defektů v jednotlivých místech svaru. Toho se využívá zejména u těles, které mají složitější tvar, nerovný povrch a nebo při omezení pohybu sondy.



Obr. 2: Model zkušební tělesa ANPP/ZT1-KO

Popis zkušební tělesa ANPP/ZT1-KO

Zkušební těleso „ANPP/ZT1-KO“ (obr. 2) je vyrobeno z části potrubí DN200 na potrubní trase pod hrdly kompenzátoru objemu, které bylo používáno v ANPP (Metsamor). Na potrubí se nacházejí 2 svarové spoje, heterogenní a homogenní austenitický svar. Heterogenním svarový spoj je tvořen feritickým materiálem ze strany hrdla KO, na kterém je proveden austenitický silový návar, a austenitickým potrubím. Samotný spoj je austenitický. Ve vzdálenosti 5 cm od osy heterogenního svaru je vytvořen austenitický svar. Velmi malá vzdálenost jednotlivých svarů velice znesnadňuje měření a interpretaci výsledků.

Pro účely optimalizace inspekčních postupů a provádění praktických zkoušek v rámci kvalifikace mechanizovaného a ručního zkoušení ultrazvukem bylo v obou svarových spojkách vyrobeny umělé defekty typu EDM SE, které simulují trhliny vznikající především na rozhraní svaru a TOO.

Popis svarového spoje „ANPP/ZT1-KO/1Ho“

Základní a svarový materiál:

Základní materiál: 08Ch18N10T
 Svarový materiál: Sv04Ch19N11M3
 Elektroda EA-400/10T

Rozměry svarového spoje:

Jmenovitý vnější průměr: 245 mm
 Jmenovitý vnitřní průměr: 209 mm
 Jmenovitá tloušťka stěny: 18 mm

Popis svarového spoje „ANPP/ZT1-KO/Ht“

Základní a svarový materiál:

Základní materiál ze strany hrdla: 22K
 Základní materiál ze strany kolena: 08Kh18N10T
 Svarový materiál: Sv04Ch19N11M3
 Elektroda EA-400/10T

Rozměry svarového spoje:

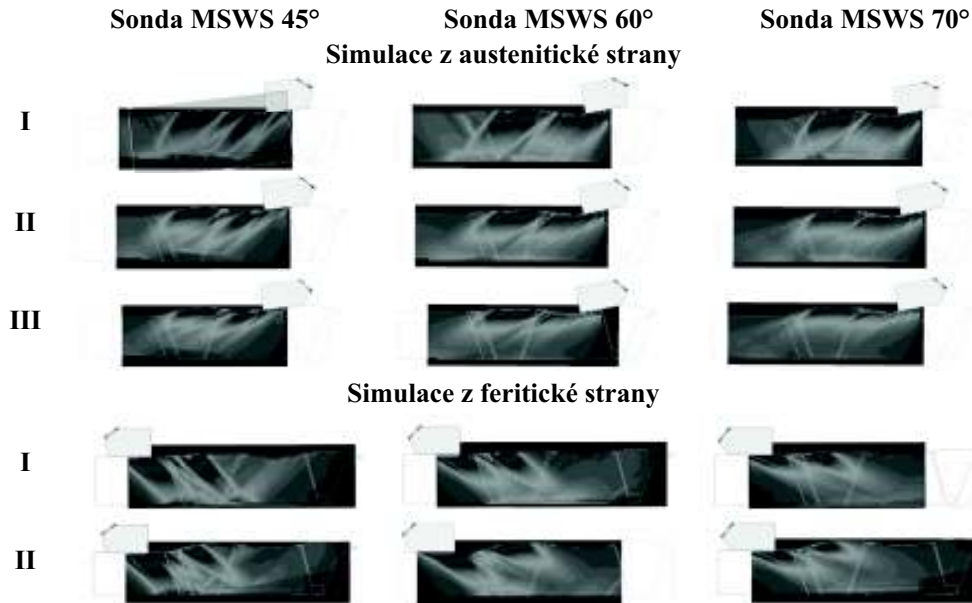
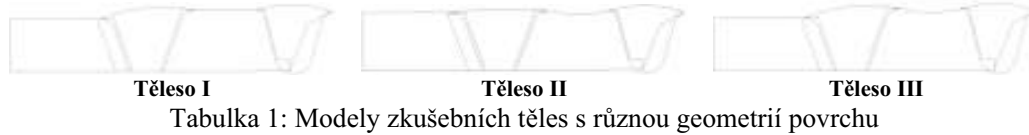
Jmenovitý vnější průměr: 245 mm
 Jmenovitá tloušťka stěny: 18 mm
 Jmenovitý vnitřní průměr: 209 mm

APLIKACE NUMERICKÉ SIMULACE V RÁMCI KVALIFIKACE NDT

Mód *Zone Coverage* byl použit při kvalifikaci UZ zkoušení heterogenního svarového spoje pod hrdlem KO na potrubí Dn200 kompenzace objemu. Jako zkušební těleso bylo použito reálná část potrubí. Geometrie povrchu heterogenního svaru a okolí je u tohoto svaru velice proměnlivá, a proto bylo nutné provést hodnocení vlivu změny geometrie povrchu a velikosti defektu na velikost UZ odezvy.

Simulace byla provedena na 3 modelech zkušební tělesa (tab. 1), jejichž geometrie povrchu přibližně odpovídá tvarům zjištěným u tohoto zkušební tělesa. Nastavení simulace odpovídá údajům uvedeným v IP, kdy na zkoušení byly použity sondy MSWS45°, MSWS60° a MSWS70°. Jelikož z feritické strany dochází ke změně tvaru povrchu pouze u 2 těles, jsou provedena pouze 2 simulace.

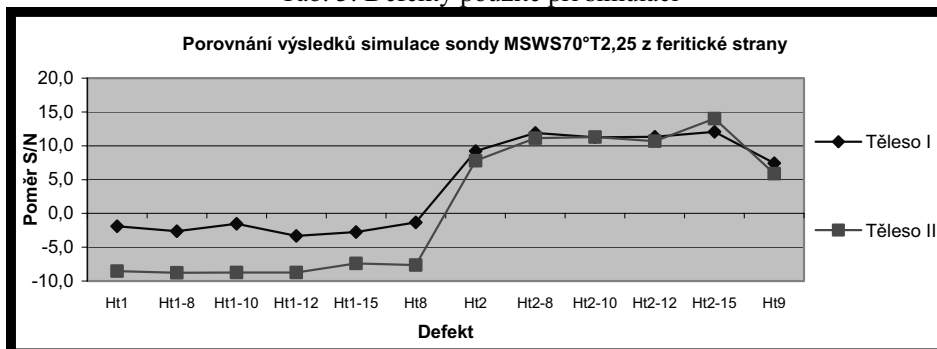
Navržené geometrie povrchu svaru



Tab. 2: Výsledky simulace v módu Zone Coverage - UZ pole sondy odpovídající geometrii navrženým modelům

Defekt	Výška	Umístění	Defekt	Výška	Umístění
Ht1	4	+WFL	Ht2	5	-WFL
Ht1-8	8	+WFL	Ht2-8	8	-WFL
Ht1-10	10	+WFL	Ht2-10	10	-WFL
Ht1-12	12	+WFL	Ht2-12	12	-WFL
Ht1-15	15	+WFL	Ht2-15	15	-WFL
Ht8	6	+WFL	Ht9	4	-WFL

Tab. 3: Defekty použité při simulaci



Graf 1: Hodnocení vlivu velikosti defektu na intenzitu odezvy

Jelikož není možné na základě zobrazeného pole stanovit velikost odezvy pro jednotlivé typy defektů a jejich umístění, je nutné provést ještě výpočet odezvy v módu *Defect Response*. Pro zjištění vlivu na velikosti defektu byly provedena simulace na celkem 12 defektech, které byly umístěny na rozhraní svaru a návaru či základního materiálu (tab. 3).

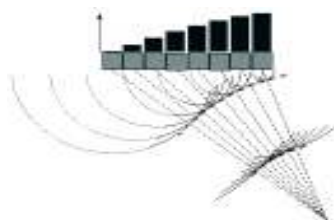
Výsledek simulace UZ zkoušení ukázal, že vliv velikosti defektů z feritické strany i austenitické strany je zanedbatelný (graf 1). Pouze u sondy MSWS70° při měření z austenitické strany byla zjištěna závislost velikosti defektů na odezvě u defektů, které jsou umístěny na +WFL, tj. na protilehlém rozhraní svaru a návaru.

Výsledky získané při simulaci UZ odezvy od defektů je nutné interpretovat na základě zkušeností, které byly získány při porovnávání výsledků simulace a měření. Vliv velikosti defektů je zde potlačen jednak z důvodu, že rozhodujícím signálem detekce je rohové nebo nepřímé echo, které má díky idealizovaným plochám výrazně silnější signál. Dále je zjištěno, že u simulace je menší závislost velikosti odezvy na defektu než je zjištěno u měření, a defektů, které jsou nakloněny kolmo na UZ svazek (defekty umístěné na protilehlém rozhraní svaru a základního materiálu) mají nadhodnocený výsledek.

APLIKACE MĚŘENÍ PHASED ARRAY SONDOU

Ultrazvuková Phased array metoda je pokročilá metoda průmyslového nedestruktivního zkoušení, původně objevena Albetem Mackovským na Stanfordské univerzitě.

Phased array sonda je tvořena z několika elementů, které jsou samostatně buzeny a mohou fungovat jako samostatné sondy. UZ svazek je získán složením vln z jednotlivých elementů, kdy směr je ovlivňován časovými rozdíly ve vyslání signálu z jednotlivých elementů (obr. 4). Uspořádání elementů tudíž ovlivňuje možnosti sondy. Podle nastavení a požadavků UZ měření je možné určité elementy vypnout nebo pouze část jich aktivovat jako vysílače a část jako přijímače. Pouze frekvence sondy, která je závislá na tloušťce měničů, je neměnná.



Obr. 4: Buzení a fokusace UZ svazku u phased array sondy

V programu CIVA je možné nastavit parametry phased array sondy tak, aby odpovídaly sondě použité při měření. Současná verze programu CIVA umožňuje 7 typů fokusace UZ svazku. Mezi nejběžněji používané typy patří **Sectorial scanning**.

Sectorial scanning spočívá v změně úhlu fokusace UZ svazku. Pro tento režim se nastaví rozmezí úhlů, v kterém je prováděna fokusace svazku, a velikost kroku ve stupních. Pro jednotlivé kroky je vypočítáno časové prodlení vyslání impulsu z jednotlivých elementů, které umožní změnu úhleh UZ svazku. Spojením jednotlivých kroků pomocí algoritmu *Beam steering* je získáno sektorové zobrazení (S-scan), viz. obr. 7)

Postupná změna úhlu UZ svazku umožňuje najít optimální úhel pro detekci defektů ve vybrané výšce. Tento typ měření se uplatňuje především v místech, kde je omezen pohyb sondy. Významný přínos tato metoda dosahuje i při stanovení velikosti defektů, jelikož ve většině případů, pokud nezanikne v šumu vznikající v polykrystalickém materiálu, je patrný difrakční signál od čela defektu.

PŘÍKLAD POUŽITÍ METODY PHASED ARRAY V PRAXI

V rámci ověřování použití phased array sondy při UZ měření byla provedena ruční kontrola UZ odezvy níže uvedenou phased array sondou na heterogenním a homogenním svaru zkušební tělesa potrubí DN200 ke kompenzátoru objemu. Současně s testováním phased array sondy byly v programu CIVA provedeny numerické simulace tohoto měření. Výsledky získané současně pomocí simulace a měření je možné vzájemně porovnat a pro jednotlivé způsoby stanovit velikosti necelistvostí. Pohyb sondy byl prováděn těsně u koruny svaru po celém obvodu svaru. U obou svarů byl přístup možný pouze z jedné strany.

Popis sondy

Lineární typ měniče
16 elementů – 12x12mm
Frekvence 2,25Mhz

Typ klínu

SA1-N60S

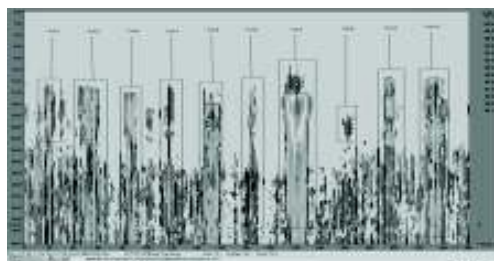
Výsledky měření homogenního svaru

Měření bylo prováděno pouze z jedné strany, protože na straně, kde je umístěn heterogenní svar je nedostatečná plocha pro umístění sondy. Bylo použito tzv. sektorové skenování, které spočívá ve změně fokusace UZ svazku v rozmezí úhlů 45° až 80°. Výsledkem je zobrazení C-scan a S-scan. Z těchto zobrazení lze stanovit velikost odezvy i polohu indikace.

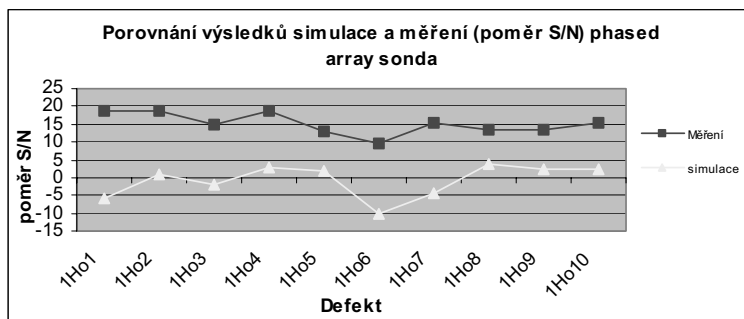
Při UZ kontrole provedené phased array sondou byly prokazatelně detekovány všechny defekty, které obsahoval svarový spoj (obr. 5). To bylo dosaženo i sondami 60°TRL2-Aust a 70°TRL2-Aust (obr. 6). Mezi výsledky měření a simulace (graf 2) pro sondu PA i byly získány podobné tendence s určitými odchylkami, které jsou způsobeny omezenými možnostmi modelovat reálné změny geometrie a struktury svarového spoje.



Obr. 5: Příklad C-scanu pro pohyb 0-400 mm



Obr. 6: Výsledek detekce sondou 70°TRL2 (D-scan)



Graf 2: Porovnání výsledků simulace a měření homogenního svaru metodou phased array

Defekt		Sonda 70TRL2-Aust						PA sonda			
		Měření				Simulace		Měření		Simulace	
		s korunou		bez koruny							
Reálná výška	výška (mm)	dH (mm)	výška (mm)	dH (mm)	výška (mm)	dH (mm)	výška (mm)	dH (mm)	výška (mm)	dH (mm)	
Ho1	4,00	5,20	1,20	4,84	0,84	5,50	1,50	2,40	-1,60	5,00	1,00
Ho2	8,00	4,30	-3,70	7,92	-0,08	8,10	0,10	10,90	2,90	9,50	1,50
Ho3	6,00	3,80	-2,20	5,28	-0,72	5,80	-0,20	5,50	-0,50	7,50	1,50
Ho4	4,00	5,60	1,60	6,72	2,72	4,30	0,30	7,50	3,50	5,10	1,10
Ho5	8,00	5,20	-2,80	6,83	-1,17	7,50	-0,50	6,60	-1,40	9,90	1,90
Ho6	5,00	5,60	0,60	5,48	0,48	5,00	0,00	3,00	-2,00	5,80	0,80
Ho7	12,00	11,40*	-0,60	10,62	-1,38	9,40	-2,60	10,20	-1,80	14,40	2,40
Ho8	7,00	6,50	-0,50	5,83	-1,17	7,30	0,30	8,30	1,30	9,00	2,00
Ho9	6,00	5,80	-0,20	6,80	0,80	5,70	-0,30	4,30	-1,70	8,00	2,00
Ho10	10,00	6,40	-3,60	7,17	-2,83	8,70	-1,30	8,80	-1,20	11,90	1,90

Tab. 3: Hodnocení velikosti defektů sondou 70TRL2-Aust a phased array sondou

* výsledek je získán pomocí odražené vlny

Při hodnocení velikosti defektů u homogenního svaru 1Ho (tab. 3) bylo zjištěno, že u navržených sond nelze jednoznačně stanovit velikost defektů, protože šířka koruny neumožňuje „proskanování“ horní části svarového spoje. Z tohoto důvodu bylo navrženo odstranění koruny svaru.

Výsledky získané na homogenním svaru ukazují, že všechny defekty byly detekovány jak sondou PA, tak i sondami 60°TRL2-Aust a 70°TRL2-Aust. Při stanovení výšky defektů bylo dosaženo mírně lepších výsledků sondou 70°TRL2-Aust než phased array sondou. Podmínkou bylo ale odstranění koruny svaru.

Současně byla prováděna simulace UZ měření v programu CIVA. Simulace prokázala shodu v zobrazení odezvy u jednotlivých defektů (obr. 7) a při porovnání intenzit odezvy mezi výsledky simulace a měření byla zjištěna částečná shoda. To umožňuje jednak predikovat intenzitu odezvy s určitou přesností. Výrazná shoda v zobrazení odezvy (S-scan) získané při simulaci umožňuje výrazně zpřesnit stanovení velikosti defektu.



Obr. 7: S-scany získané při simulaci a měření defektu 1Ho5

Výsledky měření Heterogenního svaru

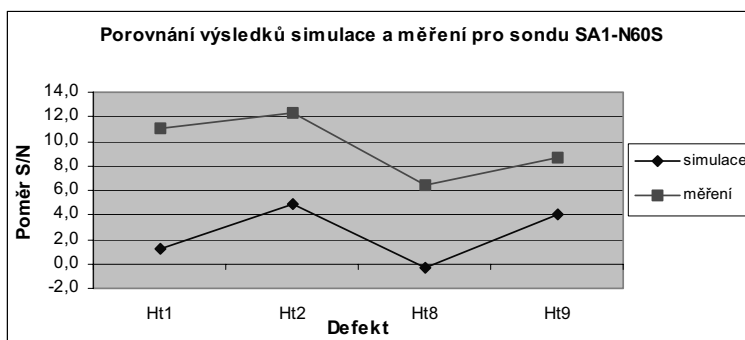
Jelikož je u heterogenního svaru možný velice malý pohyb sondy, byly pro UZ měření vybrány nejmenší dostupné sondy MSWS. Výsledky zjištěné těmito sondami (obr. 6) neukazují, že by bylo možné průkazně detekovat navržené defekty bez odstranění koruny. Z tohoto důvodu bylo použita sonda phased array. Měření bylo prováděno tzv. sektorovým skenováním, které spočívá ve změně fokusace UZ svazku v rozmezí úhlů 45° až 80°.

Výsledek je zobrazení C-scan a S-scan. Z těchto zobrazení lze stanovit velikost odezvy i polohu indikace.

Současně byla provedena i simulace v programu CIVA. Výsledky simulace prokázaly shodu v zobrazení odezvy (obr. 8) a i tendencemi u UZ odezvách zjištěných při simulaci a měření (graf 3).



Obr. 8: S-scany získané při simulaci a měření defektu Ht8



Graf 3: Porovnání simulace a AK sondou SA1-N60S z feritické strany

ZÁVĚR

Výsledky měření a simulace provedené na heterogenním a homogenním austenickém svaru ukázaly, že jednoznačným přínosem metody phased array je zlepšení detekce defektů při omezených možnostech pohybu sond a také stanovení velikosti defektů bez nutnosti odstranit korunu svaru.

Současně s hodnocením metody phased array byla provedeno i porovnání s výsledky simulace provedené v programu CIVA. Zjištěné výsledky ukázaly, že simulace umožňuje s určitými omezeními predikovat intenzitu UZ odezvy. Výrazná shoda v zobrazení UZ odezvy při simulaci a měření má významný přínos při vyhodnocování naměřených výsledků.

Tyto výsledky byly ověřeny pouze na výsledcích získaných měřeními na třech svarových spojích. Proto je nutné jejich platnost ověřit na dalších svarových spojích a pokusit se stanovit konkrétní podmínky, pro které bude platit závislost mezi výsledky simulace a měření sondou phased array.