

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Diplomová práce

Analýza imerzních ultrazvukových sond

Bc. Jan Procházka

2021/2022 PRAHA

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Procházka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466486**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza imerzních ultrazvukových sond

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of immersive ultrasound probes

Pokyny pro vypracování:

1. Fyzikální podstata ultrazvuku.
2. Popis vybraného materiálu a jeho využití v leteckém průmyslu.
3. Analýza normativních dokumentů.
4. Návrh experimentu testování imerzních ultrazvukových sond.
5. Vyhodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci zpracoval samostatně, za pomoci literatury a pramenů uvedených v příloženém seznamu zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád vyjádřil své poděkování všem, kteří mě v tvorbě tohoto díla podporovali. Poděkování patří v první řadě panu Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D., který vedl mou diplomovou práci. Děkuji především za podporu, cenné rady, a za metodické vedení. Dále bych chtěl poděkovat společnosti ATG s.r.o., za umožnění realizace výzkumných měření.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou ultrazvukových sond pro automatické zkoušení plochých CFRP desek v imersním prostředí. V teoretické části je ultrazvuková metoda zasazena do systému nedestruktivního zkoušení, rozebrána její fyzikální podstata, popsány ultrazvukové sondy a použité metody prozvučování. Dále je zde nastíněna problematika CFRP kompozitů s návazností na letecký průmysl a rozbor předpisů firmy Airbus S.A.S. na ultrazvukové testování. Ve výzkumné části je navržen optimální postup, podmínky zkoušení a určena kritéria vyhodnocení získaných dat pro metody PE a TTU. Práce dále obsahuje výsledky zkoušení, včetně jejich vyhodnocení a doporučení optimální sondy pro různé tloušťky CFRP desek. V příloze jsou k dispozici soubory naměřených dat.

Abstract

The diploma thesis deals with the analysis of ultrasonic probes for automatic testing of flat CFRP plates in an immersive environment. The ultrasonic method is settled in the system of non-destructive testing in the theoretical part, its physical nature is analyzed, ultrasonic probes and used methods of sounding are described. It also outlines the issue of CFRP composites in relation to the aviation industry and analysis of Airbus S.A.S regulations for ultrasonic testing. The research part proposes the optimal procedure, testing conditions and evaluation criteria of the obtained data for PE and TTU methods. The thesis also contains the test results, including their evaluation and recommendation of the optimal probe for different thicknesses of CFRP plates. There are measured data files available in the appendix.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	8
Úvod	9
1 NDT	10
1.1 Základní metody NDT	10
1.2 Základní rozdělení vad dle NDT	12
2 Teorie ultrazvuku	13
2.1 Fyzikální podstata ultrazvuku	13
2.1.1 Kmitání, vlnění a druhy vln	14
2.1.2 Šíření vln	18
2.1.3 Dopad na rozhraní.....	23
2.1.3 Akustický tlak.....	25
2.1.4 Akustická vazba	26
2.2 Ultrazukové sondy	28
2.3 Metody prozvučování	30
3 Kompozity	32
3.1 CFRP kompozity	33
3.1.1 CFRP kompozity v leteckém průmyslu	35
4 Předpisy společnosti Airbus na UT testování	37
4.1 Požadavky na výrobu kompozitních desek s umělými vadami	38
4.2 Požadavky na sondy a automatické systémy	39
4.3 Požadavky na metodu PE.....	40
4.4 Požadavky na metodu TTU	41
5 Analýza ultrazukových imersních sond	42
5.1 Podmínky měření.....	43
5.1.1 Imersní ultrazukové sondy	43
5.1.2 CFRP vzorky s umělými vadami	44
5.1.3 Parametry automatického skenování	47
5.2 Metody vyhodnocení dat výsledků	48
5.2.1 Metody vyhodnocení výsledků PE	48
5.2.2 Metody vyhodnocení výsledků TTU	49

6	Metoda odrazová PE	50
6.1	Postup měření PE.....	51
6.2	Deska tloušťky 2 mm PE	54
6.2.1	Vyhodnocení výsledků T 2 mm PE	58
6.3	Deska tloušťky 5 mm PE	59
6.3.1	Vyhodnocení výsledků T 5 mm PE.....	66
6.4	Deska tloušťky 10 mm PE	67
6.4.1	Vyhodnocení výsledků T 10 mm PE.....	77
7	Metoda průchodová TTU.....	78
7.1	Postup měření TTU	80
7.2	Vodní dráha sond.....	81
7.3	Deska tloušťky 2 mm TTU	82
7.3.1	Vyhodnocení výsledků T 2 mm TTU	84
7.4	Deska tloušťky 5 mm TTU	85
7.4.1	Vyhodnocení výsledků T 10 mm TTU.....	89
7.5	Deska tloušťky 10 mm TTU	90
7.5.1	Vyhodnocení výsledků T 10 mm TTU	94
8	Shrnutí výsledků	95
	Závěr	97
	Seznam použitých zdrojů	98
	Přílohy	101
	Seznam příloh	101

Seznam symbolů a zkratek

ACF.....	activated carbon fibers
c	rychlost zvuku v daném prostředí
c_1, c_2, c_l, c_t	rychlost šíření ultrazvukových vln
CFRP	carbon fibre-reinforced plastic
D	faktor průchodu
D_0	jmenovitý průměr měniče
E	modul pružnosti v tahu
EMAT	elektromagnetický akustický převod
F	ohnisková vzdálenost
f_0	jmenovitá frekvence
G	modul pružnosti ve smyku
GFRP	glass fibre-reinforced plastic
GP	general purpose
H_1	výchozí výška echa
H_2	současná výška echa
HP	high performance
N	délka blízkého pole sondy
NDT	non-destructive testing, nedestruktivní zkoušení
P	akustický tlak
PE	pulse-echo, odrazová metoda
R	faktor odrazu
r	poloměr křivosti rozhraní
T	tloušťka desky
TOFD	time of flight diffraction
TTU	through transmission technique, průchodová metoda
v	akustická rychlost
V_d	vodní dráha
Z	akustický vlnový odpor prostředí
μ	Poissonovo číslo
ρ	hustota
ΔV	rozdíl frekvence zesílení
φ_{-6dB}	poloviční úhel rozevření při poklesu 6 dB
α_1, α_2	úhly šíření vlnění vůči normále

Úvod

Tato diplomová práce se věnuje analýze ultrazvukových imersních sond. Cílem je nalézt optimální sondu pro automatické zkoušení plochých CFRP desek o různých tloušťkách. Právě takovéto desky jsou díky svým výhodným vlastnostem využívány v leteckém průmyslu. Pro zajištění bezpečnostních požadavků musí probíhat pravidelné kontroly těchto dílů, nejen ve výrobě, ale i během provozu. V současné době velmi často probíhá měření ručně, což je časově náročné. Práce vzniká ve spolupráci se společností ATG s.r.o., která vyvíjí prototypový přístroj pro automatickou kontrolu, který přináší značnou časovou úsporu. Správná volba sondy je při automatickém skenování kritická.

Teoretická část práce se věnuje významu ultrazvukového testování v nedestruktivní kontrole. U ultrazvuku je zde rozebrán jeho fyzikální základ zahrnující podstatu vln, zákonitosti jejich šíření nebo akustický tlak, jehož změny nám umožňují zjištění indikace. V závěru teorie o ultrazvuku se nachází rozbor ultrazvukových sond a vybraných metod zkoušení s ohledem na experimentální část. V následující kapitole přichází popis zkoumaného kompozitního materiálu. Ten je doplněn o uvedení praktického použití CFRP dílů v leteckém průmyslu. Jakožto výchozí požadavky pro tvorbu praktické části byly určeny předpisy společnosti Airbus S.A.S. Ty jsou zpracovány v poslední části teorie. Zaměřují se především na zkoušení metodami PE, TTU, požadavky na výrobu desek s umělými vadami a automatické zkoušení.

V praktické části je navržen postup pro analýzu sond. Jsou zde popsány sondy určené pro zkoušení, CFRP vzorky, na kterých bude měření probíhat, podmínky laboratoře a průběh automatického skenování. Rovněž se zde nachází kritéria pro hodnocení výsledků. Další kapitola se věnuje samotnému zkoušení, a to metodou PE. Měření probíhá podle určeného postupu, vybranými sondami na deskách tloušťky 2, 5, 10 mm, ve kterých jsou umístěny uměle vytvořené vady o předem známých rozměrech. U jednotlivých vzorků jsou vždy vyhodnocena příslušná kritéria a doporučena optimální sonda. Obdobným způsobem je zpracována i metoda TTU. Ta se však ze své podstaty odlišuje jak postupem, tak i hodnocenými parametry. V poslední kapitole jsou shrnuty výsledky obou metod.

1 NDT

Nedestruktivní zkoušení neboli NDT je soubor metod a postupů, které slouží k nedestruktivní analýze zkoušené entity. Používá se v předvýrobní, výrobní i provozní fázi výrobku. Hlavními účelem NDT je optimalizace výrobního postupu, ověření kvality výroby nebo produktu a ověření požadovaných vlastností během provozu. Nejčastější aplikace je zjištění defektů nebo vlastností entity. [1]

1.1 Základní metody NDT

Vizuální metoda

Hlavní výhodou této metody je vysoká rychlost a nízké nároky. Vyhodnocuje se pomocí lidského oka nebo pomocí jednoduchých pomůcek. Je zde nutné zajistit především správné světelné podmínky, zrakovou způsobilost operátora a jeho proškolení.

Kapilární metoda

Je vhodná pro zjišťování povrchových vad. Její základní princip spočívá v nanesení penetrantu na povrch zkoušené součásti. Odstranění přebytečné hmoty z povrchu, tedy penetrant, zůstane v případných nečelistvostech, a nanesení vývojky která zvýrazní problematické části. Metoda je tedy relativně jednoduchá a levná.

Magnetická prášková metoda

Metoda je vhodná především pro kovové materiály, které jsou feromagnetické. Je tedy možné je zmagnetizovat, a na povrch nanést feromagnetický prášek, který bude kopírovat magnetické pole. Toto magnetické pole je v místě případné vady zdeformováno.

Radiografická metoda

Podstatou je prozařování materiálu. Nejčastěji se používá záření gama, rentgenové záření, nebo fotony. Při průchodu materiálem se záření utlumuje. Je vhodné především pro zjišťování trojrozměrných vad.

Ultrazvuková metoda

Základní princip spočívá ve vyslání ultrazvukové vlny, která se šíří prostředím. Při dopadu vlny na rozhraní materiálů, se toto mechanické vlnění odráží. Vysílání vlny, příjem a zpracování probíhá pomocí sond, které jsou napojené na ultrazvukový přístroj.

Metoda vířivých proudů

Metoda je vhodná především pro zjišťování povrchových a podpovrchových vad u materiálů, které jsou elektricky vodivé. Metoda spočívá ve vyvolání střídavého napětí pomocí cívky. Zkoušený předmět se tedy stává uzavřeným polovodičem, ve kterém vznikají vířivé proudy. [1,2]

Jak již tedy plyne z popisu metod, ne každá je vhodná pro nalezení všech typů vad. Vždy je nutné se rozhodnout, co chceme zjišťovat a na jakém materiálu. Všechny zde uvedené metody jsou nepřímé, vyhodnocují se na základě indikací. Většinou se tedy doporučuje kombinace více metod, které se navzájem doplňují. Jedinou výjimkou je metoda vizuální, jejíž podstata umožňuje přímé vyhodnocení. Pro správnou interpretaci výsledků je nutné, aby personál byl proškolen a důsledně dodržoval postupy a nařízení. [1]

1.2 Základní rozdělení vad dle NDT

Vady mohou vzniknout v kterékoliv fázi výrobního procesu. Jak již bylo řečeno, ne všechny metody lze použít pro všechny typy vad. Je tedy nutné vady správně zařadit.

Podle jejich umístění:

Vady povrchové - typicky spojeny s povrchem případně vystupují nad povrch

Vady vnitřní - nejsou spojeny s povrchem nachází se tedy uvnitř součásti

Podle jejich charakteru:

Vady objemové - jejich rozměry jsou ve všech směrech stejné, například bubliny

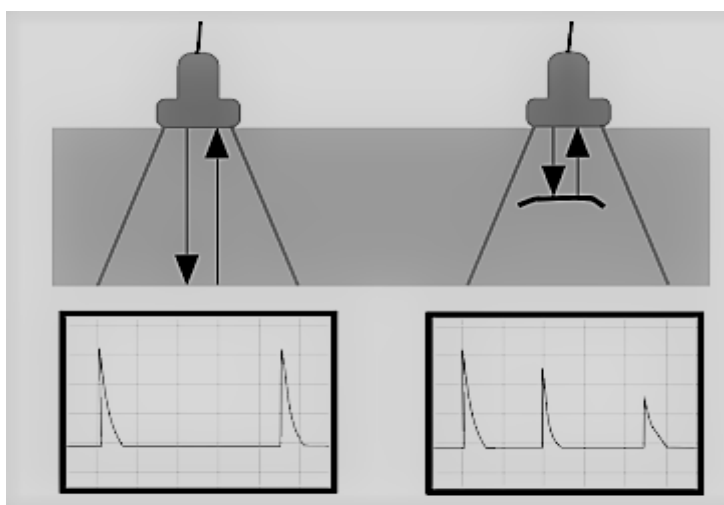
Vady plošné - rozměry v jednom ze směrů se výrazně liší. Jedná se například o delaminace, trhliny [1,3]

Symbol	Název metody	Schopnost detekovat	Schopnost detekovat vady / indikace			
			Povrchové	Vnitřní	Objemové	Plošné
VT	Vizuální metoda (Visual Testing)	vady	●	...	●	●
PT	Kapilární metoda ¹⁾ (Penetrant Testing)	indikace	●	...	●	●
MT	Magnetická metoda prášková ²⁾ (Magnetic Particle Testing)		●	○	●	●
RT	Radiografická metoda (Radiographic Testing)		◐	●	●	◐
UT	Ultrazvuková metoda (Ultrasonic Testing)		◐	●	●	●
ET	Metoda vířivých proudů ³⁾ (Eddy Current Testing)		●	○	●	●
Vhodnost pro detekci: ● = vysoká ◐ = střední ○ = nízká ... = nulová ¹⁾ Základním požadavkem pro realizaci kontroly je suchý a čistý povrch ²⁾ Metoda je vhodná jen pro feromagnetické materiály ³⁾ Metoda je vhodná jen pro vodivé materiály						

Obrázek 1: Metody NDT a jejich použití [3]

2 Teorie ultrazvuku

Základem při ultrazvukovém měření je ultrazvukový přístroj, který je vybaven sondou. Přístroj vytváří budící impuls, který má krátké trvání a vysoké napětí. Cílem impulzu je vytvořit mechanické kmity v měniči sondy. Kmity se následně šíří entitou jako zvuková vlna. Při dopadu na rozhraní dvou prostředí se část odrazí a je přijata zpět sondou. Následně se výsledky zobrazí ve formě echa na výstupním aparátu zařízení. Přístroj se sondou tedy zajišťuje vysílání, přijímání a zpracování signálů. [3]



Obrázek 2: Princip ultrazvukové metody [4]

2.1 Fyzikální podstata ultrazvuku

Zvuk můžeme definovat jako šíření mechanického vlnění skrze pevné látky, tekutiny nebo plyny. Šíření zvuku je ovlivněno vlastnostmi prostředí a frekvencí zvuku. Při šíření se vlna může odrážet, absorbovat, ohýbat nebo lámat. V případě ultrazvuku se pohybujeme v oblasti frekvencí nad 20 000 Hz. Pokud frekvence překročí hodnotu 100 000 Hz, začíná se šířit v paprscích, podobně jako světlo. To umožňuje provádět skenování skrz materiály. Díky tomu ultrazvukové vlnění nachází své uplatnění v nedestruktivním testování, medicíně, čištění součástí, nebo svařování plastů. Při velmi vysokých frekvencích nad 100 MHz dochází ke snížení schopnosti efektivního šíření. [3,5]

V následující kapitole budou objasněny hlavní ultrazvukové fyzikální principy s vazbou na následující praktickou část práce.

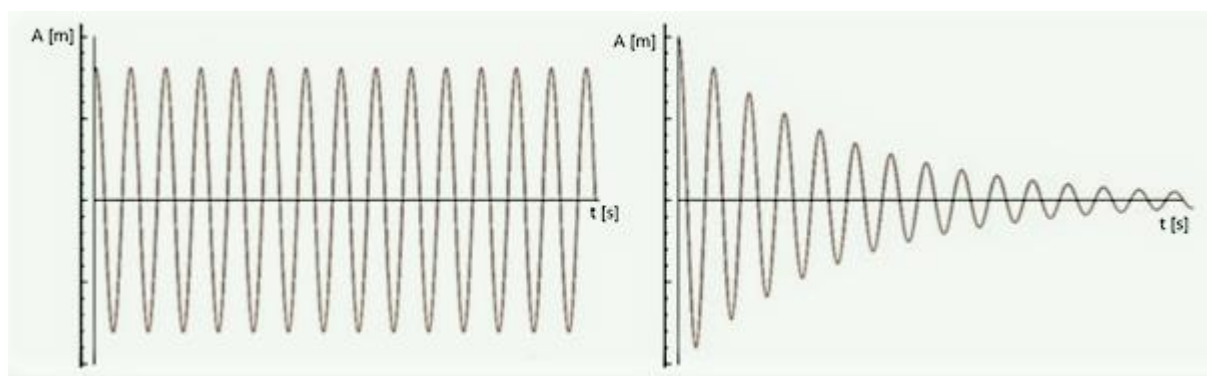
2.1.1 Kmitání, vlnění a druhy vln

Kmitání, tedy pohyb kolem rovnovážného stavu oscilátoru, můžeme zjednodušeně definovat pomocí následujících veličin:

Tabulka 1: Základní veličiny kmitání

Veličina	Značení	Jednotka	Definice
Amplituda	A	[m]	Maximální výchylka od rovnovážné polohy v daném bodě
Perioda	T	[s]	Doba trvání jednoho kmitu
Frekvence	f	[Hz]	Počet kmitů za jednu sekundu

Pro ultrazvukové účely je podstatné rozlišovat netlumené a tlumené kmitání. Netlumené kmitání je ideální případ, kdy těleso neovlivňují žádné jiné síly, které by kmitu utlumovaly. Tato situace nastává však pouze v minimálním počtu případů. Častěji se setkáme s tlumeným kmitáním, kdy maximální amplituda s časem klesá. To ovlivňuje výsledný tvar vlny, jak je znázorněno na obrázku níže. [3,6]



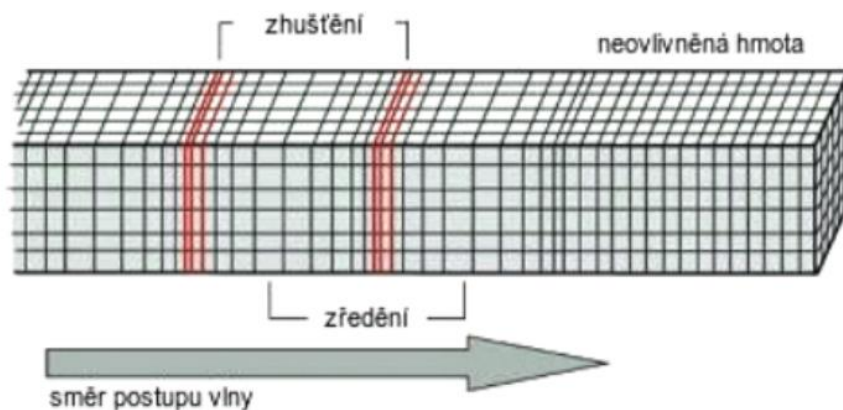
Obrázek 3: Tlumená a netlumená vlna [7]

Vlnění a druhy vln

Jak bylo zmíněno v předchozí části, vlnění se skládá z jednotlivých vln. Tyto vlny se ale mohou šířit v tělese různými způsoby. Je tedy nutné vlny od sebe rozeznávat. V ultrazvukové praxi se setkáváme nejčastěji s podélnými, příčnými, povrchovými nebo deskovými vlnami.

Podélné vlny

Částice, které kmitají kolem své rovnovážné polohy, se zde šíří ve směru vlny. Vlny se navzájem přibližují a následně oddalují, čímž dochází ke střídavému zhušťování a zředování prostředí. Podélné vlny jsou nejčastěji používané, především díky malému útlumu a všestrannosti prostředí, ve kterém se mohou šířit.



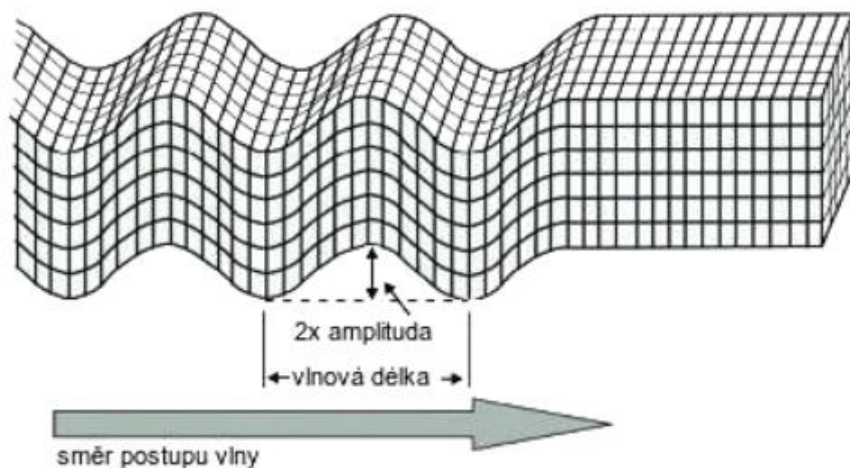
Obrázek 4: Podélná vlna [8]

Speciálním případem jsou pak plíživé vlny. Ty se šíří blízko pod povrchem, pokud se přiblížíme prvnímu kritickému úhlu. Tato vlna je schopná si poradit i s povrchovou nerovností nebo případnou nečistotou na povrchu. Díky svému charakteru je tedy vhodná především pro detekci podpovrchových vad. [3,9,10]

Příčné vlny

Dalším typem vlny je příčná vlna: zde se částice pohybují kolmo ke směru šíření vlny. Na rozdíl od podélné vlny zde nenastává zhuštění a zředění, ale pouze příčný pohyb částic. Příčné vlny mohou využívat pro své šíření pouze pevné látky nebo kapaliny s vysokou viskozitou. Je to tím, že ostatní prostředí nejsou schopna přenášet smykové zatížení. Díky nižší vlnové délce, než má podélná vlna, může při stejné frekvenci odhalit menší defekty.

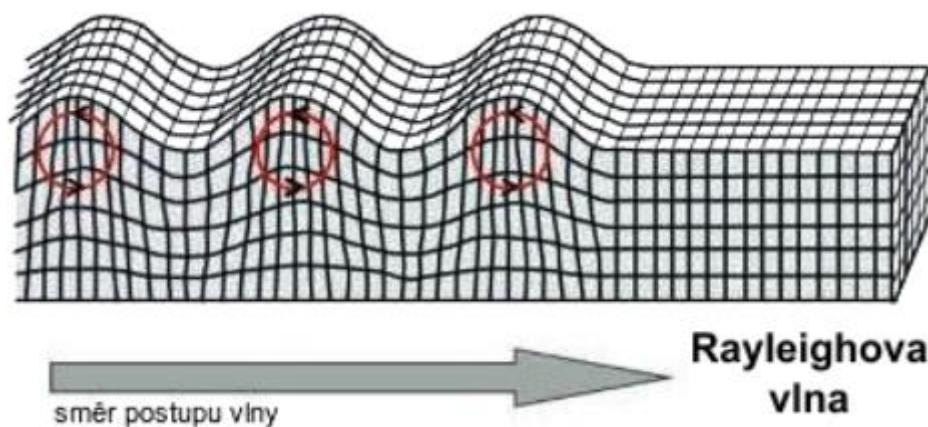
Tuto vlnu lze opět modifikovat na podpovrchovou příčnou vlnu. Opět se šíří blízko u povrchu, tentokrát pokud se přiblížíme druhému kritickému úhlu. Díky charakteru příčné vlny můžeme najít menší defekty než pomocí vlny podélné podpovrchové. [3,9]



Obrázek 5: Příčná vlna [8]

Povrchová vlna

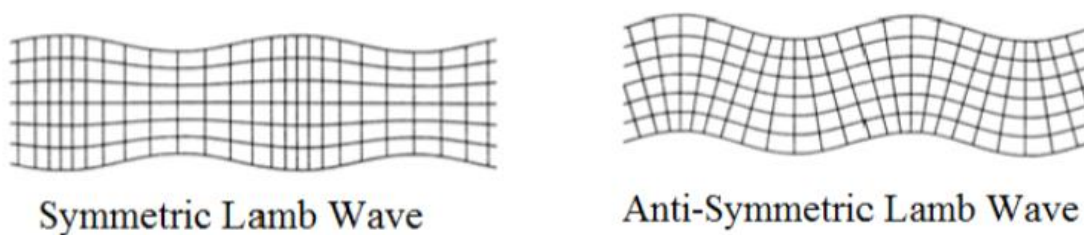
Povrchová vlna nebo také Rayleighova vlna vzniká, pokud zvětšíme úhel dopadu. Jak již název napovídá, šíří se pouze po povrchu, a to do hloubky vlnové délky. Částice zde vykonávají eliptický pohyb. Na povrchu vniká největší amplituda a zároveň je zde maximální energie vlny. Rychlost šíření odpovídá přibližně 92 % rychlosti příčné vlny. To zajišťuje ještě větší citlivost detekce než u příčné vlny. Na rozdíl od předchozích podpovrchových metod je zde nutné dodržet určitou kvalitu povrchu. Díky vysoké citlivosti jsme sice schopni zjistit malé defekty, na druhou stranu už i malé rýhy na povrchu mohou negativně ovlivnit jednoznačnost měření. [3,9]



Obrázek 6: Povrchová vlna [8]

Deskové vlny

Deskové vlny, označované někdy jako Lambdovy vlny, mají dva základní způsoby šíření: symetrický a asymetrický. Nastává zde změna oproti povrchové vlně, a to, že působí v celé tloušťce materiálu. Mohou být modifikovány tloušťkou materiálu, frekvencí nebo úhlem dopadu. Jsou vhodnější pro zkoušení tenčích součástí, jejichž tloušťka je srovnatelná s délkou vlny. Kromě desek se mohou šířit i v tyčích a drátech. [3,9,10]



Obrázek 7: Lambdova symetrická a asymetrická vlna [10]

2.1.2 Šíření vln

Šíření ultrazvukových vln může probíhat pouze v pružném prostředí. Je podstatné rozlišovat i zdroj vln, který může být bodový nebo plošný. Dalším podstatným faktorem je správné určení vlastností jak zkoušeného materiálu, tak i vazebného prostředí. Již bylo zmíněno, že vlny vznikají v měniči sondy. Ten může ovlivnit rozbíhání svazku nebo velikost útlumu vln. **[3]**

V průběhu šíření vlny rozlišujeme dvě hlavní oblasti: blízké a vzdálené pole. V blízkém poli dochází ke střídání lokálních nárůstů a poklesů akustického tlaku, a to nejen v podélném, ale i v příčném směru. Tento jev je způsoben charakterem vlnoplochy, kterou se vlny šíří, a dochází zde k jejich interferenci. Z důvodu obtížné interpretace výsledků z této oblasti se jí snažíme vyvarovat a provádět měření ve vzdáleném poli. Obecně platí, že čím větší měnič nebo frekvence, tím větší je délka blízkého pole a zároveň se zmenšuje úhel rozevření. S klesající rychlostí šíření se zvětšuje délka blízkého pole a také se zmenšuje úhle rozevření svazku. Délka blízkého pole je ve většině případů uváděna výrobcem. Lze však zjistit i experimentálně nebo za pomoci výpočtu: **[3,9,10]**

$$N = \frac{D_0^2 * f_0}{4 * c} [mm]$$

N - délka blízkého pole pro kruhový měnič [mm]

D₀- jmenovitý průměr měniče [mm]

f₀ - jmenovitá frekvence [Hz]

c - rychlost zvuku v daném prostředí [m/s] **[3]**

Vzdálenost, která je větší než blízké pole, se nazývá vzdálené pole a dochází zde k poklesu akustického tlaku a rozbíhání svazku. Úhel rozevření můžeme zjistit výpočtem. Uvedený vzorec platí pro kruhový měnič při poklesu 6 dB na okraji svazku:

$$\sin\varphi_{-6dB} = 0,5 \frac{c}{D_0 * f_0} [^\circ]$$

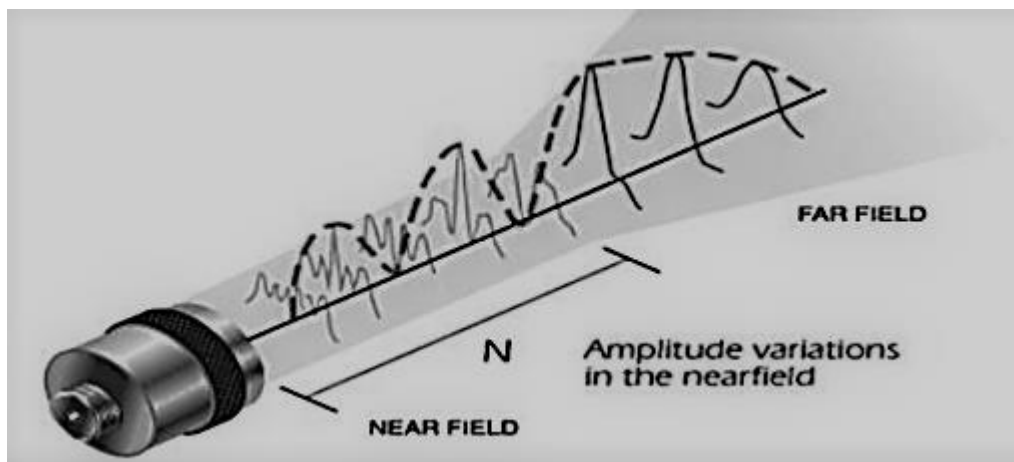
φ_{-6dB} - poloviční úhel rozevření při poklesu 6 dB [°]

D_0 - jmenovitý průměr měniče [mm]

f_0 - jmenovitá frekvence [Hz]

c - rychlost zvuku v daném prostředí [m/s]

Hodnota 0,5 je konstanta odvozená pro pokles 6 dB. Pro jinou velikost poklesu je třeba použít jinou hodnotu. [3]



Obrázek 8: Blízké a vzdálené pole [10]

Kromě blízkého a vzdáleného pole se někdy také definuje přechodová oblast, která začíná na konci blízkého pole. Její délka je definována jako trojnásobek délky blízkého pole. Tato oblast je ovlivněna blízkým polem, což komplikuje výpočty, nicméně současná počítačová výpočetní technika si umí s tímto problémem poradit. [9,10]

Rychlost šíření

Rychlost, kterou se ultrazvukové vlnění bude šířit, závisí na fyzikálních a mechanických vlastnostech prostředí. Určujícími faktory jsou modul pružnosti v tahu a smyku, Poissonovo číslo a hustota prostředí. Velký vliv má i teplota prostředí. S jejím růstem rychlost šíření ultrazvukových vln bude klesat, a naopak při snížení teploty zaznamenáme nárůst rychlosti. Určujícím faktorem také je, o jakou vlnu se jedná. Ve speciálních případech, jako jsou litiny, se vzorce modifikují podle složení materiálu. Obecně můžeme vyjádřit rychlost pro rozměry větší, než je ultrazvuková vlna, jako:

Rychlost šíření podélných vln -
$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1-\mu}{(1+\mu)*(1-2\mu)}} \quad [m/s]$$

Rychlost šíření příčných vln -
$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [m/s]$$

c_l - rychlost šíření podélných vln [m/s]

c_t - rychlost šíření příčných vln [m/s]

E - modul pružnosti v tahu [Pa]

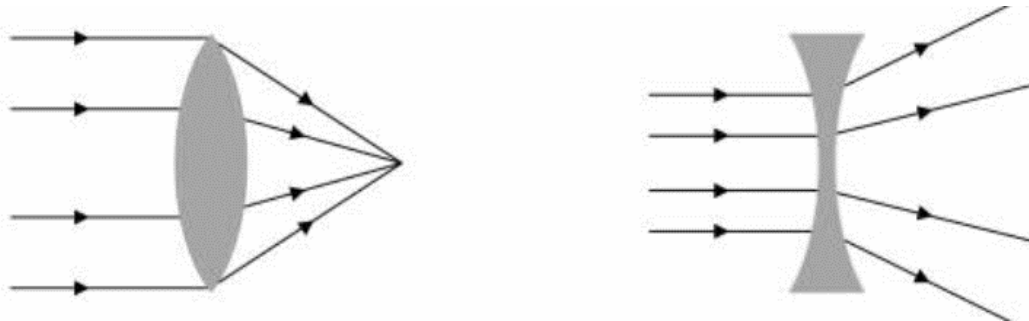
G - modul pružnosti ve smyku [Pa]

ρ - hustota prostředí [kg/m³]

μ - Poissonovo číslo [-] **[3,9]**

Fokusace vln

Fokusaci ultrazvukových vln můžeme popsat jako soustředění svazku do požadované oblasti nazývané ohnisko. Tím dosáhneme zvýšení přesnosti měření v dané oblasti. V závislosti na tom, jaké indikace chceme hledat, je nutné správně zvolit sondu, ať už fokusovanou nebo ne. Některé typy sond jsou schopny fokusovat svazek ve více než jednom místě. Fokusaci vln můžeme popisovat podobně jako v optice rozptylky a spojky v případě, že je svazek přímý a rozhraní, na které dopadá, je výrazně větší než délka ultrazvukové vlny. [3,14]



Obrázek 9: Spojka a rozptylka [15]

V případě válcového rozhraní, jaké mají i sondy použité v praktické části, můžeme ohniskovou vzdálenost spočítat jako:

$$F = \frac{r}{1 - \frac{c_2}{c_1}} [mm]$$

F - ohnisková vzdálenost [mm]

r - poloměr křivosti rozhraní [mm]

c_1 - rychlost ultrazvukových vln v prvním prostředí [m/s]

c_2 - rychlost ultrazvukových vln v druhém prostředí [m/s] [3]

Difrakce

Pokud ultrazvuková vlna narazí na překážku, přestává se v homogenním prostředí šířit přímočaře a ohne se. Jev, který popisuje tento ohyb se nazývá difrakce. Pokud je překážka v cestě vlny menší, než její vlnová délka, nastane ohyb pouze na okraji překážky. Pokud jsou si vlnová délka a velikost překážky sobě rovny, nastane úplný ohyb vlnění za tímto místem. V situaci výrazně větší překážky začíná tato oblast působit jako clona.

Difrakce nám komplikuje především práci s malými vadami, které se nacházejí blízko povrchu. Může se tedy stát, že překážka se bude jevit menší, než ve skutečnosti je, nebo ji nebudeme schopni vůbec odhalit. **[3,16]**

Interference

Interference je negativní jev, který nastává, pokud se setká více vln. Ty se navzájem ovlivňují a výsledný akustický tlak vlny je kombinací všech vstupujících složek. Dle fázového posunu vstupujících vln se následně určí, zda výsledná vlna bude větší, nebo menší. Výsledek můžeme zobrazit jako interferenční obrazec, který popisuje střídání zesilování a útlumu.

Interference je jedním z hlavních důvodů, proč je oblast blízkého pole nevhodná pro měření. **[9,17]**

2.1.3 Dopad na rozhraní

Při dopadu vlny na rozhraní nastává lom, tedy vniknutí vlny do druhého prostředí, a odraz, který se řídí zákonem odrazu. Ten říká, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu a odražené vlny zůstávají v rovině dopadu. Odražené a lomové vlny jsou nejčastěji podélného nebo příčného charakteru. V praxi nastává nejčastěji šikmý nebo kolmý dopad. **[3,11]**

Šikmý dopad

Při šikmém dopadu vlna dopadá na jiný materiál pod úhlem jiným než 0° . Kromě zákonu dopadu zde úhlové vztahy ovlivňuje ještě Snellův zákon. Ten popisuje závislost mezi rychlostmi a úhly sousedních prostředí:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

α_1, α_2 - úhly šíření vlnění vůči normále [$^\circ$]

c_1, c_2 - rychlost šíření ultrazvukových vln [m/s]

Pokud chceme určit, jestli lom bude probíhat směrem ke kolmici nebo od ní, je nutné spočítat index lomu prostředí jako poměr rychlostí $\frac{c_1}{c_2}$. Obecně můžeme říct, že v případě lomu od kolmice je poměr menší než 1 a při lomu ke kolmici je větší než 1. V praktické části této práce budeme pracovat s kolmým dopadem. **[12,13]**

Kolmý dopad

Při kolmém dopadu se opět část vlnění odrazí a část projde. Vyslaná vlna má určitý akustický tlak. Jeho hodnota se ale vlivem akustického vlnového odporu bude měnit u odražené, nebo u prošlé vlny. Akustický vlnový odpor Z můžeme spočítat jako:

$$Z = \rho * c \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

Z - akustický vlnový odpor [kg/m²s]

ρ - hustota [kg/m³]

c - rychlost vlnění [m/s]

Pokud známe Z můžeme spočítat faktor odrazu R jako:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} * 100 \text{ [%]}$$

R - faktor odrazu [%]

Z_1, Z_2 - akustický vlnový odpor dvou různých prostředí [kg/m²s]

Faktor odrazu nám určuje, kolik % se odrazí z původní vlny. Pokud hodnota faktoru odrazu vyjde záporná, znamená to, že odražená vlna má opačnou fázi než vlna, která dopadla. Procentuální vyjádření akustického tlaku, který přejde do druhého prostředí, vyjádříme přes faktor průchodu D :

$$D = \left(1 + \frac{R}{100}\right) * 100 \text{ [%]}$$

D - factor průchodu [%]

R - factor odrazu [%] **[3,5]**

2.1.3 Akustický tlak

Akustický tlak vzniká při šíření vlny materiálem. Při šíření dochází k rozkmitání bodů v krystalické mřížce. Jelikož vlna prostupuje materiálem postupně, vznikají oblasti s vyšším a nižším tlakem. Tlak tedy můžeme definovat jako:

$$P = v * Z$$

- P - akustický tlak [Pa]
v - akustická rychlost [m/s]
Z - akustický vlnový odpor [kg/m²s]

Z akustického tlaku můžeme určit výšku echa signálu, neboť je mu úměrný. Na základě výšky echa můžeme rozeznat indikace, které způsobí pokles echa, a také určit jejich velikost. Moderní přístroje jsou vybaveny atenuátorem, který vše převádí do decibelů, a také umožňuje nastavit výšku echa pro uživatelské potřeby. Rozdíl zesílení můžeme popsat vzorcem:

$$\Delta V = 20 * \log \frac{H_1}{H_2} [dB]$$

- ΔV - rozdíl zesílení [dB]
 H_1 - výchozí výška echa [%]
 H_2 - současná výška echa [%] **[3,9]**

Akustické ztráty

Při šíření vlny dochází k útlumu signálu při průchodu vazebním prostředím a zkoušeným materiálem. Takovýto jev nazýváme ztrátou akustického tlaku. Můžeme je rozdělit na:

Ztráty rozbíháním – vznikají při rozevírání ultrazvukového svazku. S rostoucí uraženou vzdáleností se rozpíná i plocha, ve které se svazek vyskytuje. Tento jev lze kompenzovat zvýšením zesílení.

Ztráty přechodové – vznikají při přechodu různých prostředí. Je zde důležité brát v potaz drsnost povrchu zkoušeného vzorku. Drsnost se v ultrazvukovém měření rozlišuje do tří kategorií. Velmi malá drsnost je ideální stav zaručující prostup svazku kolmo k materiálu. Druhou možností je nerovný povrch pravidelné struktury. Zde jsou velmi vysoké ztráty způsobené šikmým dopadem svazku na povrch. Jako vazebné prostředí je nutné použít látku s vyšší viskozitou. Nejhorším možným povrchem jsou pak nepravidelné struktury, typické především pro neopracované odlitky. Stejně jako v předchozím případě je nutné použít vazebné prostředky s vyšší viskozitou a většina svazku neprochází kolmo ale šikmo materiálem.

Ztráty útlumové – projevují se stejně jako ztráty rozbíháním, ale zeslabování je způsobeno rozptylem a absorbcí svazku v prozvučovaném materiálu. Rozptyl může být vyvolán kontaktem svazku s nehomogenitami v materiálu, hranicemi zrn ve struktuře, nebo různými vlastnostmi zrn. V digitálním výstupu tento jev zmenšuje výšku echa vlivem snížené intenzity a způsobuje nežádoucí šum, který může komplikovat nalezení vad. **[3,5,9]**

2.1.4 Akustická vazba

Pro šíření ultrazvukových vln je nutné zajistit spojení mezi sondou a zkoušeným materiálem. K tomu slouží vazebný prostředek, ten zajistí přenos mechanické energie z měniče do vzorku. Nejčastěji se jedná o vodu, olej nebo glycerin. Velký vliv na výsledné měření má i drsnost povrchu, ta je často předepsána normou, která určuje tloušťky vazebného prostředku.

Akustickou vazbu můžeme rozdělit na imerzní, kontaktní, suchou a bezkontaktní **[3]**

Imerzní vazba

V případě imerzní vazby slouží ke spojení voda. Tato vazba je nejpoužívanější především kvůli malým nákladům a poměrně nízké reaktivnosti s materiálem. Do vody je nutné přidávat další látky, aby se zabránilo nežádoucím jevům jako je koroze, hniloba, řasy nebo bakterie. Je také nutné dbát na očištění povrchu zkoušené součásti od bublin pravidelným stíráním. Použitá voda musí být zbavena všech svých plynných složek.

Podle způsobu umístění vzorku a způsobu zajištění vody můžeme rozdělit na:

Zkoušení s úplným ponorem součásti

Zkoušení s částečným ponorem součásti

Zkoušení s průchozí vaničkou – vhodné pro dlouhé součásti které se mohou posouvat

Zkoušení ostřikem – voda je přiváděna tryskou na povrch součásti

Zkoušení mezerové – mezi vodou a sondou se nachází vzduchová mezera, méně používané

Kontaktní vazba

Kontaktní vazba musí zajistit smáčení jak měniče sondy, tak zkoušeného materiálu a nesmí ovlivňovat ani jeden z prvků. Je třeba vybrat takový vazebný prostředek, který zaručí vhodnou smáčivost a viskozitu, snadnou odstranitelnost z povrchu, nízký útlum a nebude chemicky reagovat. Používají se nejčastěji oleje, glycerin nebo celulózové gely. Tyto látky se nanášejí v tenké vrstvě na povrch zkoušeného objektu.

Suchá vazba

Suchá vazba se používá pouze ve specifických případech a není tak běžná, jako dvě předchozí. Je nutné zajistit spojení mezi měničem a materiálem, ale vzhledem k absenci vazebného prostředí, je nutné vyvinout vysoký tlak nebo přilepit měnič přímo k součásti.

Bezkontaktní vazba

Poslední méně rozšířenou metodou je bezkontaktní vazba. Ta se používá pro vysoce specifické metody jako je EMAT neboli elektromagnetický akustický převod. Tato metoda generuje a přijímá akustické vlny v elektricky vodivých materiálech. Další bezkontaktní metodou je buzení ultrazvuku laserem. Tato metoda se používá zatím pouze ve vědeckém prostředí z důvodu vysoké finanční náročnosti. **[3,18,19]**

Praktická část je zaměřena na imerzní zkoušení s úplným ponorem vzorku.

2.2 Ultrazvukové sondy

Sonda je zásadním prvkem ultrazvukového systému. Právě zde se generují vlny přeměnou mechanické energie na akustické vlnění. Při ultrazvukovém měření se můžeme setkat s velkou variabilitou. Sonda se tedy vždy volí podle účelu zkoušení. Můžeme je rozdělit do tří hlavních kategorií: kontaktní sondy, imersní sondy a sondy pro speciální použití.

Kontaktní sondy jsou nejčastěji přímé, tedy dopadají na materiál pod úhlem 90° , nebo úhlové, které používáme pro šikmé prozvučování. Ty se řídí Snellovým zákonem. Imersní sondy můžeme rozdělit na přímé a fokusované. Přímé imersní sondy lze ovšem použít i na zkoušení pod úhlem, a to díky vazebnému prostředí vody. Fokusované sondy nám umožňují lokální zvýšení citlivosti a rozlišovací schopnosti. Princip fokusace je popsán v předchozí podkapitole. Speciální sondy jsou modifikované podle specifických požadavků zkoušení. Lze sem zařadit například sondy Phased Array, odvalovací nebo dvojitě sondy, kde je oddělen přijímač a vysílač. **[3,5,9]**

Měníč sondy

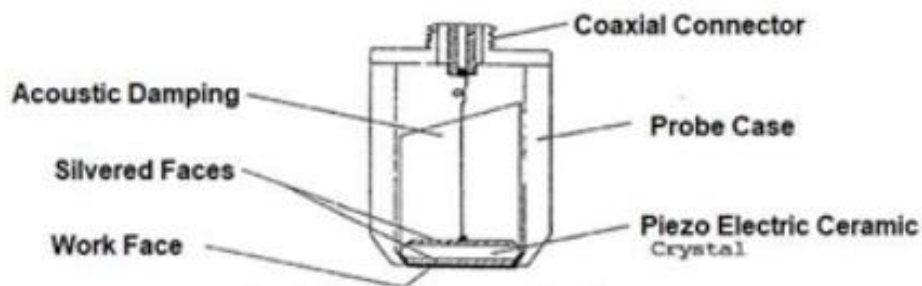
Ultrazvukové vlny jsou generovány za pomoci měničů. Ten převádí elektrickou energii na mechanickou a po přijetí signálu opět zpět. Sondy mohou mít jeden či více měničů. Je důležité zvolit i správně jeho materiál. Nejčastěji se využívají piezoelektrické, tedy z materiálů, který při elektrickém podnětu vygenerují napěťové vlny a naopak. Další možností jsou PVDF měniče, vytvořené z folie polyvinildenfloridu. Jsou velmi tenké a dosahují vysokých frekvencí. Mají nízký vlnový odpor, a díky tomu jsou vhodné pro imersní zkoušení, neboť akustický tlak se z velké části přeneso do vody. Další možností jsou kompozitní měniče, které kombinují materiály předchozích. Ve speciálních případech se můžeme setkat ještě s magnetostričními nebo elektrodynamickými měniči.

Většina sondy využívá podélné vlny. Některé specifikace však požadují zkoušení příčnými vlnami. Těch se nejčastěji dosahuje vlnovou transformací podélné vlny. Ta vznikne při šikmém dopadu na rozhraní, jak je popsáno v předchozí podkapitole. **[1,3]**

Parametry sond a jejich konstrukce

Mezi hlavní parametry sondy patří jmenovitá frekvence a šířka měniče. Často se také udává rozlišovací schopnost určující, na jaké vzdálenosti je sonda schopna rozlišit dvě samostatné indikace. Dosah, který určuje, do jaké hloubky je sonda efektivní pro určité velikosti indikací. Šířka pásma, která nám říká, v jakém frekvenčním pásmu sonda pracuje. Tento faktor je ovlivněn tlumením měniče. Větší utlumení způsobuje kratší impuls, tedy lepší rozlišovací schopnost, ale menší dosah. Naopak nižší utlumení poskytuje horší rozlišovací schopnost, ale zvětšení dosahu.

Zjednodušeně můžeme říct, že sonda se skládá z krytu pláště, ochranné vrstvy, měniče, tlumicího tělesa, elektrických obvodů a konektoru. Vzhledem k tomu, že zkoušení bude prováděno přímou imersní sondou, můžeme na ní demonstrovat zjednodušené schéma: [5,9,20]



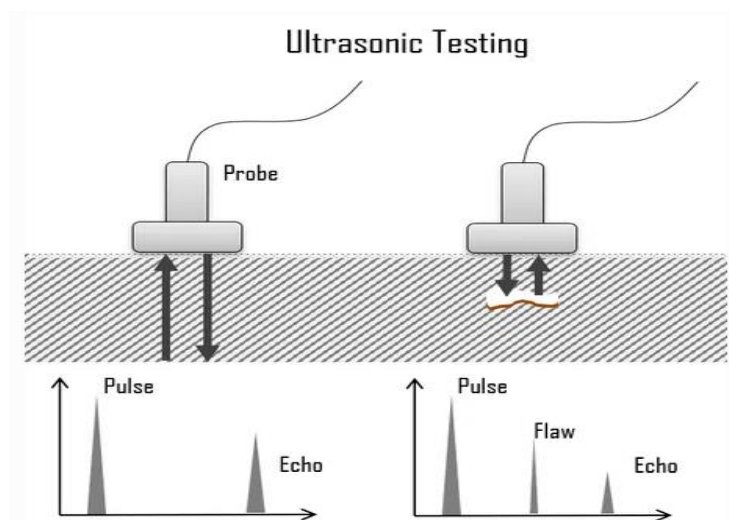
Obrázek 10: Části přímé imersní sondy [20]

2.3 Metody prozvučování

Před samotným zkoušením je nutné zvolit správnou metodu schopnou odhalit všechny indikace vad. Technika bude ovlivňovat i výběr sond. V následující části jsou popsány základní metody, které budou využity pro účely této práce a zmíněny významné speciální techniky.

Impulzně odrazová technika

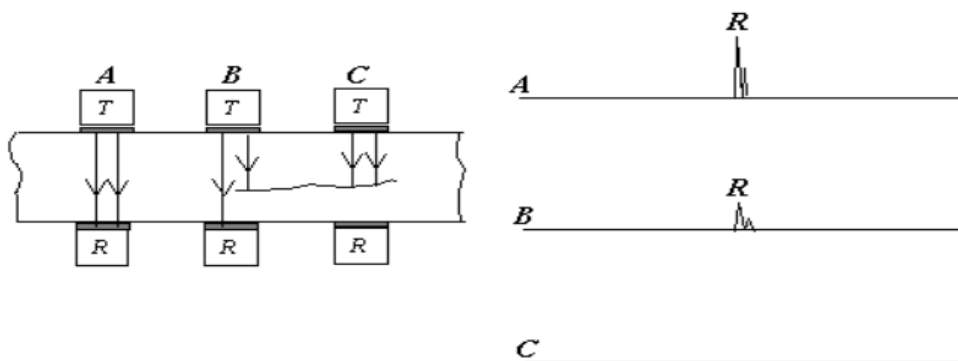
Impulzně odrazová technika PE (Pulse-echo) je základní metoda ultrazukového zkoušení diskontinuit v materiálu. Sonda zde slouží jako vysílač a přijímač zároveň. Krátké pulzy jsou rovnoměrně vysílány do testovaného objektu, kde narazí na hranici nebo vadu a část energie pulzu se odrazí zpět, kde je zachycena sondou, která je nyní v režimu příjmu. Hlavní výhodou této metody je, že ke zkoušení zde stačí pouze jedna strana zkoušeného objektu. Nevýhodou je pak dvojitý účel sondy, neboť ve chvíli vyslání signálu není schopna ihned vyhodnocovat odražená data. Vzniká tedy oblast mrtvé zóny, která se nachází přímo pod povrchem a není zde možné vyhodnocovat. S modernější konstrukcí sond se tato oblast postupně zmenšuje. Úplné odstranění tohoto problému nám pak poskytují duální nebo více násobné přijímače sondy. [9,21]



Obrázek 11: Pulzně odrazová technika [21]

Průchodová technika

Průchodová technika označovaná jako TTU (Through transmission technique) je technika, která se provádí za pomoci dvou sond, které jsou umístěny na opačných stranách vzorku. Jedna slouží jako vysílač a druhá jako přijímač. Je nutné, aby sondy byly naproti sobě. Při průchodu se vlivem střetu s vadou sníží energie, tedy poklesne i akustický tlak. Technika je vhodná především pro materiály s vysokým útlumem zvuku nebo velkou tloušťkou. Hlavní výhodou této metody je absence mrtvého pásma a hodnocení celé tloušťky materiálu. Naopak nevýhodou je samotná konstrukce, neboť ne vždy se dostaneme ke zkoušenému dílu z obou stran. S dvojicí sond přicházejí i vyšší náklady a problémy se správným zarovnáním sond vůči sobě a vůči vzorku. Již není možné provádět měření ručně jako v případě PE techniky, ale je nutné použít stroj, který nám bude udržovat vzájemnou pozici sond. [3,9,22]



Obrázek 12: Průchodová technika [22]

Speciální techniky

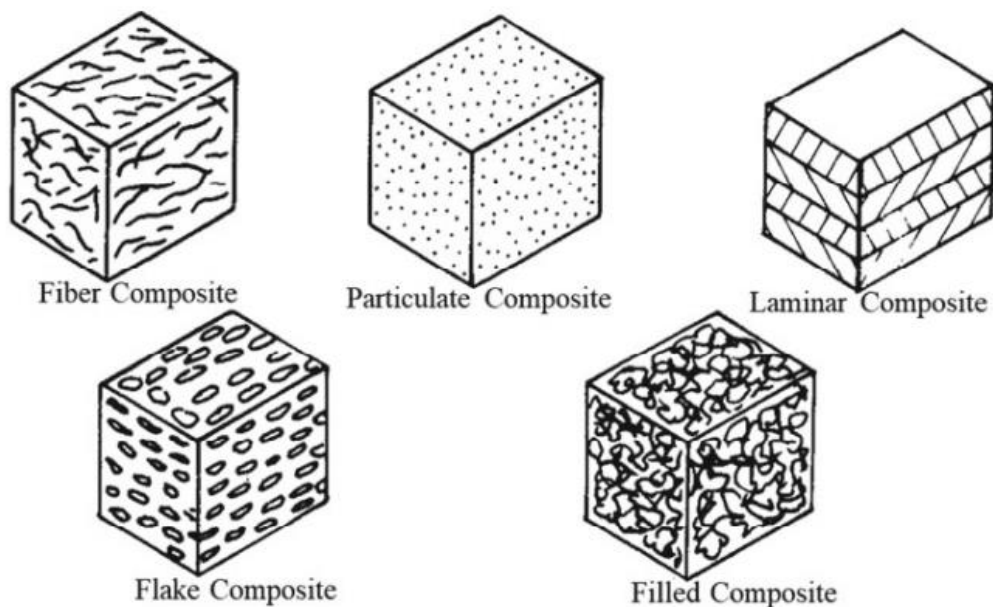
Kromě výše zmíněných dvou základních technik existují i další, které se používají spíše v speciálních situacích. Velice často nacházejí uplatnění v kontrole svarových spojů (TOFD, Tandemová technika), zkoušení speciálních materiálů nebo hledání specifických, těžko odhalitelných vad. Mezi jednu z nejdůležitějších metod patří Phased Array. Ta využívá sondy, mající v sobě několik na sobě nezávislých měničů. Ty jsou ovladatelné samostatně a je tedy možné svazek tvarovat a fokusovat do různých míst. To zajistí 100 % prozkoušení celé součásti. Na druhou stranu, takovéto sondy jsou dražší a správné nastavení jejich parametrů je složitější. Tato technika je v současné době na svém vzestupu. [3,23]

V experimentální části této práce se však budeme věnovat technice PE a TTU.

3 Kompozity

Kompozit můžeme definovat jako entitu složenou ze dvou, nebo více rozdílných složek, jejichž vlastnosti jsou odlišné a jsou spojeny na makromolekulární úrovni. Cílem je tedy spojit jejich vlastnosti a vytvořit nový, lepší materiál. Ve strojírenství se začaly používat od šedesátých let minulého století. To souviselo především s rozvojem kompozitů na bázi polymerů. V současné době jsou často upřednostňovány před klasickými kovovými materiály, a to především z důvodu pevného a zároveň lehkého charakteru.

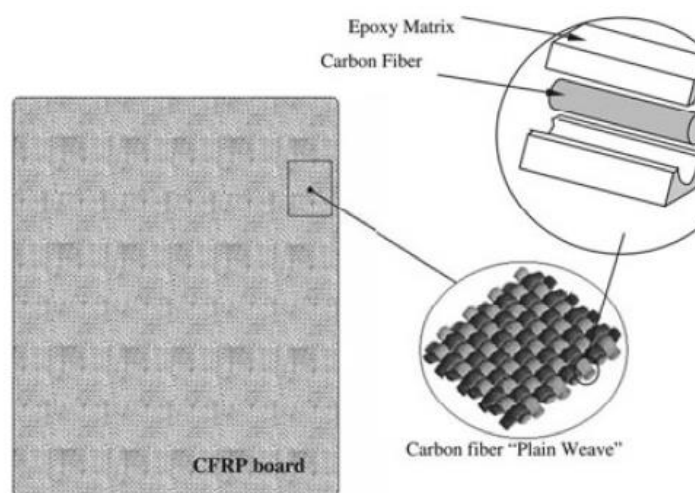
Jednotlivé složky mají, kromě rozdílných vlastností, také rozdílnou funkci. Jedna ze složek vždy plní úkol matrice, která materiály spojuje. Typicky se může jednat o různé polymery, kovy, keramiku, sklo či jiné materiály. Druhou fází je pak výstuž. Ta dodává materiálu potřebnou pevnost. Její tvar může být různý. Můžou to být například skleněná nebo uhlíková vlákna. Je snadné je rozeznat od slitin, neboť jejich části jsou snadno viditelné. Toto spojení tedy umožňuje získat nejrůznější vlastnosti. [24,25]



Obrázek 12: Schématické zobrazení různých druhů výstuží [26]

3.1 CFRP kompozity

Kompozitní materiály jsou v současné době na svém vzestupu a nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích. Jednou ze skupin kompozitů je CFRP (carbon fibre-reinforced plastic) neboli polymer vyztužený uhlíkovými vlákny. Vyznačuje se dlouhodobě stabilními vlastnostmi, vysokou pevností v kombinaci s relativně nízkou hmotností související s nízkou hustotou.



Obrázek 13: Struktura CFRP kompozitu [27]

Uhlíková vlákna disponují nízkou hustotou a zároveň vysokou pevností a tuhostí. Obsah uhlíku v samotných vláknech se pohybuje kolem 80-90 %. Jejich hustota je 2268 g/cm^3 a jsou schopny odolávat teplotám až do $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. Velkou výhodou je také nízký koeficient teplotní roztažnosti, což je velké plus v případech, kdy potřebujeme zaručit stabilitu rozměrů. Jejich únavová pevnost je vysoká a zároveň nejsou navlhavé.

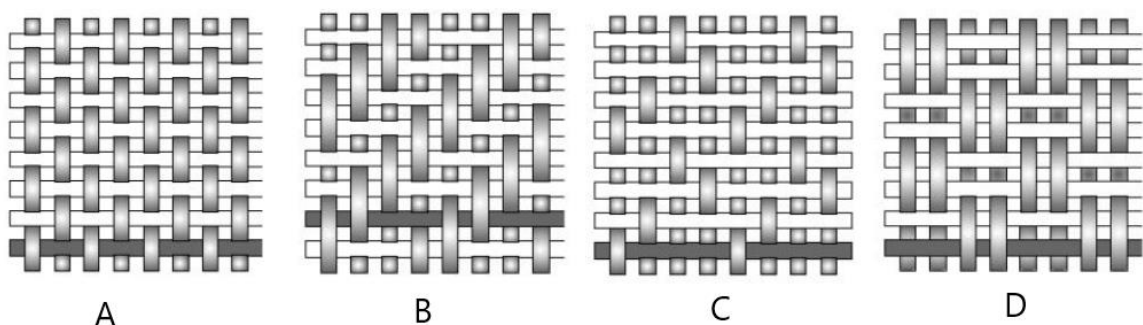
Ve spojení s polymerní matricí tedy dosahují vysokého poměru pevnosti a hmotnosti, jejich pevnost v tahu může dosahovat až 4500 MPa . Je zde vysoká tuhost, která zároveň dobře tlumí a teoreticky nulový koeficient teplotní roztažnosti. Jsou korozi vzdorné a jejich životnost je vysoká. Velkým přínosem je také prostupnost radarových signálů. Mezi jejich hlavní nevýhodu patří vysoké náklady na výrobu. Tyto vlastnosti je předurčují pro nejnáročnější aplikace jako letecký nebo kosmický průmysl. [28,29,30]

Výroba CFRP vláken

Jak již bylo řečeno, hlavní vyztužovací složka jsou uhlíková vlákna. Průřez tohoto vlákna je nejčastěji kruhový, ale vyrábí se i obdélníková nebo šestihranná vlákna. Můžeme je rozdělit do tří kategorií: GP (general purpose) pro méně náročné použití, HP (high performance) pro nejlepší možné vlastnosti a ACF (activated carbon fibers) aktivovaná vlákna. Vyrábí se buď z materiálů smolného typu (PITCH), nebo polyakrylonitrilu (PAN). PAN se vyznačuje vyšší pevností a modulem pružnosti, zatím co smolný typ je výrazně levnější. Vlákna se následně dodávají ve formě koudele, která obsahuje až 12 000 vláken.

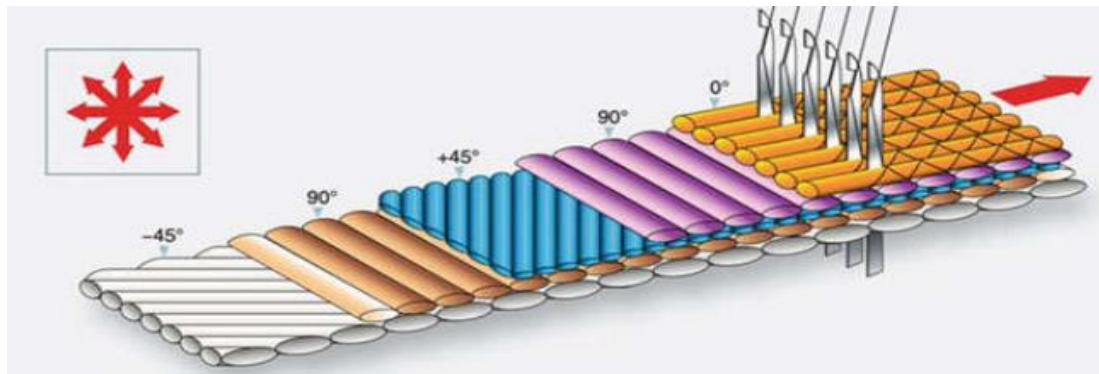
Při výrobě vláken z PAM je prvním krokem polymerace, následuje předení v mokřém stavu, stabilizace, karbonizace, grafitizace, ze které vzniká výsledné uhlíkové vlákno. Při výrobě z PITCH je nutné nejprve smolný materiál připravit zahřátím do tekutého stavu. Poté přichází spřádání taveniny, vakuová infuze pro zlepšení vlastností materiálu, karbonizace a v poslední kroku grafitizace. Výjimkou jsou aktivovaná vlákna ACF, která neprocházejí posledními dvěma kroky, ale aktivují se po stabilizaci nebo infuzi v závislosti na počátečním materiálu. [25,28]

Z vláken se následně připravuje tkanina. Ta může mít několik vzorů. Plátňová tkanina, je nejpevnější ale také nejméně poddajná. Jednotlivé uzle jsou od sebe rovnoměrně vzdálené. Keprová vazba, kde jsou překříženy vždy dva prameny. Výhoda tohoto vzoru je vyšší ohebnost. Atlasová vazba, kde jeden pramen je překryt čtyřmi a více prameny. Vzor zaručuje nízké zvlnění, vyšší pevnost a tuhost. Posledním vzorem je košíková vazba, zde se kříží vždy dvě vlákna. Je náchylná na zvlnění a vyznačuje se vyšší pevností než plátňová vazba. Ve specifických případech se můžou jednotlivé vzory kombinovat. Tkanina vzniklá jedním z těchto spojení se nazývá prepreg. [28,31]



Obrázek 14: A plátňová vazba, B Keprová vazba, C Atlasová vazba, D košíková vazba [31]

Jednotlivé vrstvy tkaniny jsou spojovány matricí, která může být jak termosetová nebo termoplastická pryskyřice. Samotné spojení je zaručeno lisováním nebo vstřikováním. Při výrobě je kritické správně zvolit orientaci vláken v jednotlivých vrstvách. Správná orientace, kromě mechanických vlastností v různých směrech, určuje také kvalitu povrchu dílu. Obvykle se používají pootočení 0° , $\pm 45^\circ$, 90° . Jednotlivé vrstvy s různou orientací jsou navzájem sešity. [28,30,32]

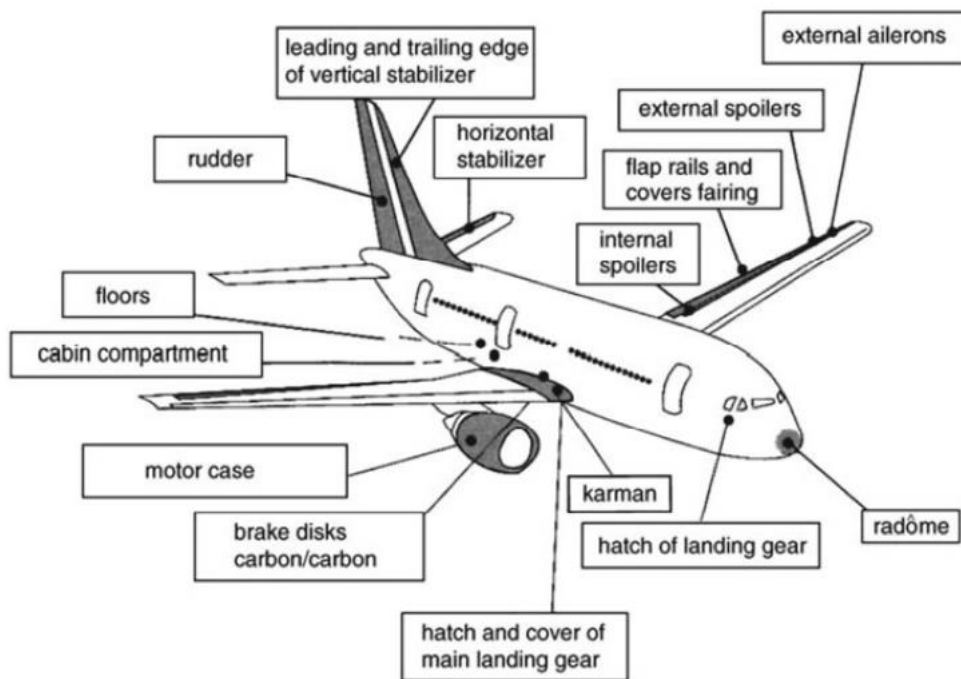


Obrázek 15: Spojení tkanin s různými úhly [33]

3.1.1 CFRP kompozity v leteckém průmyslu

Letecká a vesmírná výroba, to jsou oblasti, kde dochází k prudkému nárůstu využití kompozitů. Kromě CFRP kompozitů se používají také kompozity se sklem nebo kevlarom. S rostoucími nároky na emise je potřeba snížit spotřebu paliva, což nutí výrobce, aby snižovali hmotnost letadla. Kompozitní materiály, díky své nízké hmotnosti, dobrým mechanickým a fyzikálním vlastnostem, představují vhodnou alternativu. Snížení celkové hmotnosti letadla o 1 kg může vést k úspoře až 120 l paliva. CFRP tedy představují společně s titanem a hliníkovými slitinami, nejčastější letecké materiály. CFRP je možné použít i u částí, které jsou vystaveny vysokým teplotám, jako jsou trysky raket nebo brzdy letadel.

Airbus A320 je tvořen z 21,5 % kompozitem, což snižuje celkovou hmotnost o téměř 1100 kg. U Boeingu 787 a Airbusu A350 CFRP tvoří dokonce 50% hmotnosti. Často se používá na středovou skříň letadla, tlakové přepážky, ocasní a křídlové plochy. U Boeingu 787 je vyroben z kompozitů celý trup, a to z jednoho kusu, jehož konce jsou navzájem spojeny. Takovýto trup umožňuje úsporu až 50 000 spojovacích prvků. Kompozity nachází uplatnění nejen u dopravních letadel, ale i u vojenských. U vojenského letounu B-2 je celý povrch vyroben z kompozitu. Ten je zde speciálně upraven, aby zvyšoval radarový odraz a rozptyl tepla. [32,33,34]



Obrázek 16: Využití kompozitních částí u Airbusu A320 [34]



Obrázek 17: Využití kompozitního pláště u vojenského letadla B-2 [35]

4 Předpisy společnosti Airbus na UT testování

V této části se budeme zabývat normativními požadavky firmy Airbus na ultrazvukové testování.

Výchozí materiálem je předpis 80-T-31-2910. Definuje nám základní pojmy ohledně kompozitů se skleněnými (GFRP) a uhlíkovými (CFRP) vlákny, včetně požadavků na jejich výrobu. Je zde definováno čištění, skladování a označování výrobního materiálů, u kterého je kritické dodržovat doporučené předpisy, aby se zabránilo vzniku vad ve výrobní fázi.

Také se zde setkáme s obecnými požadavky na prostory, ve kterých probíhá zkoušení. Je nutné vždy zajistit bezpečnost a zdraví pracovníků. Jednotlivá pracoviště musí být vždy oddělena od sebe. Pokud toto není možné dodržet, je nutné zajistit, aby se přístroje navzájem neovlivňovaly. Je doporučeno zajistit přívod vzduchu přes ventilaci a nedovolit, aby materiály byly kontaminovány prostředím. Částice prachu ve vzduchu nesmí přesáhnout velikost 5 μm na m^3 . Prašnost musí být v prostorách kontrolována jednou měsíčně.

Norma definuje, jaké druhy vad má nalézt určitá ultrazvuková metoda. Metody PE a TTU, které budou použity v praktické části práce, jsou určeny pro hledání delaminací a porozity. Technika PE může být navíc použita na měření tloušťky a hloubky, ve které se indikace nachází. [36,37]

Požadavky na obsluhující personál

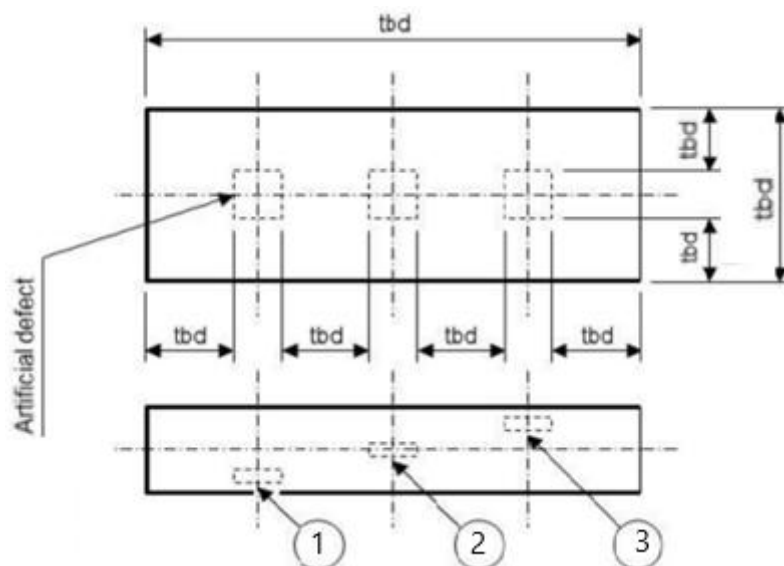
Norma AITM6-0011 se zabývá požadavky na obsluhující personál. Celý proces musí být zpracován pracovníkem s kvalifikací level 3, zatím co zaměstnanec kvalifikace level 2, může vyhodnocovat naměřená data a psát instrukce, návodky, pro pracovníka level 1. Ten může provádět pouze měření. Vyhodnotit tato data ale musí člověk s vyšší kvalifikací. [37]

4.1 Požadavky na výrobu kompozitních desek s umělými vadami

Tyto požadavky jsou definovány dokumentem AITM6-0012. Předpis se zabývá testováním vzorků s uměle vytvořenými vadami z vláknových kompozitů, které jsou určeny pro zkušební testování nových systémů. Před zahájením zkoušení je nutné ověřit vhodnost použité techniky, nastavení programu, funkčnosti sond a přesnost měření. Musíme přitom brát v úvahu tloušťku materiálu, geometrii vzorku, materiál, ze kterého je kus vyroben, a v neposlední řadě možnosti stroje.

Ploché vzorky

Předpisy určují tvary určené pro zkušební testování. Vzhledem k charakteru praktické části, zde budou popsány pouze požadavky na ploché desky. Umělé vady na plochém vzorku musí být umístěny minimálně 15 mm od sebe, aby bylo možné je bezpečně identifikovat, a také se musí nacházet minimálně 25 mm od kraje. Na desce musí být dostatečně velká oblast bez vad pro seřízení přístroje. Vady musí být umístěny do zkušebního vzorku mezi druhou a třetí vrstvu jak zespoda, tak ze shora, a pokud je vzorek vícevrstvý, i do prostředních částí dílu. [38]

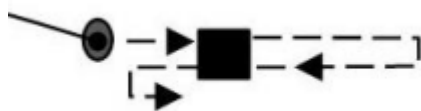


Obrázek 18: Airbus umístění vad na plochém zkušebním vzorku [38]

4.2 Požadavky na sondy a automatické systémy

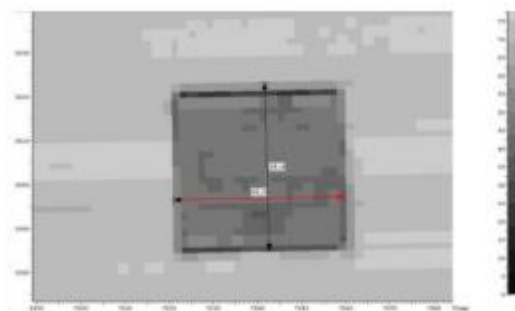
Kontrolu stavu systému měření je dle předpisu nutné provádět minimálně jednou za dva roky. Výjimkou jsou samotné sondy, které se musí kontrolovat alespoň jednou za tři měsíce. V případě nalezení nesrovnalostí se specifikacemi systému se proces kontroly musí zastavit. Samozřejmě každý problém musí být zapsán do protokolu s vysvětlením level 3 pracovníka. Je nutné si uvědomit, že pokud používáme techniku TTU a PE na jednom stroji, každá technika je samostatný systém a musí tedy být kontrolovány samostatně.

Při použití měření automatickými a poloautomatickými systémy je předepsané používat tento způsob trasy skenu:



Obrázek 19: Určený způsob směru automatického skenování [39]

Doporučuje se využívat maximální rychlost skenu, kterou systém umožňuje, při zachování stejné kvality výsledků. U naměřených umělých vad je nutné zaznamenávat frekvenci, rozlišení skenu, rychlost skenování, označení sondy a systému, C-scan. Velikost umělých vad je vyhodnocována z C-scanů změřením rozměru x a y:



Obrázek 20: Vyhodnocení velikosti vady z C-scanu [39]

Požadavky na vodní nádrž, ve které bude probíhat i naše měření, jsou následující: je nutné zajistit pohyb nejméně ve třech osách (X, Y, Z) a ve dvou úhlech na sebe kolmých. Hloubka vody musí být minimálně 250 mm. Doporučená teplota vody je 20 °C. Systém musí být zkalibrován v souladu s Airbus normami s platnými daty kalibrace. [39]

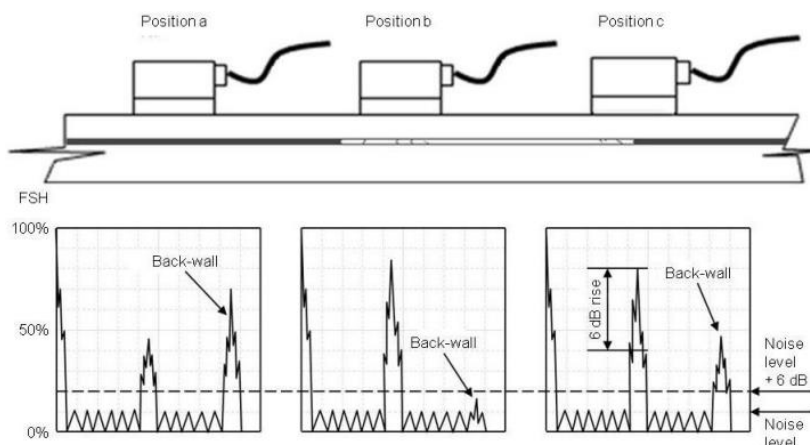
4.3 Požadavky na metodu PE

System zkoumající CFRP desky musí najít všechny vady, jejichž plocha odpovídá 36 mm², tedy rozměrům 6x6 mm. Tuto metodu je doporučeno použít tam, kde je přístup ke vzorku omezen z jedné strany, nebo na měření akustického útlumu. Je velmi citlivá na vykolmení vůči vzorku, které je zde kritické. Vykolmení spočívá v uvedení svazku, který vychází ze sondy, do kolmého stavu vůči zkoušené desce. Dle předpisu je nutné použít podélnou vlnu.

Frekvence sondy by se měla pohybovat od 1 do 20 MHz. Velikost obrazovky s A-scanem je minimálně 50x65 mm. Povrch zkoušené součásti musí být očištěn, bez mechanických a jiných poškození. Kalibraci je nutné před měřením vždy ověřit na referenčním vzorku. Zaznamenává se kromě velikosti také hloubka, ve které se vada nachází. Aby vada byla považována za detekovatelnou, musí její odstup od šumu být minimálně 6 dB, tedy 50 % její výšky.

Při použití DAC, tedy křivky, která kompenzuje útlum signálu vlivem tloušťky materiálu, je nutné vytvořit křivku alespoň ze 3 bodů pro desky tloušťky 10 mm a z 5 bodů pro tloušťky větší než 10 mm. Měření velikosti defektů probíhá metodou poklesu o 6db, tedy poklesem z maximální výšky na 1/2, kde začínáme měřit přes vrchol vady až do oblasti 1/2 výšky maximálního echa na druhé straně vady. Takto provedeme ve dvou směrech na sebe kolmých.

Vodní dráha se doporučuje nastavit tak, aby blízké pole N směřovalo 1 mm pod povrch sondy, tedy $V_d = N - 2$ mm. [37,40]

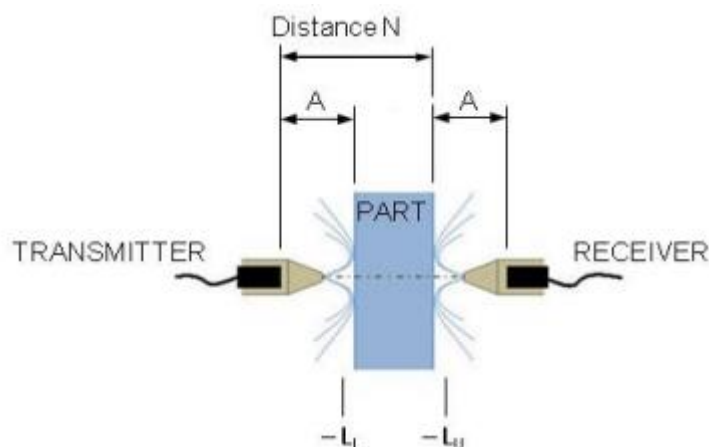


Obrázek 21: Zaznamenání vady metodou PE [40]

4.4 Požadavky na metodu TTU

Pravidlo pro nalezení indikací je stejné jako v předchozím případě. Systém musí najít všechny vady, jejichž plocha odpovídá 36 mm^2 , tedy rozměrům $6 \times 6 \text{ mm}$. Povolené variace této techniky je ponoření dílu do vodního tanku, použití ostřiku nebo kontaktní zkoušení. Měníč musí vysílat podélné vlny a doporučená frekvence pro lamináty je 2,25 až 10 MHz. Rozměr obrazovky, která zobrazuje A-scan, je minimálně $50 \times 65 \text{ mm}$.

Povrch dílu musí být čistý a bez cizích materiálů nebo jiných látek či jakkoliv mechanicky poškozen, aby nebyla ovlivněna kvalita inspekce. Doporučená vzdálenost sonda, kus, sonda pro imerzní zkoušení je, aby délka blízkého pole sondy N končila na druhé straně součásti.



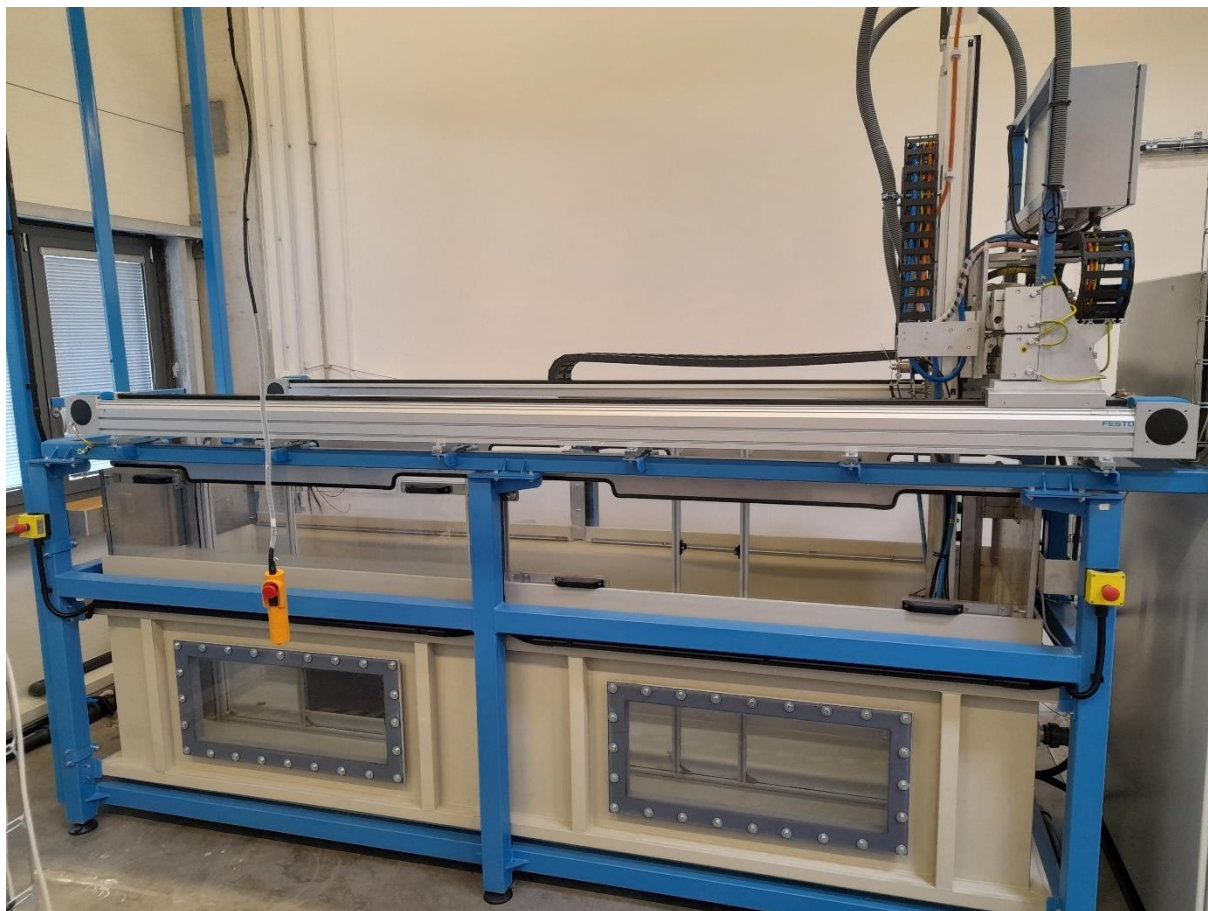
Obrázek 22: Nastavení vzdálenosti sonda-kus-sonda pro techniku TTU [41]

Velikost indikace má být měřena metodou poklesu o 6 dB. Ta spočívá v poklesu na $\frac{1}{2}$ původní výšky echa indikace, a to ve dvou směrech, které jsou navzájem na sebe kolmé. Uvedení menší velikosti než je skutečná, není přípustné. Aby vada mohla být považována za detekovatelnou, musí poklesnout průchodové echo minimálně o 4 dB. [37,41]

5 Analýza ultrazvukových imersních sond

V praktické části zpracovávám analýzu ultrazvukových imersních sond. Budou zkoušeny při technice odrazem (PE) a průchodem (TTU) v imersi. Zkoušeným předmětem jsou CFRP desky s uměle vytvořenými vadami pro účely experimentu. U vad známe jejich umístění, velikost i charakter. Jedná se o separační fólie z prepregu, což je jedna z nejčastějších vnitřních vad CFRP dílů.

Práce vznikla ve spolupráci s firmou ATG s.r.o., a souvisí s testováním prototypu ve vývoji. Jedná se o stroj **UZM 3000 CS**, který je vybaven ultrazvukovou kartou **PCMUX7108HA+**. Účelem tohoto zařízení je zvýšit produktivitu měření ultrazvukových zkoušení. Systém bude poskytovat zákazníkům automatickou kontrolu pro ploché díly velkých rozměrů, které jsou i v současné době velmi často kontrolovány ručně, což je neefektivní. Jako výchozí požadavky jsme vybrali předpisy firmy Airbus S.A.S, se kterou společnost ATG s.r.o. spolupracuje a do budoucna má zájem o tento typ zařízení.



Obrázek 22: UZM 3000 CS

5.1 Podmínky měření

V tomto kroku si definujeme podmínky zkoušení, které budou platné jak pro metodu TTU, tak PE. Pokud se v průběhu vyskytnou změny, budou uváděny samostatně u jednotlivých měření s odůvodněním a komentářem.

Teplota v laboratoři se pohybuje kolem 22 °C. Krátkodobé odchylky jsou přípustné, ale chtěli bychom se vyhnout dlouhodobější výrazné změně teploty okolí. Můžeme tedy stanovit přípustnou teplotu měření na 22 ± 5 °C. Doporučení Airbusu pro vodní nádrž, ve které probíhá měření je 20 °C. Jako přípustnou teplotu vodní nádrže učíme 20 ± 1 °C. Teplota je zde zajištěna tepelným regulátorem. Tyto hodnoty budou zkontrolovány vždy na začátku měření.

Kromě teploty je nutné zajistit také dostatečné množství vody v nádrži, aby vzorky byly zcela potopeny. V případě, že je nádrž vypuštěna, například z důvodu čištění, je nutné po jejím znovu napuštění počkat nejméně 24 hodin, aby došlo k co největšímu odvodu vzdušné vody. Vzduchové bubliny by mohly negativně ovlivnit výsledky.

5.1.1 Imersní ultrazvukové sondy

Pro měření jsou vybrány tři imersní sondy Technisonic, kterými disponuje firma ATG s.r.o. Sondy se liší svojí frekvencí, průměrem měniče a velikostí blízkého pole. Každá sonda je párová, aby bylo možné provádět techniku TTU, při které se budou dvě stejné sondy nacházet naproti sobě. Sondy jsou nefokusované.

Tabulka 2: Vybrané sondy a jejich parametry

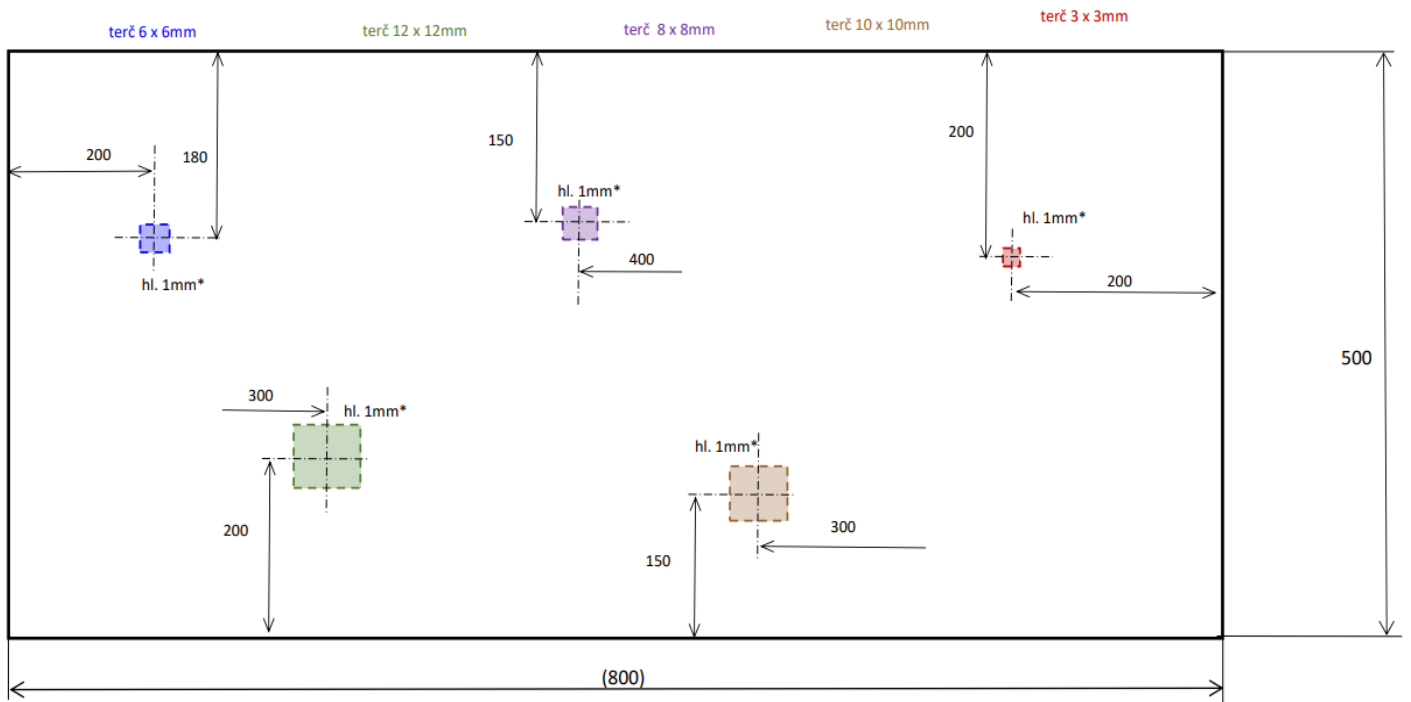
Označení sondy	Frekvence [MHz]	Ø měniče [mm]	Blízké pole N [mm]	Průměr svazku [mm]
ISL-0502-HR	5	6,3	34,1	1,2
ISL-1002-VHR	10	6,3	68,1	0,6
ISL-0304-CMP	3	12,7	95,4	0,9



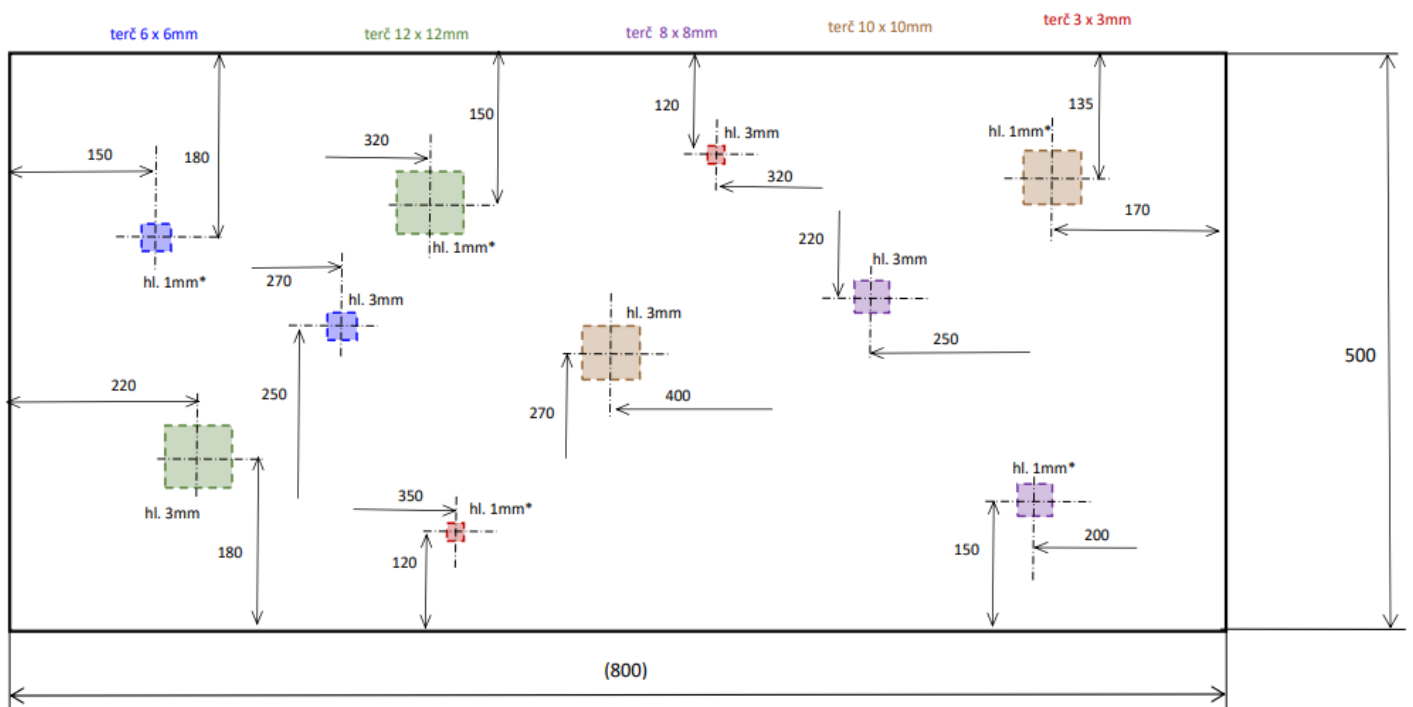
Obrázek 23: Sondy určené pro měření v rámci diplomové práce

5.1.2 CFRP vzorky s umělými vadami

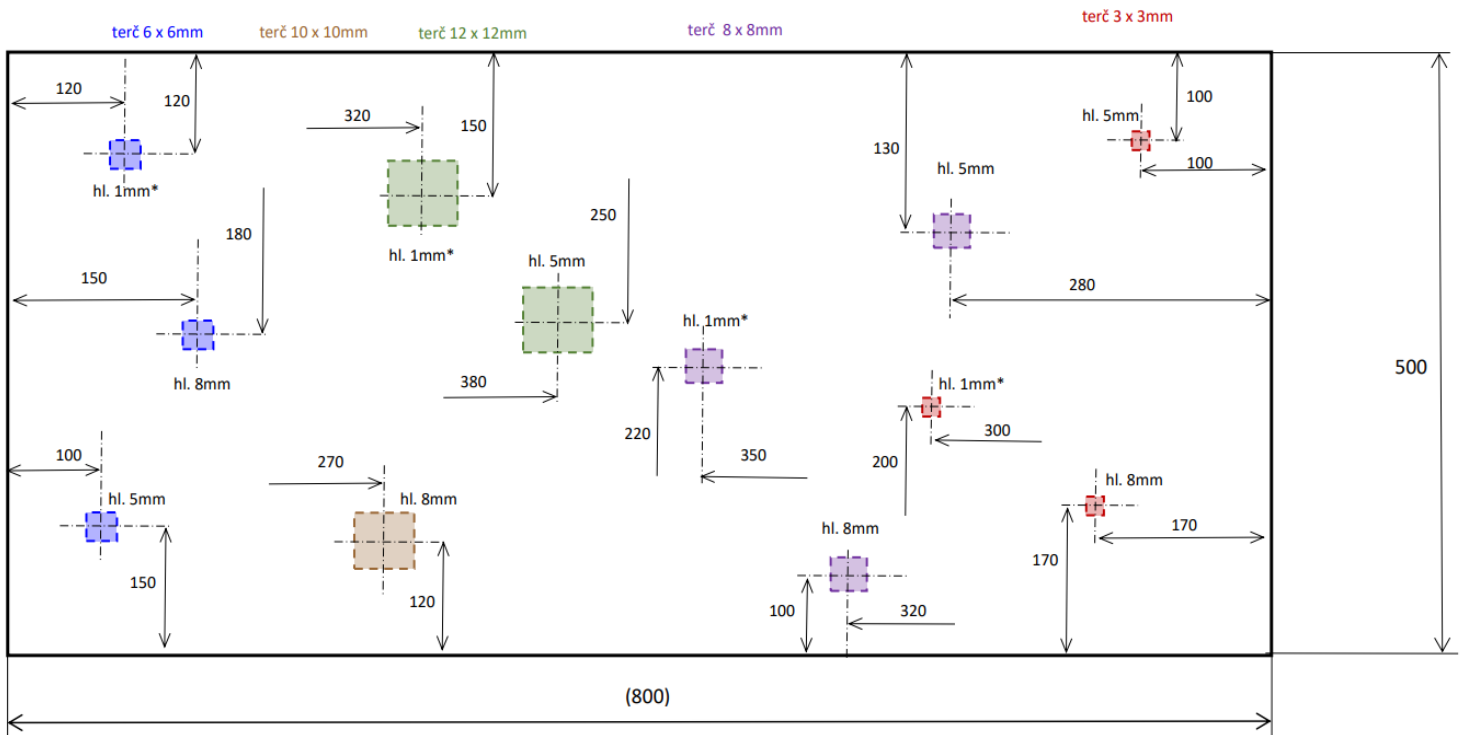
Pro určení optimální sondy je nutné zajistit, aby desky měly různou tloušťku, vady byly rozmístěny v odlišných jednotlivých vrstvách laminátu. To nám umožní zajistit, zda je sonda schopna zkontrolovat kus v celé jeho tloušťce. Desky byly zhotoveny v souladu s nařízením Airbusu pro takovýto druh ověřování, tedy byla dodržena vzdálenost od okrajů, vzdálenost vad od sebe a jejich velikost. Na CFRP vzorcích se nachází vady o velikostech 3x3 mm, 6x6 mm, 8x8 mm, 10x10 mm a 12x12 mm. Předpisy Airbusu však požadují nalezení vady o nejmenších rozměrech 6x6 mm. Vady 3x3 mm jsou tedy menší a budou proto brány jako doplňkové kritérium. Celkem jsou vyrobeny 4 desky o rozměrech $800 \times 500 \pm 2$ mm a tloušťce 2, 5, 10 mm. Terče s umělými vadami jsou umístěny s přesností ± 2 mm na ploše a v hloubce s přesností $\pm 0,3$ mm. Jejich rozměry pak mají toleranci $\pm 0,1$ mm.



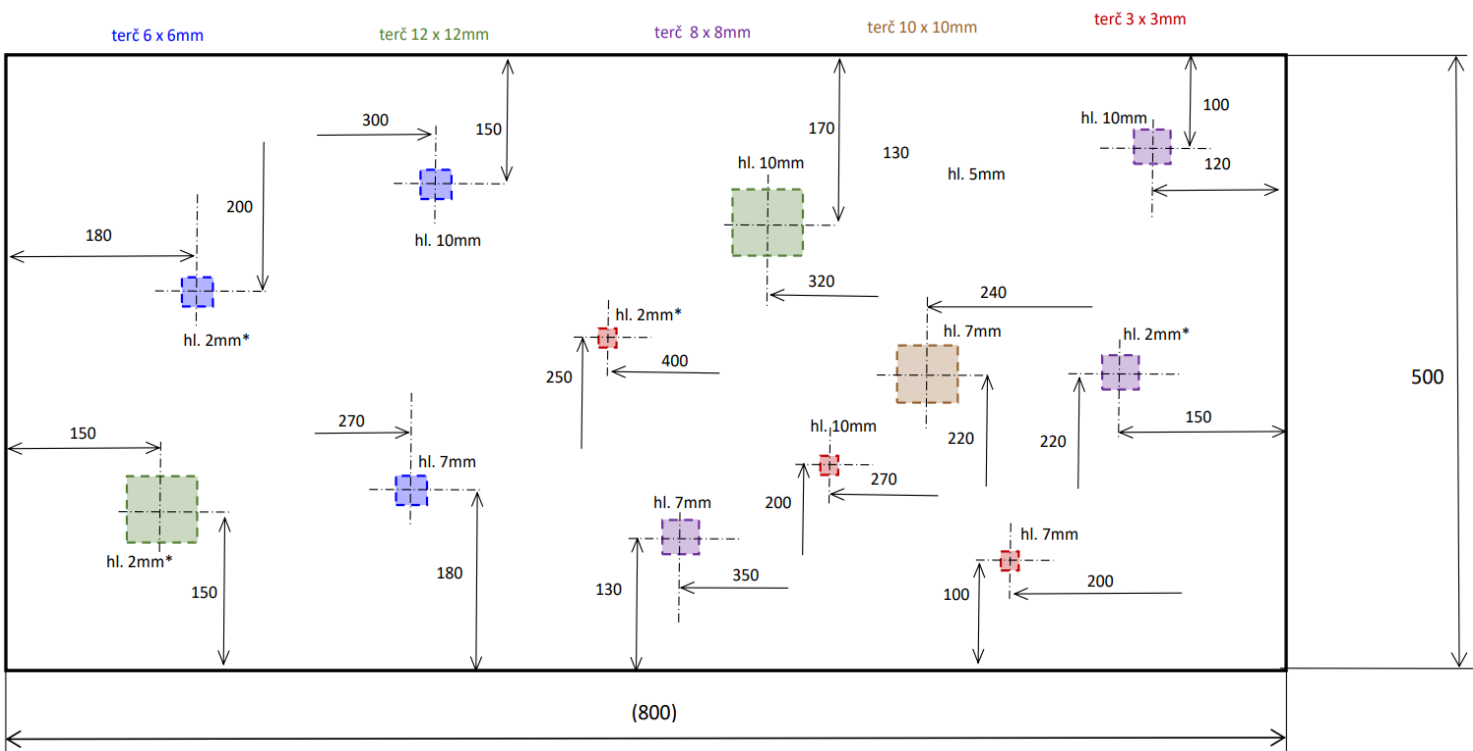
Obrázek 24: Vzorek CFRP, tloušťka 2 mm



Obrázek 25: Vzorek CFRP, tloušťka 5 mm

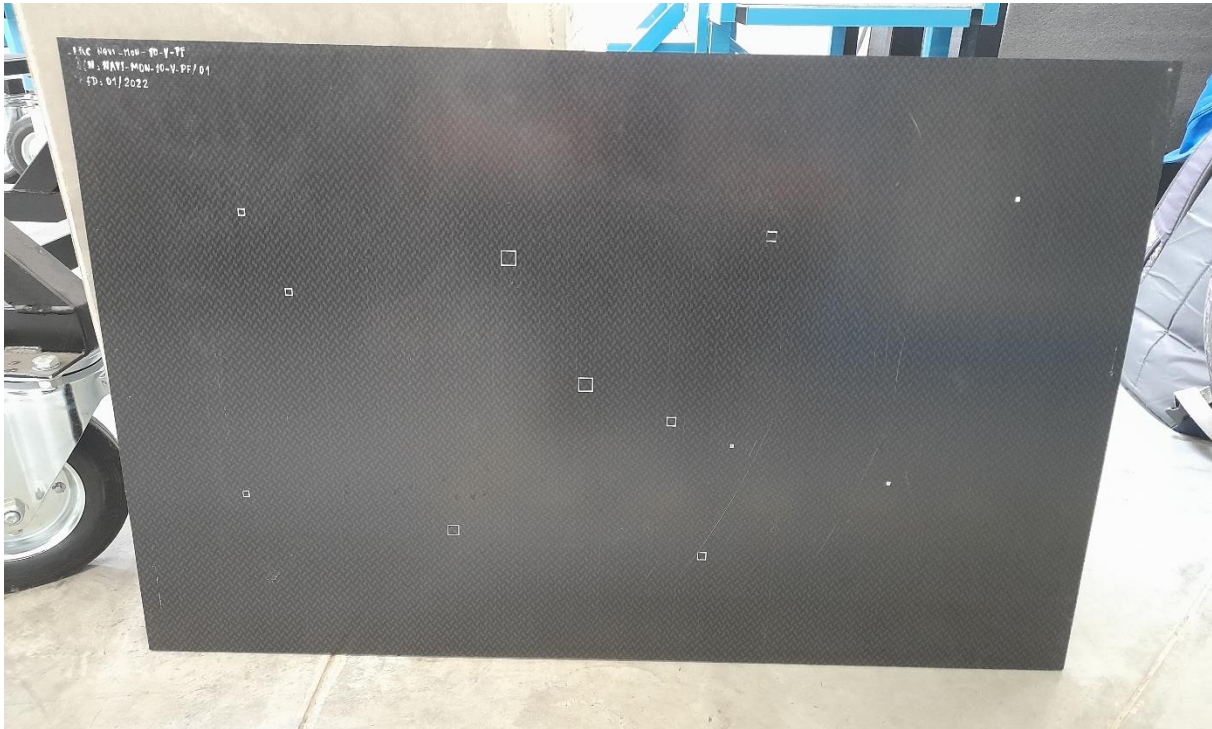


Obrázek 26: Vzorek CFRP, tloušťka 10 mm



Obrázek 27: Vzorek CFRP, tloušťka 15 mm

Desky budou měřeny z obou stran, čímž dosáhneme výsledků ve všech tloušťkách. Například při měření desky tloušťky 10 mm, bude vada umístěna v hloubce 1 mm a při otočení desky v hloubce 9 mm. Tím dostaneme kompletní obraz. Výjimkou je deska tloušťky 2 mm, kde jsou pouze 2 vrstvy, tedy vada pouze v hloubce 1 mm. Pokud nenastanou komplikace při zkoušení, bude deska měřena jen z jedné strany.



Obrázek 28: Deska tloušťky 10 mm s vyznačenými vadami

5.1.3 Parametry automatického skenování

Dráha automatického skenování je pevně daná dle předpisů Airbusu. Nastavitelná je pouze rychlost skenování v ose x a krok vzhůru v ose y. Vzhledem k velikostem desky je vhodné mít rychlost skenování co možná největší, neboť software nemá problém se zaznamenáním velkého množství dat v rychlém časovém úseku. Omezující tedy bude krok v ose y. Čím menší bude, tím bude sken přesnější ale zároveň poroste doba měření. Volím tedy krok skenování 2 mm, což umožní kontrolu jedné desky zhruba za 15 minut. Vzhledem k tomu, že z výsledného C-scanu nebudeme vyhodnocovat velikost vad, je tento krok dostačující. Rychlost posunu v ose x bude 300 mm/s.

5.2 Metody vyhodnocení dat výsledků

Pro měření je nutné stanovit kritéria, podle kterých budeme sondy hodnotit. Jak metoda PE, tak metoda TTU budou mít svá vlastní kritéria hodnocení, která odpovídají jejich podstatě.

5.2.1 Metody vyhodnocení výsledků PE

Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE

Schopnost nalezení a zobrazení všech vad při automatické skenování. U techniky odrazu se budou hodnotit výsledky z vadové a koncové brány. Cílem je nalézt všechny vady v co možná nejlepší kvalitě.

Určení velikosti rozměrů vady PE

Postup měření velikosti vady budeme provádět při technice odrazu tak, že najdeme její maximální signál, který bude usměrněný na hodnotu 80 % obrazovky. Poté, ve dvou na sebe kolmých rovinách, poklesneme o 6 dB na 1/2 výšky echa. Tím dostaneme hodnotu velikosti indikace v ose x a y. Jako přípustnou odchylku od skutečné velikosti budeme brát ± 1 mm. Určování velikosti nebudeme provádět u metody TTU, neboť by primárně měla sloužit jako rychlá kontrolní metoda. Neumožňuje určení hloubky, ve které se vada nachází a může dojít k nepřesnému měření vzhledem k tomu, že při poklesu průchodového echa na 0 % obrazovky, nejsme schopni najít maximální pokles.

Odstup signálu od šumu PE

Indikace lze považovat za rozlišitelnou, pokud její odstup od šumu dosahuje minimálně 6 dB, což v našem případě odpovídá 40 % obrazovky. Tedy pokud nastavujeme velikost vady na hodnotu 80 % obrazovky, pak 40 % výšky šumu je kritická hodnota, kterou nesmí šum dle předpisů Airbusu přesáhnout.

Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm pod povrchem PE

Při zkoušení se může stát, že indikace, které leží v hloubce 1 mm, budou splývat se vstupním nebo koncovým echem. To by se mohlo projevit v chybném určení rozměrů vady, nebo tím, že by vadový vrchol nebyl zaznamenán bránou při automatickém skenování. Tento parametr bude hodnocen na základě A-scanů umístěných v příloze. Při vyhodnocování bude použita stupnice výborný pro vady s bezproblémovou rozlišitelností, dobrý pro vady, kde by splývání mohlo ovlivnit například správné určení velikosti, a špatný pro vady, které mohou být přehlédnuty vlivem splývání.

5.2.2 Metody vyhodnocení výsledků TTU

Automatická detekce umělých vad ve vzorku TTU

Při hodnocení automatické detekce vad metodou průchodu budeme zkoumat výsledky z průchodové brány. Cílem je zachytit všechny umělé vady, které se ve vzorku nacházejí. Toto kritérium úzce souvisí se stabilitou průchodového echa, na což bude brán zřetel u závěrečné volby.

Rozlišitelnost indikací TTU

Přípustné rozlišení u techniky průchodu je, pokud v oblasti indikace dojde k poklesu minimálně o 4 dB. To odpovídá hodnotě 28,571 %. Pro snadnější určování zaokrouhlíme tuto hodnotu na 30 % obrazovky. Pokud nebude uvedeno jinak, průchodové echo bude nastavováno na hodnotu 80 % obrazovky. To znamená, že pro úspěšnou detekci musí signál poklesnout pod 50 % obrazovky.

Stabilita průchodového echa TTU

Pro metodu TTU je stabilita průchodového echa kritickým faktorem. Méně stabilní echo sice může zachytit více vad, ale na úkor jejich rozpoznatelnosti v celkovém obrazu C- scanu. Cílem je tedy najít co možná nejstabilnější echo, které bude schopno najít všechny vady, ve vzorku dané tloušťky. Tento parametr bychom mohli hodnotit i u metody PE na koncovém echu. Není zde však natolik podstatný, neboť se projeví i v jiných kritériích.

6 Metoda odrazová PE

První metodou, pro kterou budeme hledat optimální sondy, je metoda odrazová PE. Jak již bylo řečeno v teoretické části, spočívá ve vyslání signálu ze sondy, tento signál projde skrz zkoušený objekt a část signálu se odrazí zpět. V případě, že se ve zkoušeném vzorku nachází vada, mezera, delaminace, cizí materiál, bude mít jinou hustotu a jinou rychlost šíření zvuku. Odražený signál se navrátí do vysílací sondy, která ho zachytí a převede, v našem případě do grafu, který nazýváme A-scan. Jde o kontinuální proces, kdy vlny jsou neustále vysílány a nejde o jednorázovou záležitost. To nám umožní okamžitou reakci na změnu přijímaného signálu. Výhodou této metody oproti metodě průchodové je snadné určení hloubky, ve které se vada nachází, a možnost rychlé kontroly tloušťky zkoušeného vzorku. Naopak nevýhodou může být složitější nastavení křivky DAC. To se musí v praxi dělat na referenčním vzorku s podobnými vadami, jaké můžeme očekávat ve zkoušeném materiálu. V našem případě, vzhledem k tomu, že známe pozici umělých vad, můžeme nastavit křivku DAC přímo na desce.

Plán měření PE

Plán měření nám určuje, jaké sondy budou použity, na jakou tloušťku desky. Při výběru jsem vycházel z doporučení výrobce a předchozích zkušeností společnosti ATG s.r.o.

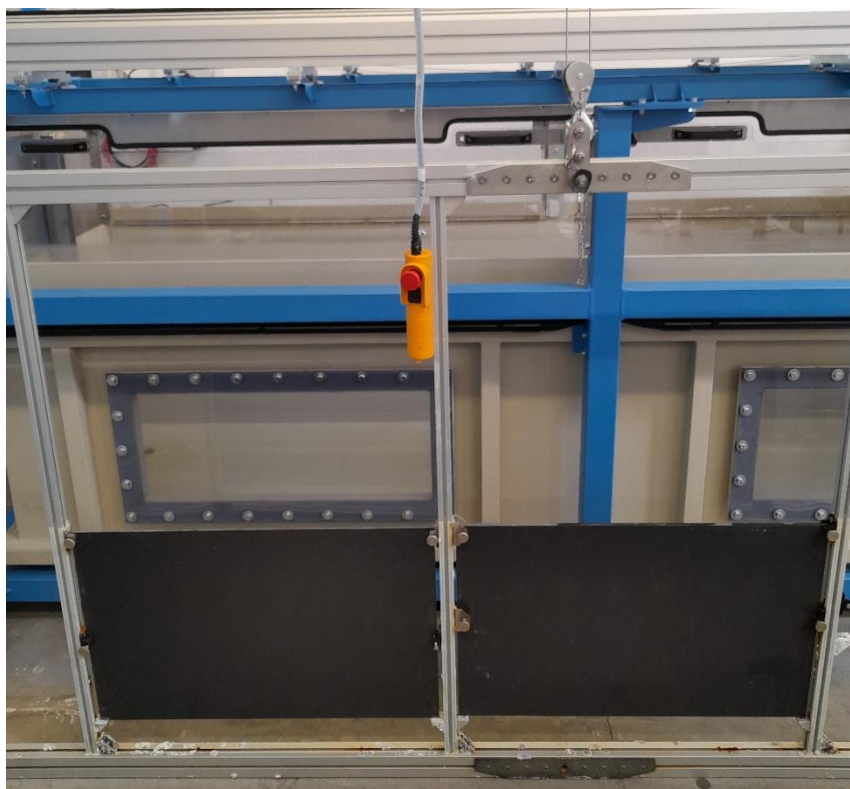
Tabulka 3: Plán měření PE

Tloušťka desky	Použité sondy		
2 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	x
5 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	x
10 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP

6.1 Postup měření PE

1. Upnutí desky do rámu
2. Nastavení oblasti měření v softwaru
3. Najetí sondou do středu desky, kde se nachází místo bez vady
4. Nastavení vodní dráhy, vykolmení sondy v ose x a y vůči desce
5. Nastavení křivky DAC na vadách o velikosti 6x6 mm, tak aby vady odpovídaly 80 % obrazovky
6. Spuštění automatického skenování
7. Ruční nájezd do oblasti vad, jejich změření

V prvním kroku upneme příslušnou desku do konstrukce rámu a spustíme ji do vodní nádrže. Je nutné nastavit v softwaru oblast, ve které chceme, aby probíhalo měření. V případě sond, které mají krátkou vodní dráhu, je nutné, aby se tato oblast vyhnula místům konstrukce rámu a upnutí desek, čímž zabráníme kolizi. Zároveň musí oblast obsáhnout všechny vady.

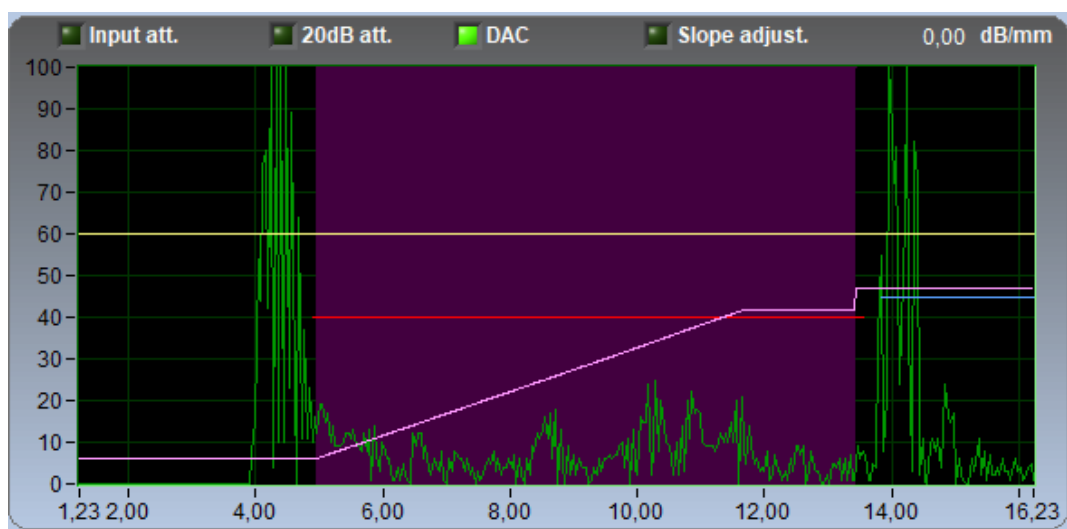


Obrázek 29: Zasazení desek do rámu

Následuje najetí do středu desky, kterou budeme brát jako výchozí bod, protože konstrukce rámu nemusí být ve všech případech rovnoběžná s pohybem stroje. Vodní dráha se tedy v rámci mm může při přejezdu z jednoho okraje desky na druhý mírně lišit. Dalším krokem je nastavení vodní dráhy v souladu s Airbus doporučením, tedy aby délka blízkého pole mířila 1 mm pod povrch vzorku.

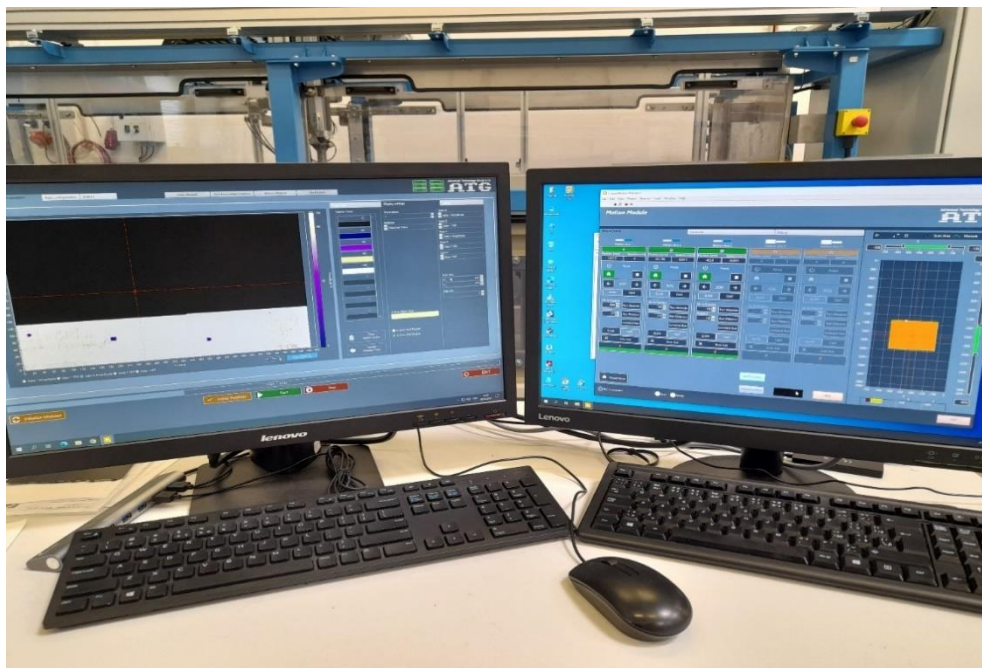
Velmi důležitým krokem je také vykolmení, z důvodu maximalizace signálu. Pokud svazek vychází ze sondy, je nutné zajistit, aby jeho hlavní proud dopadal na povrch desky pod úhlem 90°. Pokud se použije jiný úhel než 90°, můžeme získat zkreslená data, například velikost vad, a také se může změnit charakter vlny, jak bylo popsáno v teoretické části. To je při tomto měření nežádoucí. Vykolmení tedy spočívá v rotaci sondy ve dvou na sebe kolmých osách. Místo kolmosti poznáme tak, že dojde k maximálnímu nárůstu amplitudy.

Vzhledem k tomu, že při průchodu materiálem dochází k útlumu signálu, je nutné kompenzovat pokles softwarově, a to za pomoci křivky DAC. Ta se bude nastavovat vždy na vadách 6x6 mm vzhledem k tomu, že je to nejmenší velikost, jakou požadují předpisy Airbus. Vady budou nastavovány na 80% obrazovky. Výjimkou bude deska 2 mm, kde se křivka nebude nastavovat, neboť je zde pouze jedna vada a postačí nám optimalizovat celkové zesílení tak, aby vada opět dosáhla 80 %.



Obrázek 30: Křivka DAC na desce 10 mm

Poté následuje nastavení parametrů automatického skenování, jako je rychlost a krok vzhůru a následné spuštění. Z naměřeného skenu zjistíme souřadnice vad v systému, ručně na ně najedeme a změříme jejich velikost v ose x a y za pomoci metody poklesu o 6 dB. Samozřejmě pro účely porovnávání a měření je nutné všechny vady usměrnit na 80 % obrazovky.



Obrázek 31: Probíhající automatické skenování

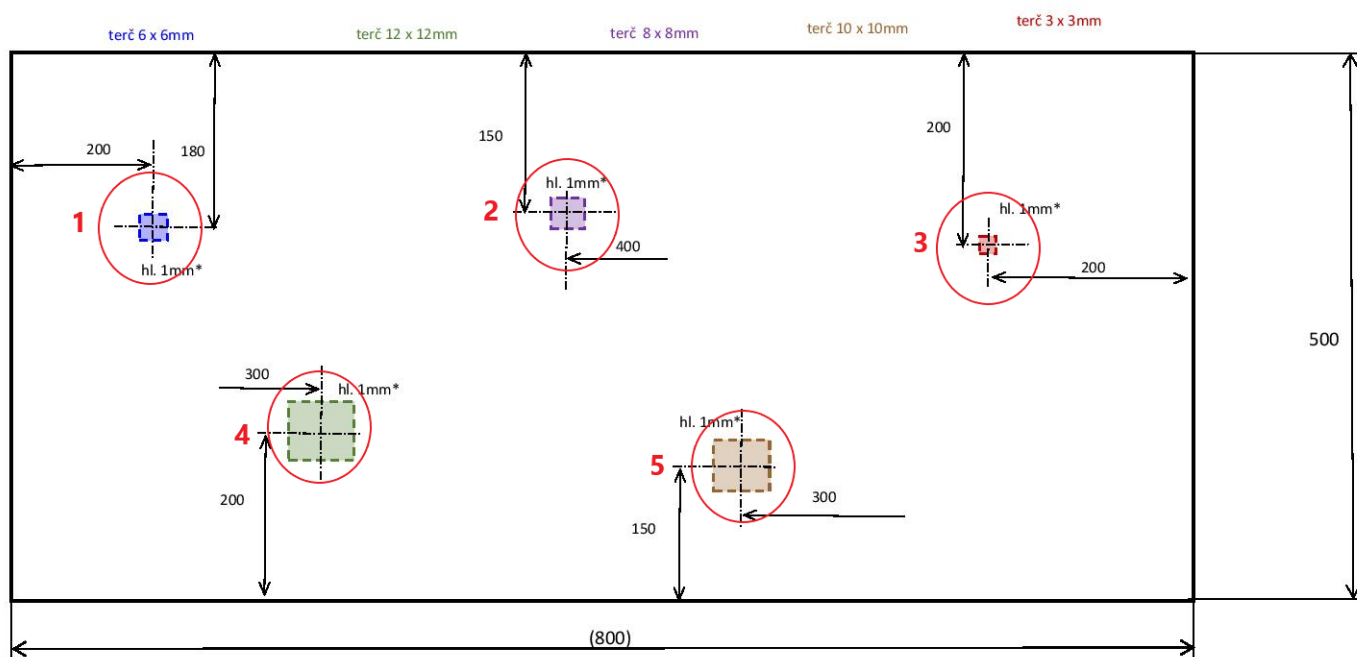
6.2 Deska tloušťky 2 mm PE

Dle plánu měření, bude deska 2 mm zkoušena dvěma sondami ISL-0502-HR a následně ISL-102-VHR. Po prvotním zasazení desky do rámu se ukázalo, že vzhledem k její nízké tloušťce se deska ve vodě rozkmitává při použití zvolené rychlosti skenování 300 mm/s. Bylo tedy nutné snížit rychlost pohybu na 100 mm/s.

Tabulka 4: Parametry automatického skenování PE, T 2 mm

Rychlost skenování	100 mm/s
Krok v ose y	2 mm

Pro přehlednost bude dobré si označit jednotlivé vady na výkresu čísly pro snadnější označování.



Obrázek 32: Deska T 2 mm, očíslování vad

T 2 mm ISL-0502-HR

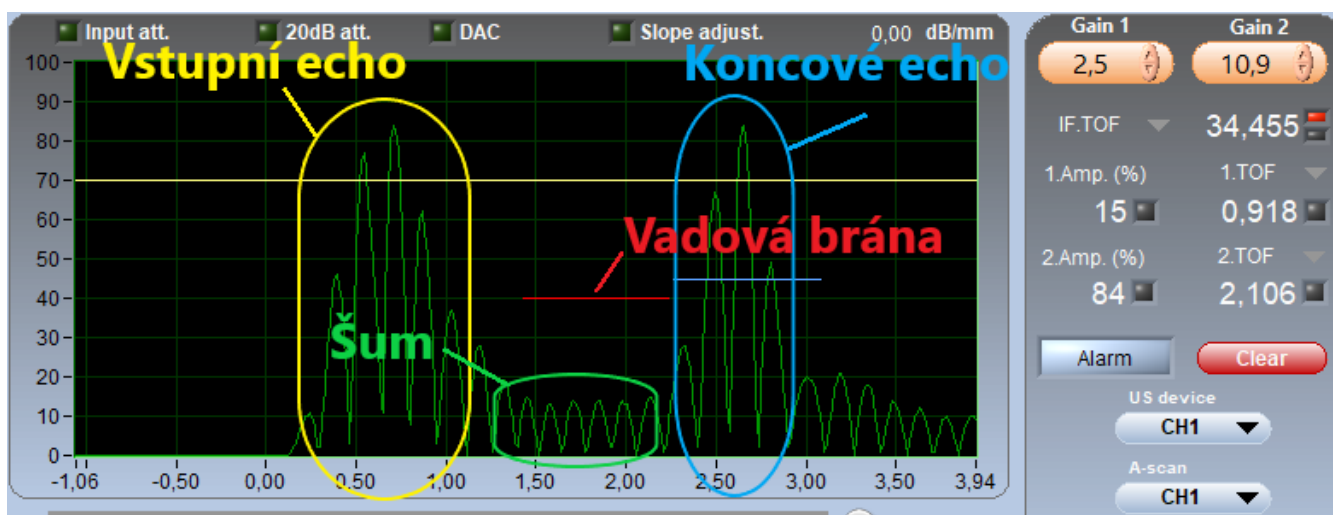
Parametry zkoušení

Místo bez vady

Tabulka 5: T 2 mm, ISL-0502, místo bez vady, parametry

Frekvence zesílení	2,5 Hz
Frekvence koncového echa	10,9 Hz
Šum v oblasti bez vady	15 %
Vodní dráha	34,45 mm
Napětí	125 V

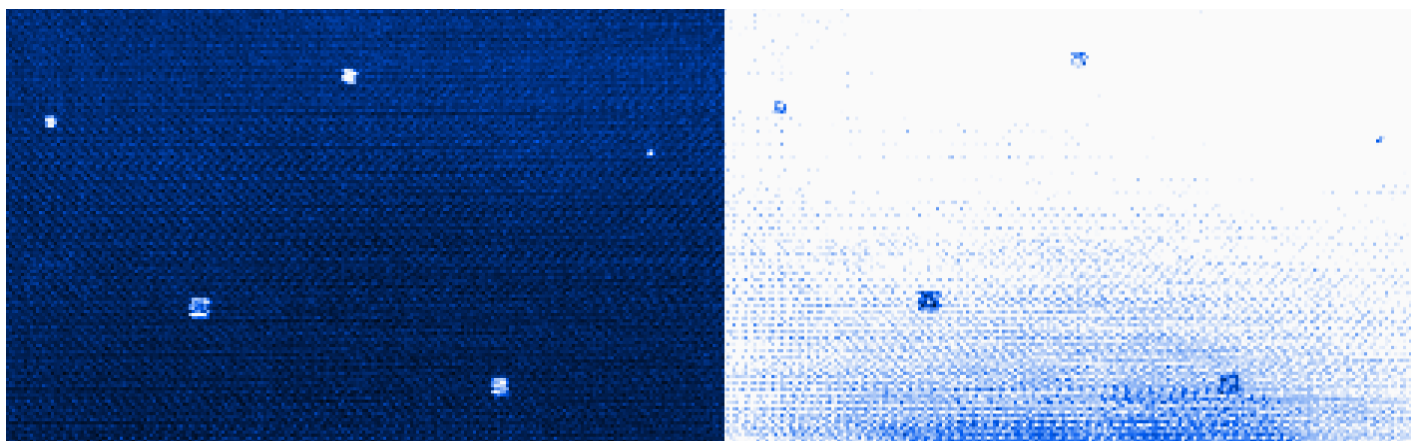
Místo bez vady je referenční bod uprostřed desky, na němž se provádí vykolmení a nastavení vodní dráhy. Je nutné volit takovou frekvenci, aby vada 6x6 mm dosahovala 80 % obrazovky. Šum nám definuje míru nepřesnosti, ve které se může ztratit potenciální vada. Vodní dráhu jsem nastavil dle doporučení z předpisů Airbusu, tedy aby blízké pole N mířilo 1 mm pod povrch dílu. Napětí, které jde do sondy, ovlivňuje výšku jednotlivých ech. Čím více voltů, tím větší budou amplitudy. V nastavení programu můžeme zvolit pouze 125 V nebo 250 V. Napětí 250 V bude používáno pro desku 10, kde bude větší útlum v materiálu. Pokud nebude uvedeno jinak, u ostatních postačí 125 V.



Obrázek 33: T 2 mm, ISL-0502, místo bez vady, popis

Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE

Automatické skenování probíhá s parametry pro desku 2 mm a konfigurací z místa bez vady a místa s vadou 6x6 mm. Výsledkem jsou dva C-scany, z nichž jeden je z vadové brány a druhý z koncového echa. Systém zaznamenává poklesy a nárůsty na těchto signálových branách.



Obrázek 34: T 2 mm, ISL-0502, sken, vadová brána, koncová brána

Jak je vidět z výsledků, sken našel všechny vady na obou branách.

Určení velikosti + Odstup signál šum + Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm

Po automatickém skenu přichází manuální najetí do oblasti vady. Vadu po nalezení usměrníme tak, aby dosahovala 80 % obrazovky, a mohli jsme určit její velikost a úroveň šumu.

Tabulka 6: T 2 mm, PE, ISL-0502, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	6,35	6,48	ANO	20 %	Výborná
2	8x8	8,56	8,38		20 %	
3	3x3	3,78	3,5		21 %	
4	12x12	12,01	12,54		18 %	
5	10x10	10,52	10,88		8 %	

Výsledky ukazují, že rozměry vad odpovídají jejich skutečné velikosti. V tomto případě nenastala žádná odchylka. Co se týče velikosti šumu, tak neohrožuje detekovatelnost vad, nicméně dosahuje až 21 %, což je způsobeno tenčí deskou, tedy vadové echo je blízko koncovému a vstupnímu echu.

T 2 mm ISL-1002-VHR

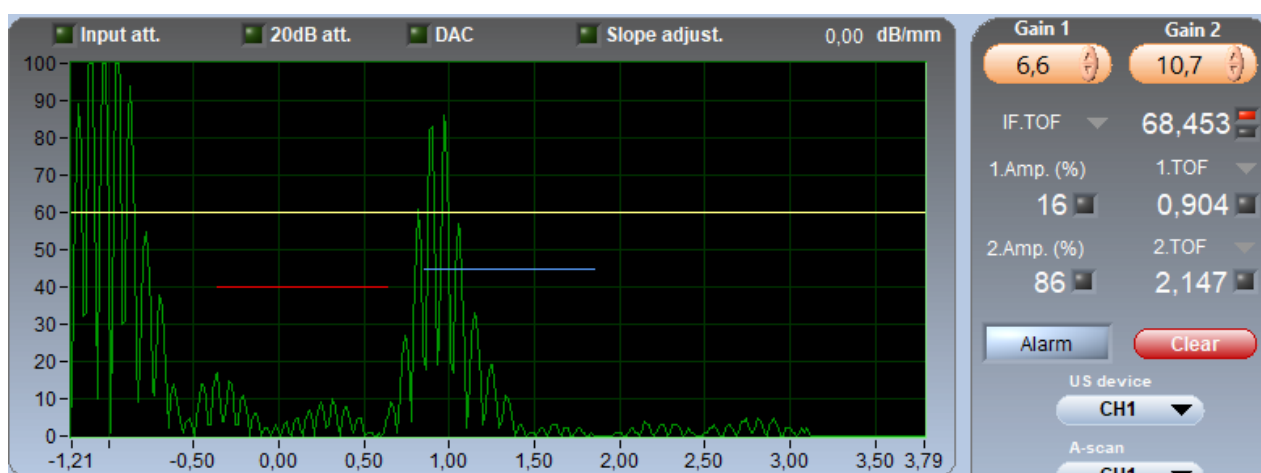
Parametry zkoušení

Druhou sondou určenou pro desku tloušťky 2 mm je ISL-1002-VHR.

Místo bez vady

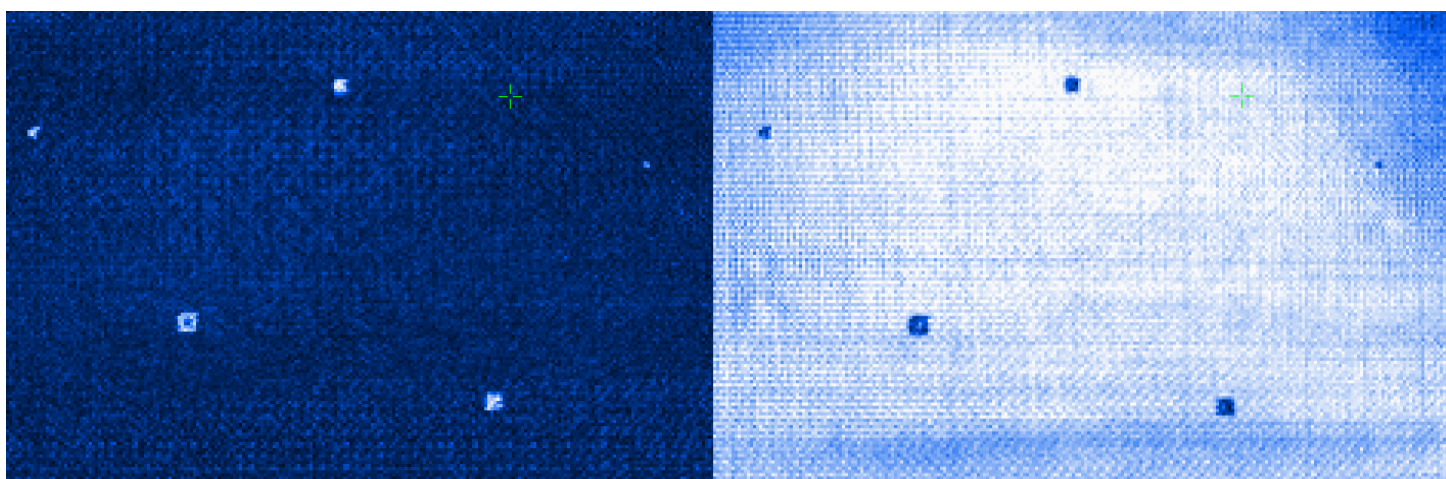
Tabulka 7: T 2 mm, ISL-1002, místo bez vady, parametry

Frekvence zesílení	6,6 Hz
Frekvence koncového echa	10,7 Hz
Šum v oblasti bez vady	16 %
Vodní dráha	68,45 mm
Napětí	125 V



Obrázek 35: T 2 mm, ISL-1002, místo bez vady

Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE



Obrázek 36: T 2 mm, ISL-1002, sken, vadová brána, koncová brána

Sken našel všechny vady ve výborné viditelnosti.

Určení velikosti + Odstup signál šum + Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm

Tabulka 8: T 2 mm, PE, ISL-1002, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	5,66	6,02	ANO	14 %	Výborná
2	8x8	7,42	8,03		8 %	
3	3x3	4,22	3,59	NE	13 %	
4	12x12	11,98	11,96	ANO	15 %	
5	10x10	9,12	7,96	NE	18 %	

Výsledky odpovídají až na vadu 3, jejíž rozměr x je větší než skutečný a vadu 5, kde hodnota y je menší, než by měla být. Oproti sondě ISL ISL-0502-HR má tato sonda nižší šum.

6.2.1 Vyhodnocení výsledků T 2 mm PE

Sonda s nejlepšími výsledky pro dané kritérium bude hodnocena číslem 1., horší varianty čísly 2., v případě třetí sondy 3. Pokud sondy dosáhnou stejných výsledků, mohou se umístit na stejném pořadí dvě, případně tři sondy.

Tabulka 9: Vyhodnocení výsledků PE, T 2 mm

	Kritérium	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR
Pořadí	Autodetekce	1.	1.
	Rozměry	1.	2.
	Odstup signál šum	2.	1.
	Rozlišitelnost	1.	1.

V případě desky tloušťky 2 mm obě vybrané sondy splňují schopnost automatické detekce defektů a poskytují dostačující rozlišitelnost blízko povrchu. Zatímco prvně použitá sonda ISL-0502-HR je bezchybná v určování rozměrů, deseti megahertzová sonda měla dvě neshody. Na vadě velikosti 3x3 mm to není natolik zásadní, neboť byla změřena v rozměru x větší, ale v případě vady 5 velikosti 10x10 mm došlo k podkročení velikosti. V kritériu odstupu signálu od šumu si vede lépe sonda ISL-1002-VHR, ale obě dvě splňují požadavky Airbusu. Z důvodu špatně určeného rozměru tedy volím pěti megahertzovou sondu.

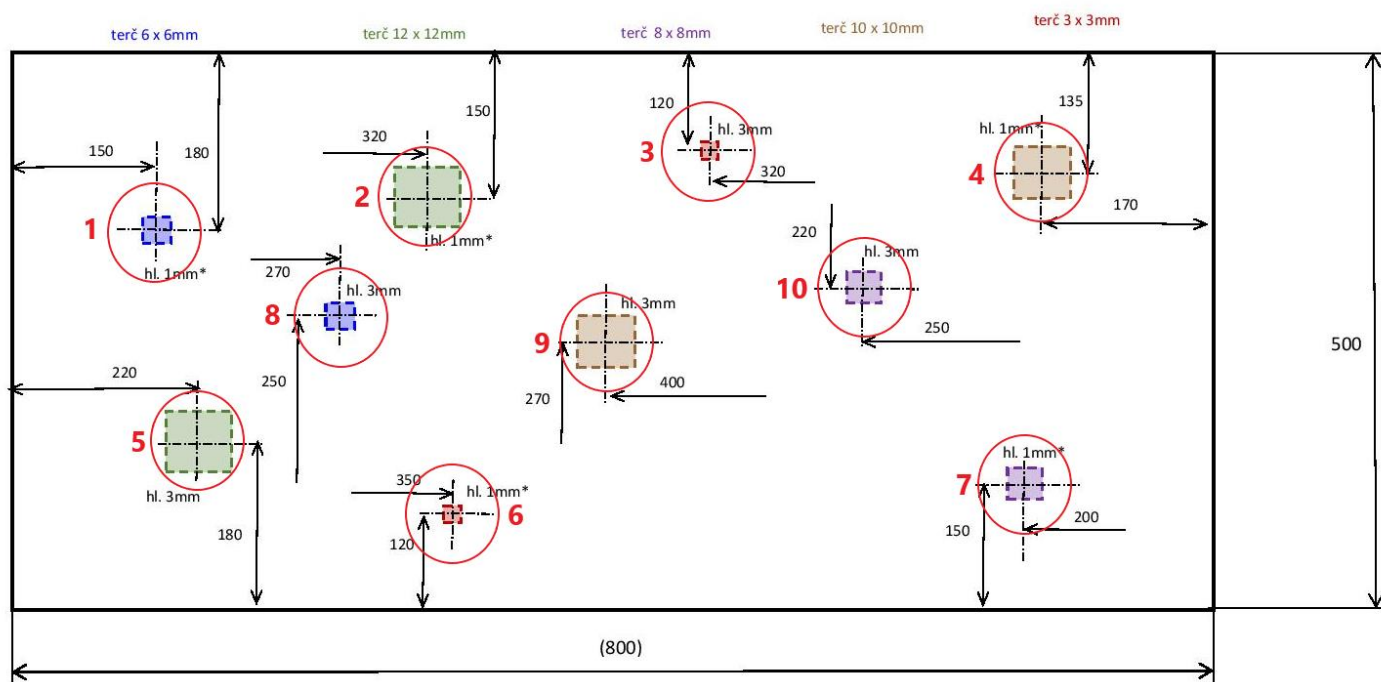
V případě desky tloušťky 2 mm metodou PE tedy doporučuji sondu ISL-0502-HR.

6.3 Deska tloušťky 5 mm PE

Tato deska bude zkoušena celkem dvěma sondami, ISL-0502-HR, ISL-1002-VHR. Na rozdíl od desky 2 mm se 5 mm deska při standardní rychlosti pohybu nerozkmitá. To nám umožňuje nastavit výchozí rychlost skenování 300 mm/s. Vady na této desce budou opět očíslovány pro lepší přehlednost. Vzhledem k tomu, jak jsou umělé vady umístěny, bude již tato deska měřena z obou stran. Strana, kde hloubky vad odpovídají výkresu, bude označena jako **LÍC** a opačná jako **RUB**.

Tabulka 10: Parametry automatického skenování PE, T 5 mm

Rychlost skenování	300 mm/s
Krok v ose y	2 mm



Obrázek 37: Deska T 5 mm, očíslování vad

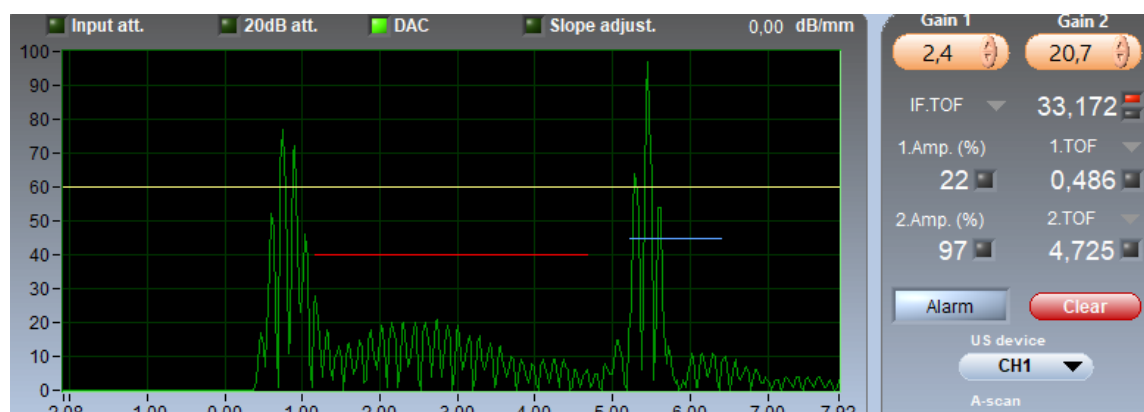
T 5 mm ISL-0502-HR

Parametry zkoušení

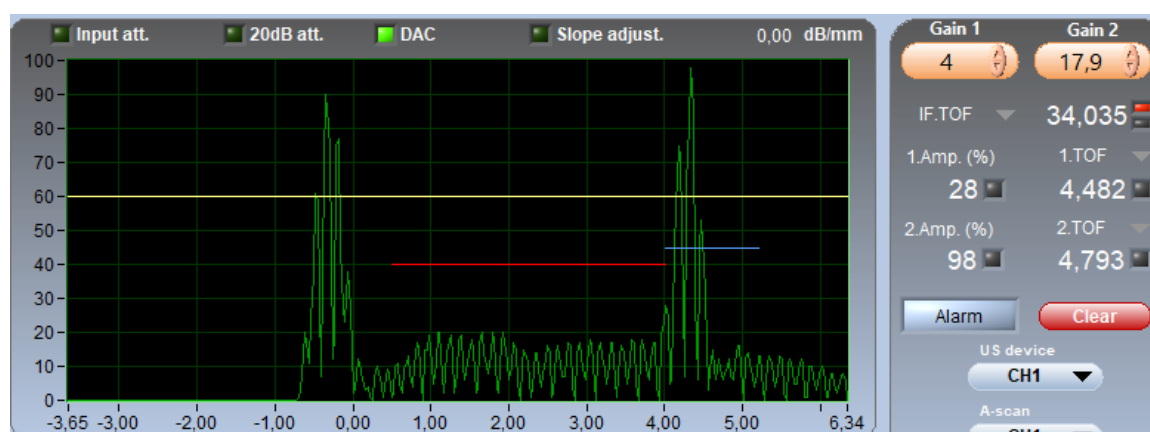
Místo bez vady

Tabulka 11: T 5 mm, ISL-0502, místo bez vady, parametry

	LÍC	RUB
Frekvence zesílení	2,4 Hz	4 Hz
Frekvence koncového echa	20,7 Hz	17,9 Hz
Šum v oblasti bez vady	22 %	20 %
Vodní dráha	33,17 mm	34,04 mm
Napětí	125 V	125 V



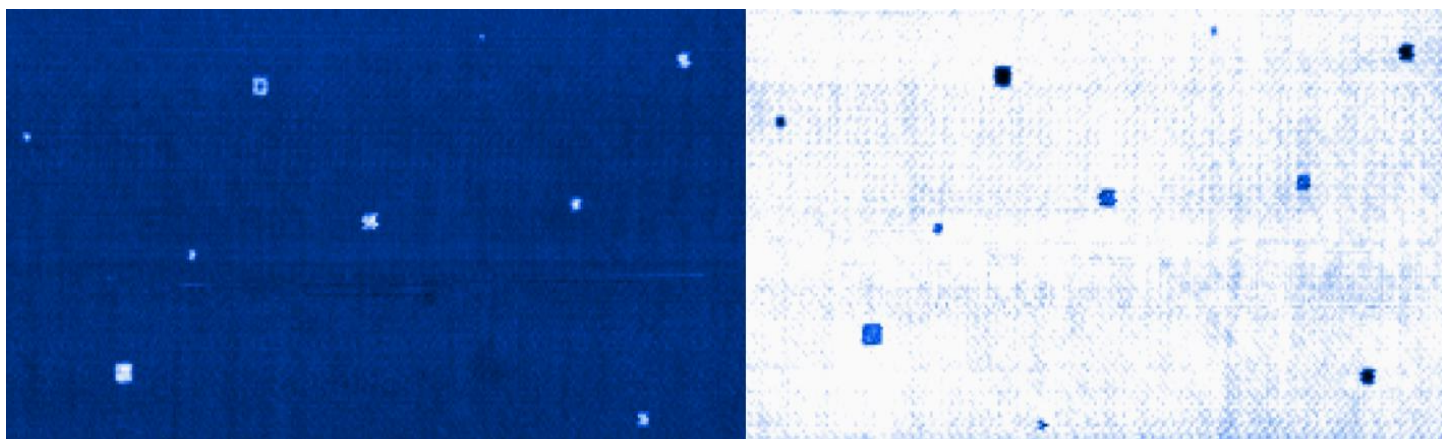
Obrázek 38: T 5 mm LÍC, ISL-0502, místo bez vady



Obrázek 39: T 5 mm RUB, ISL-0502, místo bez vady

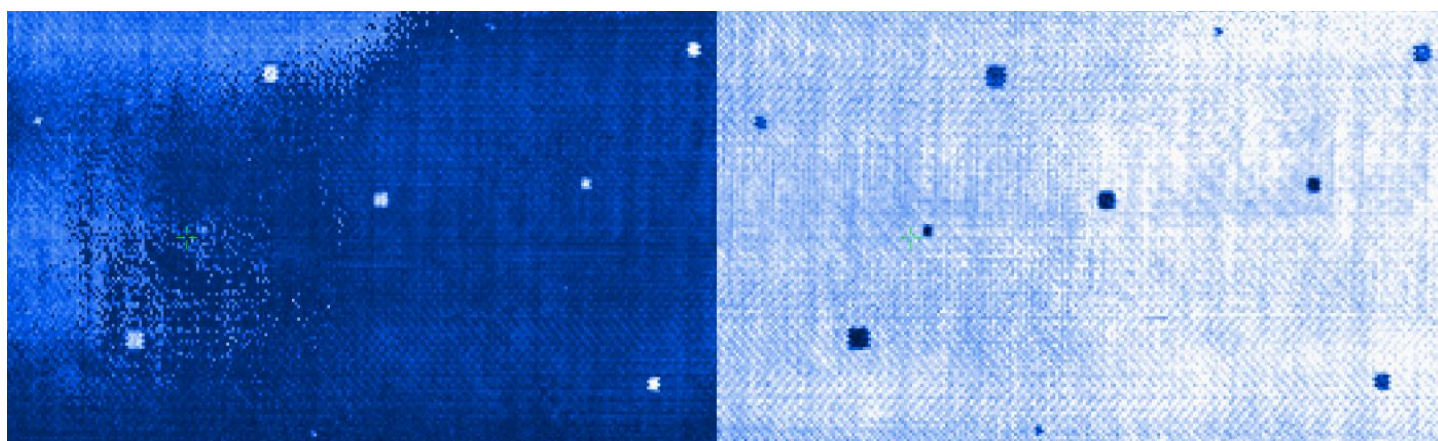
Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE

LÍC



Obrázek 40: T 5 mm **LÍC**, ISL-0502, sken, vadová brána, koncová brána

RUB



Obrázek 41: T 5 mm **RUB**, ISL-0502, sken, vadová brána, koncová brána

Sken z lícové strany našel vše pouze na koncové bráně. Na vadové nebyla zachycena indikace 6 velikosti 3x3 mm. Sken z rubové strany našel všechny vady. Viditelnost na vadové bráně mírně zhoršená.

Určení velikosti + Odstup signál šum + Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm

Tabulka 12: T 5 mm LÍC, PE, ISL-0502, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	1	5,56	5,64	ANO	22	Dobrá
2	12x12	1	12,23	12,07		32	Dobrá
3	3x3	3	4,23	3,93	NE	25	-
4	10x10	1	8,83	9,38		30	Dobrá
5	12x12	3	12,88	11,85	ANO	21	-
6	3x3	1	3,81	3,98		40	Dobrá
7	8x8	1	7,16	8,27		29	Dobrá
8	6x6	3	5,58	6,06		20	-
9	10x10	3	10,72	10,01		21	-
10	8x8	3	7,48	7,61		18	-

Tabulka 13: T 5 mm RUB, PE, ISL-0502, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	4	6,08	6,21	ANO	19	Výborná
2	12x12	4	11,9	12,08		15	Výborná
3	3x3	2	4,38	4,3	NE	18	-
4	10x10	4	10,03	9,48	ANO	13	Výborná
5	12x12	2	13,32	12,46	NE	19	-
6	3x3	4	3,3	3,74	ANO	17	Výborná
7	8x8	4	8,44	8,38		18	Výborná
8	6x6	2	5,72	6,3		19	-
9	10x10	2	10,8	10,38		16	-
10	8x8	2	7,5	8,26		18	-

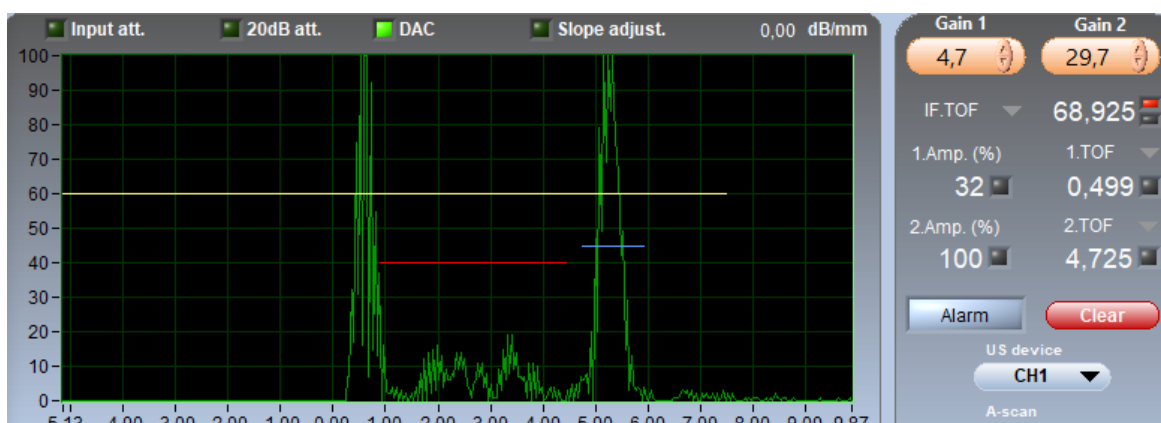
T 5 mm ISL-1002-VHR

Parametry zkoušení

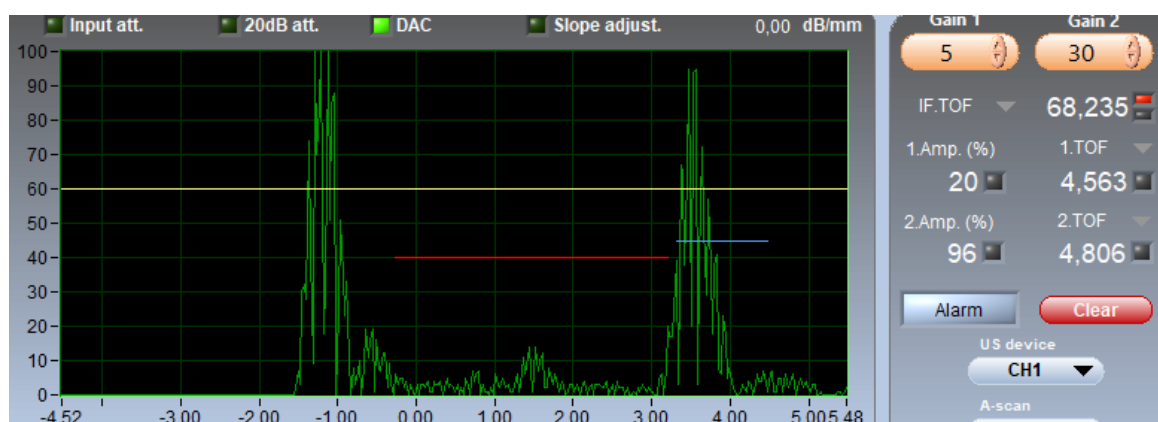
Místo bez vady

Tabulka 14: T 5 mm, ISL-1002, místo bez vady, parametry

	LÍC	RUB
Frekvence zesílení	4,7 Hz	5 Hz
Frekvence koncového echa	29,7 Hz	30 Hz
Šum v oblasti bez vady	20 %	20 %
Vodní dráha	68,9 mm	68,2 mm
Napětí	125 V	125 V



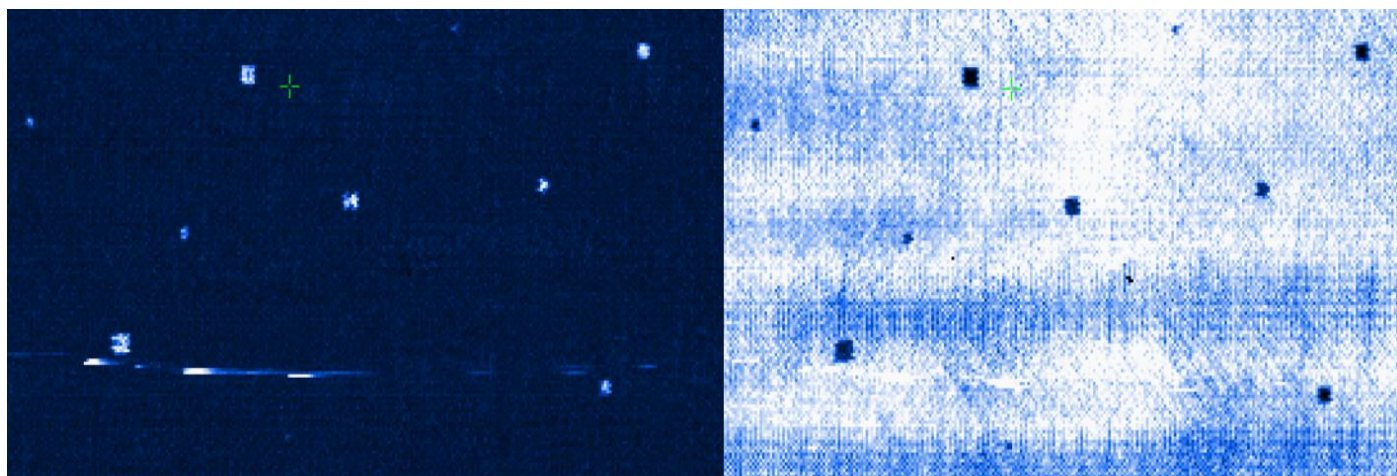
Obrázek 42: T 5 mm LÍC, ISL-1002, místo bez vady



Obrázek 43: T 5 mm RUB, ISL-1002, místo bez vady

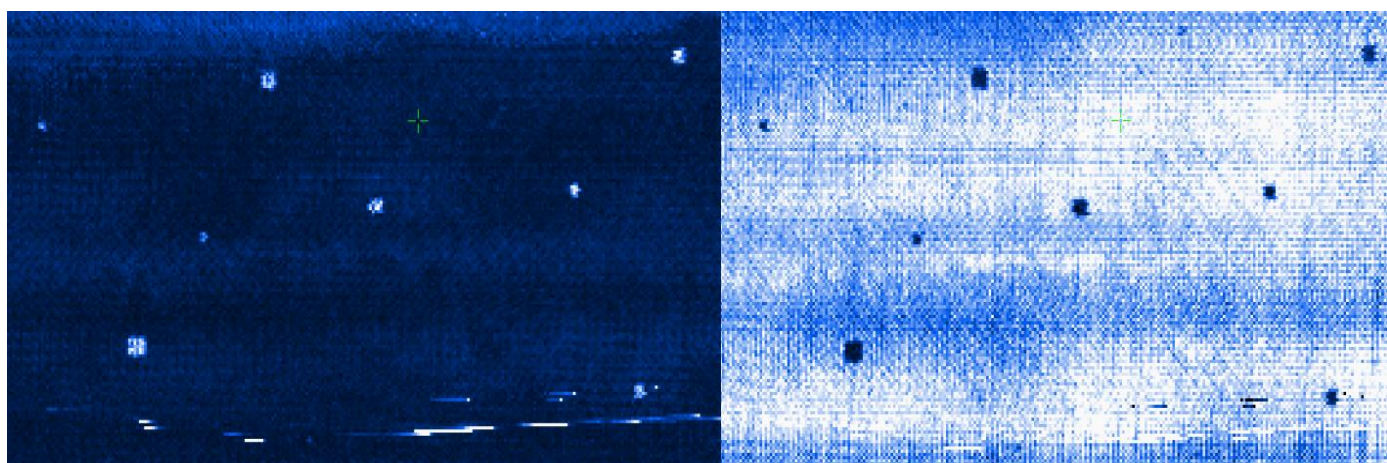
Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE

LÍC



Obrázek 44: T 5 mm **LÍC**, ISL-1002, sken, vadová brána, koncová brána

RUB



Obrázek 45: T 5 mm **RUB**, ISL-1002, sken, vadová brána, koncová brána

Určení velikosti + Odstup signál šum + Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm

Tabulka 15: T 5 mm LÍC, PE, ISL-1002, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	1	5,58	5,8	ANO	5	Výborná
2	12x12	1	11,22	12,4		8	Dobrá
3	3x3	3	4,34	3,62	NE	20	-
4	10x10	1	9,3	9,39	ANO	17	Výborná
5	12x12	3	11,08	11,79		10	-
6	3x3	1	3,03	4,34	NE	28	Výborná
7	8x8	1	7,82	8,1	ANO	13	Výborná
8	6x6	3	5,31	6,61		17	-
9	10x10	3	10,72	9,9	ANO	10	-
10	8x8	3	5,84	8,05	NE	10	-

Tabulka 16: T 5 mm RUB, PE, ISL-1002, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 4 mm
1	6x6	4	5,52	5,54	ANO	17	Výborná
2	12x12	4	11,65	12,01		13	Výborná
3	3x3	2	4,97	3,34	NE	18	-
4	10x10	4	9,22	9,37	ANO	11	Výborná
5	12x12	2	12,35	11,37		5	-
6	3x3	4	3,16	3,88		36	Výborná
7	8x8	4	7,38	7,99		11	Výborná
8	6x6	2	5,36	6,17		14	-
9	10x10	2	10,23	8,46	NE	10	-
10	8x8	2	7,98	8,54	ANO	10	-

6.3.1 Vyhodnocení výsledků T 5 mm PE

Tabulka 17: Vyhodnocení výsledků PE, T 5 mm

	Kritérium	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR
Pořadí	Autodetekce	2.	1.
	Rozměry	1.	2.
	Odstup signál šum	2.	1.
	Rozlišitelnost	2.	1.

Při automatické detekci pěti megahertzová sonda nenašla jednu vadu velikosti 3x3 mm při měření lícové strany desky. Druhá sonda našla vše. Ze skenů je patrné, že pěti megahertzová sonda ISL-0502-HR má lepší stabilitu a vady jsou lépe zpozorovatelné, zatímco v případě vítězné sondy můžeme pozorovat větší kolísání.

U kritéria určování rozměrů byly naměřeny čtyři chybné rozměry pro první sondu ISL-0502-HR, a pět chybných rozměrů u sondy ISL-1002-VHR. Jedná se jak o podkročení velikosti, tak přesáhnutí skutečných rozměrů.

Z odstupů signálu a šumu vychází lépe sonda ISL-1002-VHR. Na rozdíl od pěti megahertzové nedosahuje v žádném případě kritické hodnoty 40 %. Sonda ISL-0502-HR má vyšší šum a v případě vady 6 v hloubce 1 mm dosáhla kritické hranice. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o vadu 3x3 mm, nejde o příliš závažné zjištění.

Při zkoumání vad, které jsou blízko koncovému nebo vstupnímu echu, je vidět, že pěti megahertzová sonda má horší rozlišitelnost vad v hloubce 1 mm. V hloubce 9 mm tyto vady nemá problém rozeznat, neboť pokles koncového echa je zde dostatečný. Lepších výsledků zde tedy dosáhla deseti megahertzová sonda.

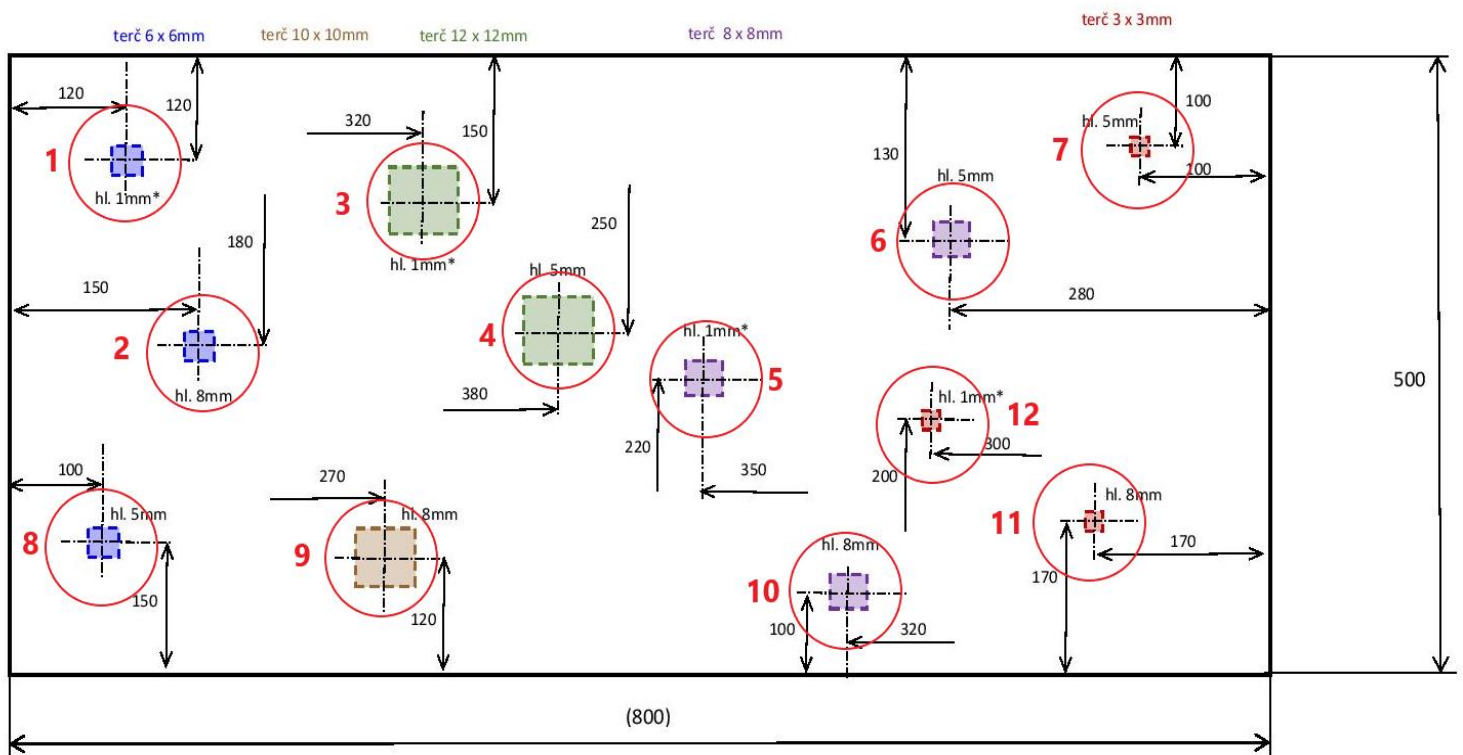
V případě desky tloušťky 5 mm metodou PE tedy doporučuji sondu ISL-1002-VHR.

6.4 Deska tloušťky 10 mm PE

Pro zkoušení desky tloušťky 10 mm použijeme sondy ISL-0502-HR, ISL-1002-VHR, ISL-0304-CMP. Rychlost skenování je zde standardní. Vady jsou opět na výkrese očíslovány a v měření využíváme označení **LÍC** a **RUB**.

Tabulka 18: Parametry automatického skenování PE, T 10 mm

Rychlost skenování	300 mm/s
Krok v ose y	2 mm



Obrázek 46: Deska T 10 mm, očíslování vad

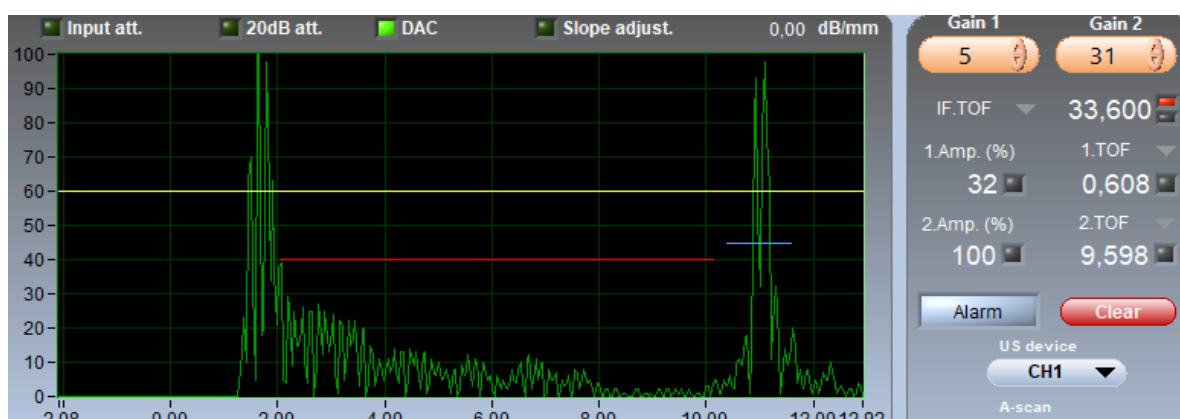
T 10 mm ISL-0502-HR

Parametry zkoušení

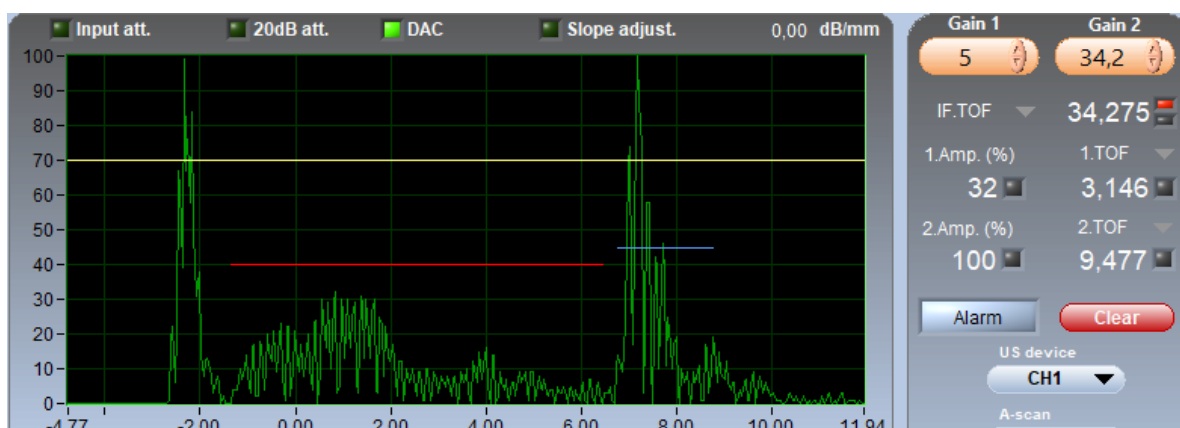
Místo bez vady

Tabulka 19: T 10 mm, ISL-0502, místo bez vady, parametry

	LÍC	RUB
Frekvence zesílení	5 Hz	5 Hz
Frekvence koncového echa	31 Hz	34,2 Hz
Šum v oblasti bez vady	28 %	32 %
Vodní dráha	33,6 mm	34,27 mm
Napětí	250 V	250 V



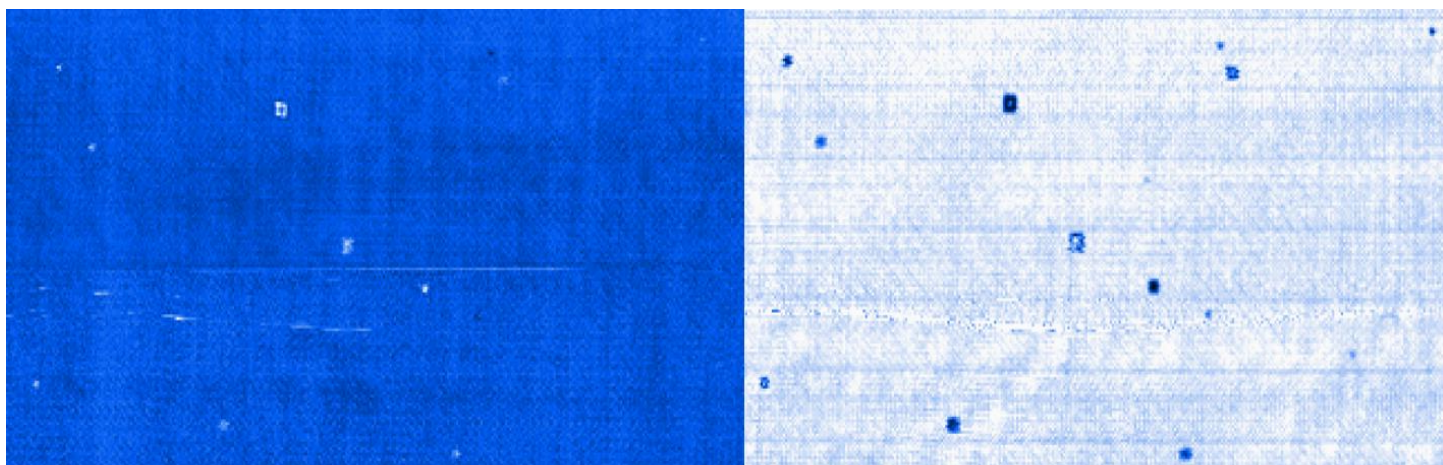
Obrázek 48: T 10 mm LÍČ, ISL-0502, místo bez vady



Obrázek 49: T 10 mm RUB, ISL-0502, místo bez vady

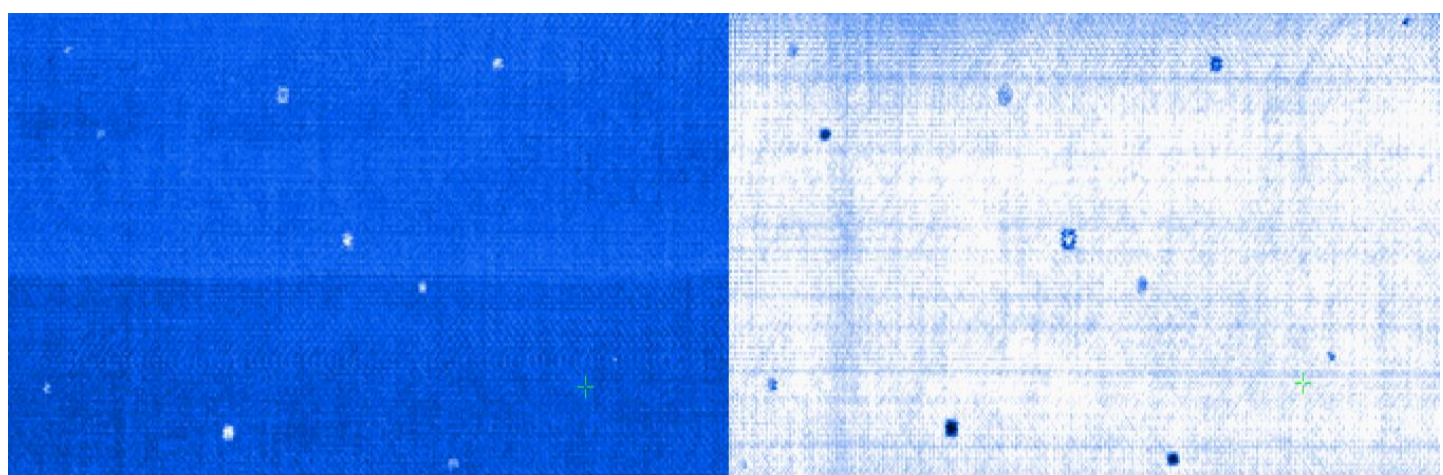
Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE

LÍC



Obrázek 50: T 10 mm LÍC, ISL-0502, sken, vadová brána, koncová brána

RUB



Obrázek 51: T 10 mm RUB, ISL-0502, sken, vadová brána, koncová brána

Určení velikosti + Odstup signál šum + Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm

Tabulka 20: T 10 mm LÍC, PE, ISL-0502, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	1	3,66	3,98	NE	18	Výborná
2	6x6	8	6,25	5,52	ANO	27	-
3	12x12	1	3,84	10,22	NE	22	Výborná
4	12x12	5	11,41	12,1	ANO	28	-
5	8x8	1	4,61	6,78	NE	18	Výborná
6	8x8	5	9,14	7,88		44	-
7	3x3	5	4,33	4,83		40	-
8	6x6	5	5,56	6,06	ANO	21	-
9	10x10	8	9,73	9,58		32	-
10	8x8	8	8,41	7,37		28	-
11	3x3	8	3,82	3,67		70	-
12	3x3	1	2,26	3,78	NE	50	Špatná

Tabulka 21: T 10 mm RUB, PE, ISL-0502, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 9 mm
1	6x6	9	6	5,83	ANO	31	Výborná
2	6x6	2	6,86	5,75		31	-
3	12x12	9	11,36	12,54		35	Výborná
4	12x12	5	8,04	12,06	NE	24	-
5	8x8	9	7,36	7,61	ANO	27	Výborná
6	8x8	5	8,76	8,27		31	-
7	3x3	5	5,46	5,14	NE	36	-
8	6x6	5	6,01	6,51	ANO	29	-
9	10x10	2	10,28	9,85		23	-
10	8x8	2	10,68	7,45	NE	25	-
11	3x3	2	5,38	4,46		34	-
12	3x3	9	3,71	3,61	ANO	60	Dobrá

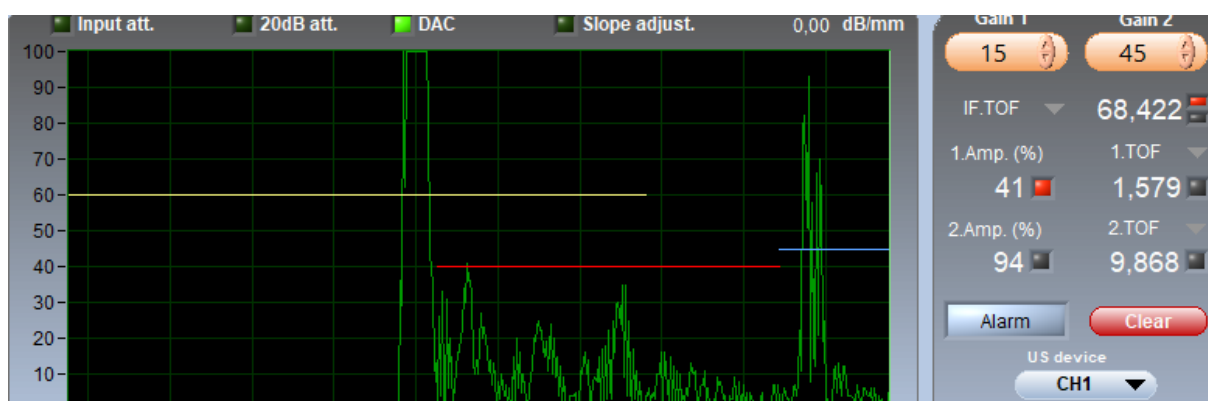
T 10 mm ISL-1002-VHR

Parametry zkoušení

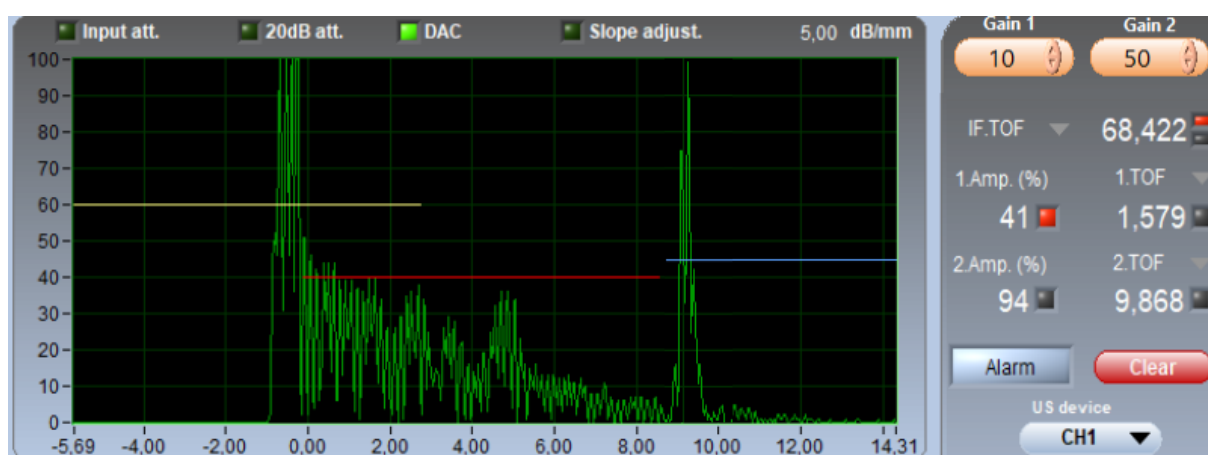
Místo bez vady

Tabulka 22: T 10 mm, ISL-1002, místo bez vady, parametry

	LÍC	RUB
Frekvence zesílení	15 Hz	10 Hz
Frekvence koncového echa	45 Hz	50 Hz
Šum v oblasti bez vady	41 %	41 %
Vodní dráha	68,4 mm	68,42 mm
Napětí	250 V	250 V



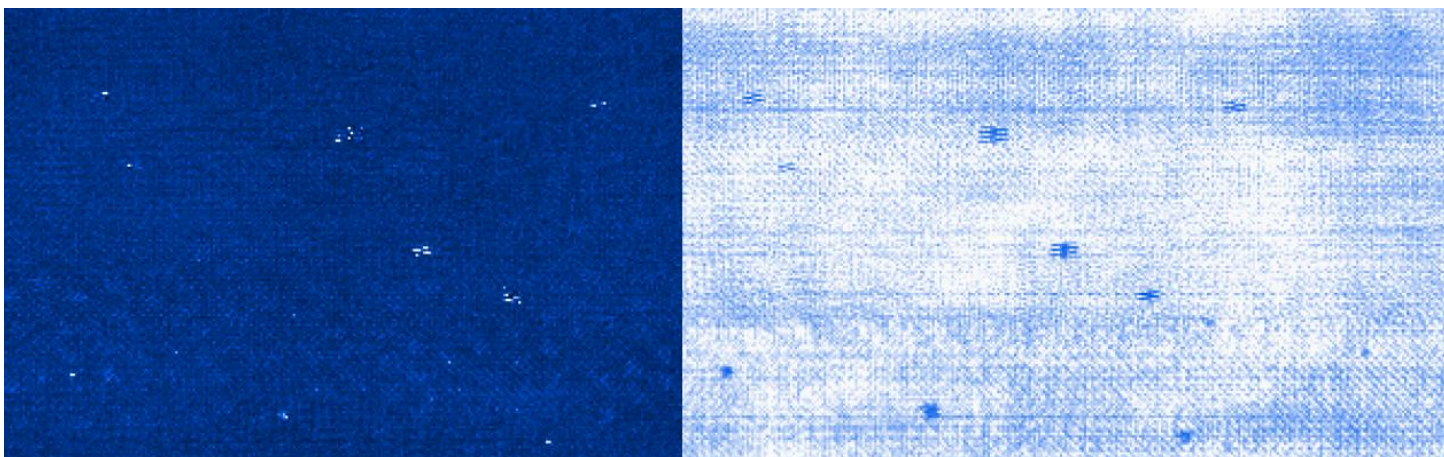
Obrázek 52: T 10 mm LÍC, ISL-1002, místo bez vady



Obrázek 53: T 10 mm RUB, ISL-1002, místo bez vady

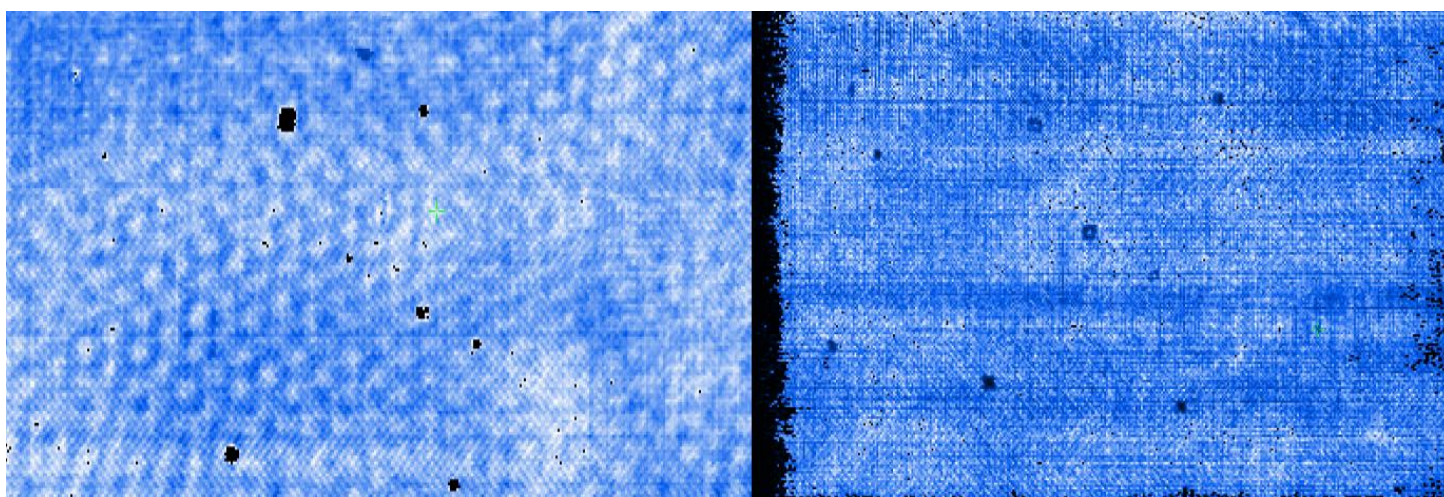
Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE

LÍC



Obrázek 54: T 10 mm LÍC, ISL-1002, sken, vadová brána, koncová brána

RUB



Obrázek 55: T 10 mm RUB, ISL-1002, sken, vadová brána, koncová brána

Určení velikosti + Odstup signál šum + Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm

Tabulka 23: T 10 mm LÍC, PE, ISL-1002, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	1	5,88	4,68	NE	20	Dobrá
2	6x6	8	6,27	5,45	ANO	46	-
3	12x12	1	3,78	2,7	NE	21	Dobrá
4	12x12	5	6,25	6,2		15	-
5	8x8	1	5,11	7,43		21	Špatná
6	8x8	5	4,22	3,6		25	-
7	3x3	5	4,04	3,05		62	-
8	6x6	5	4,28	6,01		27	-
9	10x10	8	5,65	7,49		31	-
10	8x8	8	5,8	4,11		26	-
11	3x3	8	3,99	4,17		82	-
12	3x3	1	4,3	3,69		23	Dobrá

Tabulka 24: T 10 mm RUB, PE, ISL-1002, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 9 mm
1	6x6	9	8,66	8,38	NE	26	Výborná
2	6x6	2	5,99	4,47		30	-
3	12x12	9	11,65	11,76	ANO	25	Výborná
4	12x12	5	8,58	7,98	NE	14	-
5	8x8	9	8,01	7,23	ANO	15	Výborná
6	8x8	5	7,82	5,06	NE	24	-
7	3x3	5	3,75	4,5		53	-
8	6x6	5	4,25	4,83		15	-
9	10x10	2	9,79	9,18	ANO	14	-
10	8x8	2	8,03	7,5		21	-
11	3x3	2	3,23	3,6	NE	83	-
12	3x3	9	3,24	3,09		52	Dobrá

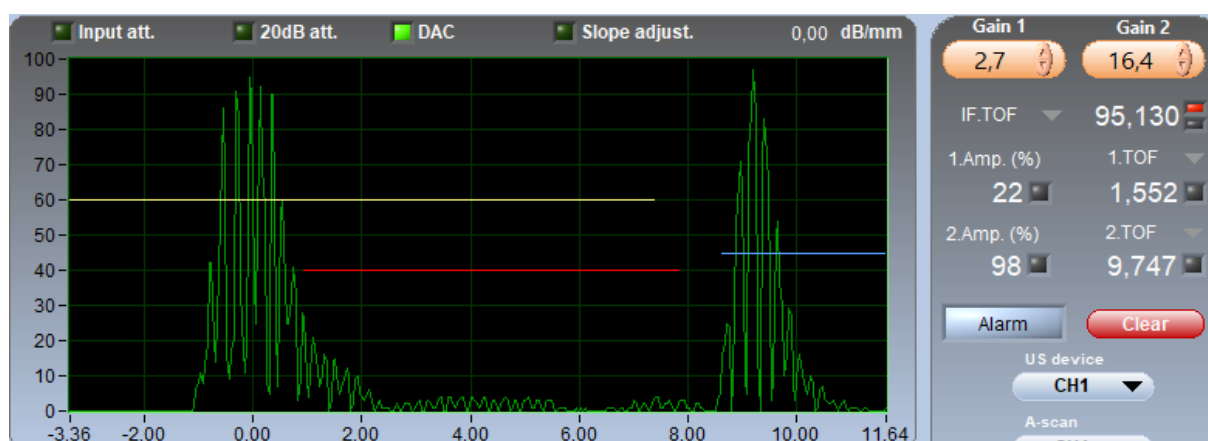
T 10 mm ISL-0304-CMP

Parametry zkoušení

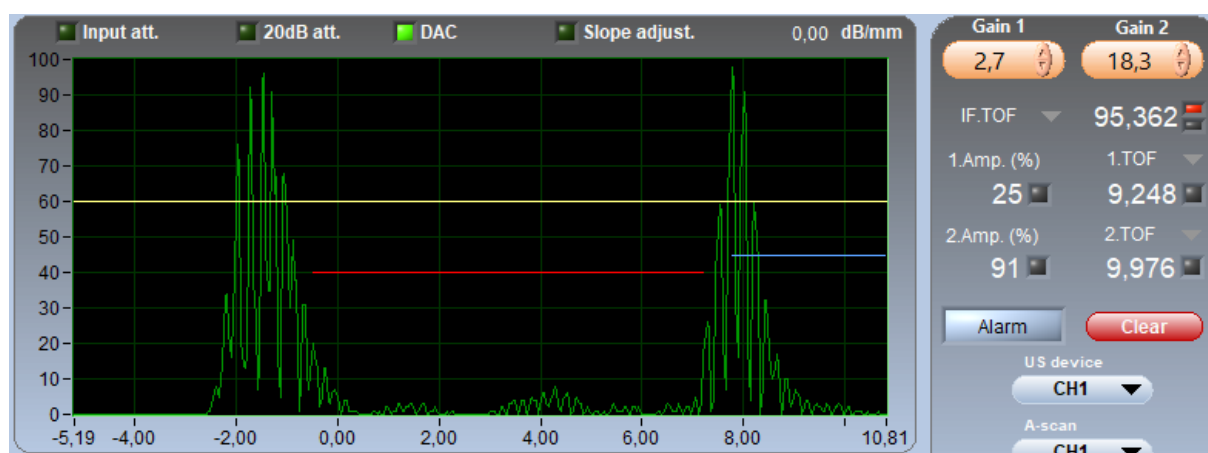
Místo bez vady

Tabulka 25: T 10 mm, ISL-0304, místo bez vady, parametry

	LÍC	RUB
Frekvence zesílení	2,7 Hz	2,7 Hz
Frekvence koncového echa	16,4 Hz	18,3 Hz
Šum v oblasti bez vady	22 %	20 %
Vodní dráha	95,1 mm	95,4mm
Napětí	250 V	250 V



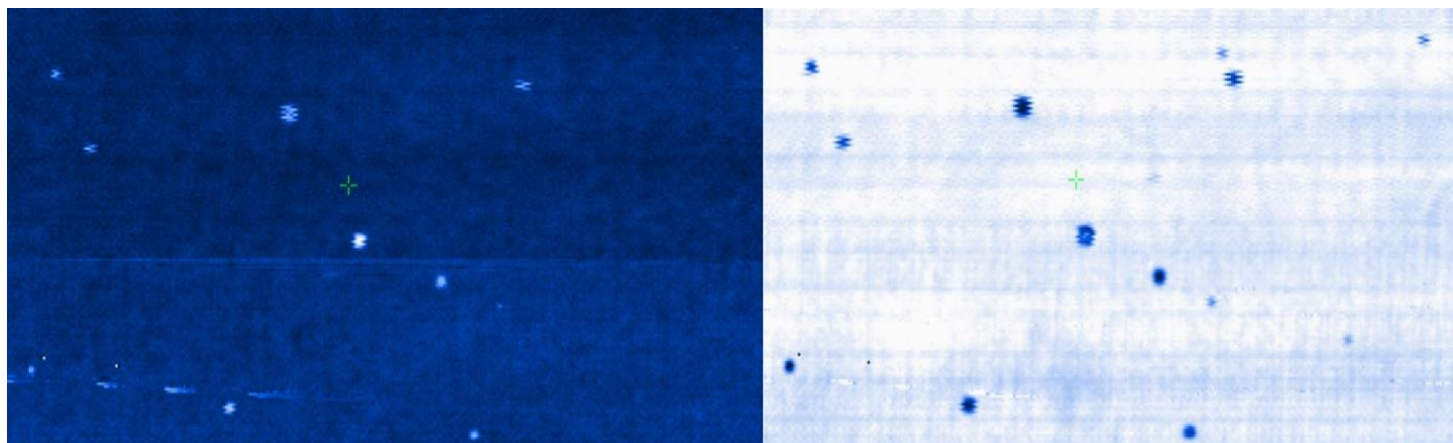
Obrázek 56: T 10 mm LÍC, ISL-0304, místo bez vady



Obrázek 57: T 10 mm RUB, ISL-0304, místo bez vady

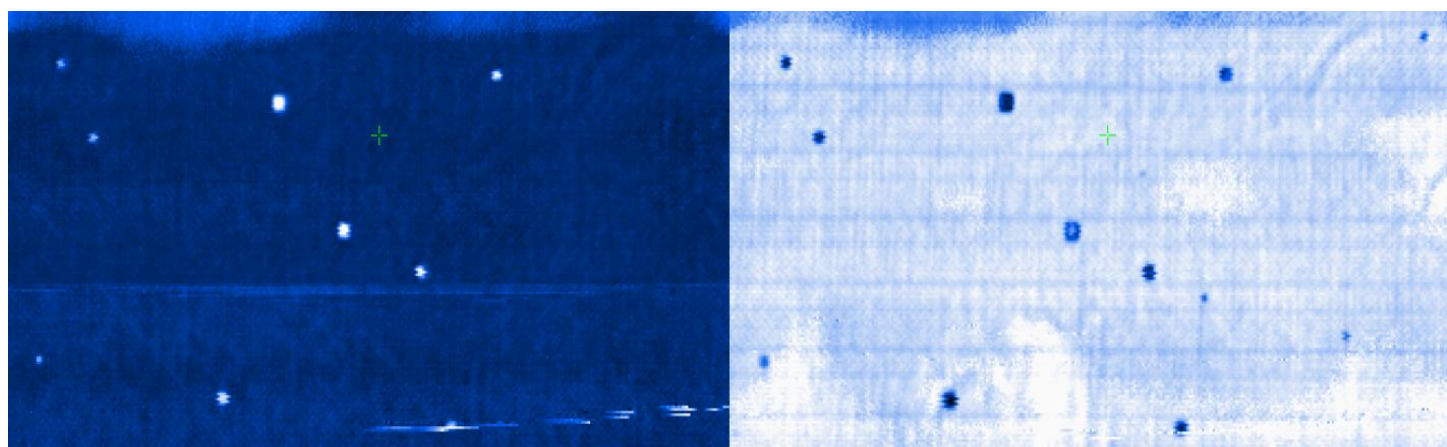
Automatická detekce umělých vad ve vzorku PE

LÍC



Obrázek 58: T 10 mm LÍC, ISL-0304, sken, vadová brána, koncová brána

RUB



Obrázek 59: T 10 mm RUB, ISL-0304, sken, vadová brána, koncová brána

Určení velikosti + Odstup signál šum + Rozlišitelnost indikací v hloubce 1 mm

Tabulka 26: T 10 mm LÍC, PE, ISL-0304, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 1 mm
1	6x6	1	9,26	9,92	NE	15	Špatná
2	6x6	8	7,65	6,35		14	-
3	12x12	1	15,72	15,74		16	Špatná
4	12x12	5	11,8	12,12	ANO	12	-
5	8x8	1	11,38	12,05	NE	22	Špatná
6	8x8	5	9,68	8,41		10	-
7	3x3	5	5,05	5,14		20	-
8	6x6	5	6,21	6,5	ANO	15	-
9	10x10	8	9,88	9,79		13	-
10	8x8	8	8,69	7,64		11	-
11	3x3	8	4,48	4,71	NE	20	-
12	3x3	1	8,41	7,45		13	Špatná

Tabulka 27: T 10 mm RUB, PE, ISL-0304, velikost, šum, rozlišitelnost

Vada	Skutečný rozměr [mm]	Hloubka [mm]	Rozměr x [mm]	Rozměr y [mm]	Odpovídá	Šum [%]	Rozlišitelnost pro hl. 9 mm
1	6x6	9	7,92	6,54	NE	16	Výborná
2	6x6	2	7,52	6,74		32	-
3	12x12	9	12,58	12,74	ANO	13	Výborná
4	12x12	5	11,43	11,74		12	-
5	8x8	9	8,6	8,49		11	Výborná
6	8x8	5	8,44	7,78	ANO	13	-
7	3x3	5	5,02	5,06	NE	16	-
8	6x6	5	6,04	6,48	ANO	13	-
9	10x10	2	10,92	10,34		31	-
10	8x8	2	8,76	8,21		32	-
11	3x3	2	5,52	5,54	NE	30	-
12	3x3	9	-	-		18	Špatná

6.4.1 Vyhodnocení výsledků T 10 mm PE

Tabulka 28: Vyhodnocení výsledků PE, T 10 mm

	Kritérium	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP
Pořadí	Autodetekce	2.	3.	1.
	Rozměry	1.	3.	2.
	Odstup signál šum	2.	3.	1.
	Rozlišitelnost	1.	2.	3.

Při automatickém skenování nejhůře dopadl sken pro sondu ISL-1002-VHR, kde se projevuje vysoká nestabilita signálu a některé vady jsou deformované. Zbylé dvě sondy mají především problém s nalezením vad velikosti 3x3 mm na vadové bráně. Jako nejlepší sondu jsem zde určil ISL-0304-CMP, neboť sice stabilně nenachází menší vady, ale její výsledky jsou lépe zřetelné než u sondy ISL-0502-HR.

Sonda ISL-0502-HR zaznamenala chybný rozměr v 11 případech. Tří megahertzová sonda ve 13 a deseti megahertzová sonda dokonce v 19 případech. Jak je vidět, s určení správných rozměrů na této tloušťce mají problém všechny sondy.

Sondy používané i na deskách tloušťky 2 a 5 mm jsou zatíženy vysokým šumem. V pěti případech dosáhl, nebo dokonce přesáhl, přípustnou hodnotu 40 % pro pěti megahertzovou sondu a u desetimegahertzové dokonce v šesti případech. Na druhou stranu sonda ISL-0304-CMP neměla žádný nález kritického šumu a její hodnoty jsou nejnižší.

U rozlišitelnosti všechny sondy mají problém spíše s defekty, které jsou blízko vstupnímu echu. Sonda ISL-0304-CMP díky svému silnému signálu má sice stabilnější výsledky, ale taktéž dochází ke splynutí se vstupním echem, to je zde širší než u ostatních sond. Jako nejlepší sonda se zde jeví ISL-0502-HR, která má nejmenší problémy s detekcí v těchto oblastech.

Vzhledem k výsledkům bych v tomto případě pro desku 10 mm metodou PE doporučil dvě sondy. Sondu ISL-0304-CMP pro účely automatického skenování a sondu ISL-0502-HR pro manuální zkoušení podpovrchových vad.

7 Metoda průchodová TTU

Další zkoumanou metodou je metoda průchodová TTU. Její princip spočívá ve dvou sondách, které jsou naproti sobě a jedna slouží jako vysílač a druhá jako přijímač signálu. Mezi nimi se nachází zkoušený objekt, který způsobuje pokles signálu. V ideálním stavu, kdy v materiálu nejsou žádné vady, je útlum ve všech místech vzorku stejný. V případě vady ale dojde k poklesu průchodového signálu, tedy i průchodového echa na A-scanu. Tato metoda je jednodušší na ultrazvukové nastavení, ale přináší nevýhody jako nemožnost určování hloubky, ve které se vada nachází, nebo složitější mechanizace, aby byla zajištěna správná pozice sond vůči sobě a také desce. Při volbě správné sondy se zde není třeba obávat toho, že bychom nenašli vadu ve větší hloubce z důvodu špatně nastavené křivky DAC jako u metody PE.

Plán měření TTU

Plán tedy vychází z předchozího měření, doporučení výrobce a zkušeností společnosti ATG s.r.o.

Tabulka 29: Plán měření TTU

Tloušťka desky	Použité sondy		
2 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	x
5 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP
10 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP

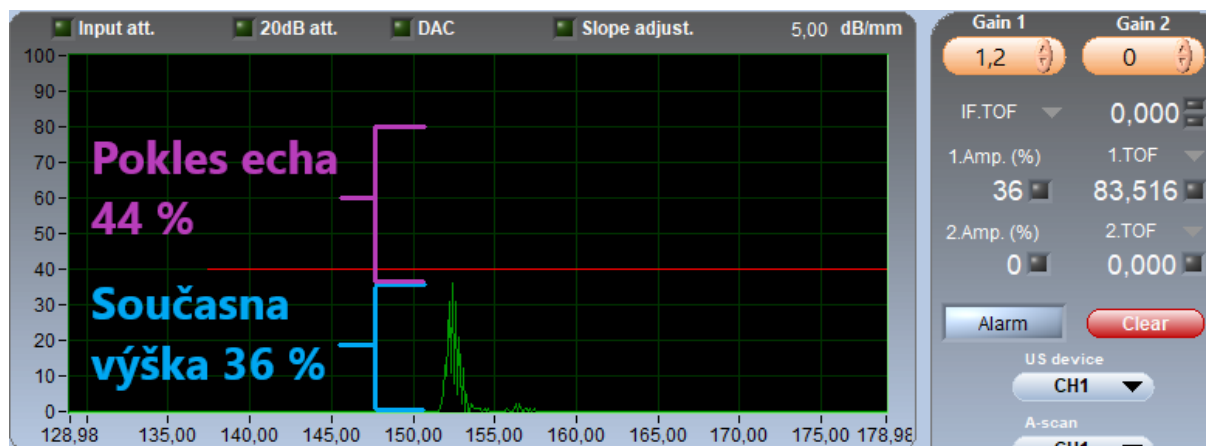
Popis A-scanu TTU

Pro lepší orientaci v naměřených datech, ze kterých vycházíme, bude v této části názorné zobrazení a popsání A-scanu na vybraném příkladu.



Obrázek 60: TTU, místo bez vady ukázka, popis

Poté, co dosáhneme maximálního signálu vykolmením sond a optimalizací jejich vzájemné pozice, je nutné tento signál nastavit tak, aby dosahoval 80 % obrazovky. Toho dosáhneme za pomoci nastavení správné hodnoty frekvence zesílení. Během automatického skenu jsou změny v průběhu výšky echa zaznamenávány za pomoci průchodové brány. Ve výsledném C-scanu pak budou změny odlišeny jinou barvou.



Obrázek 61: TTU, popis poklesu na vadě

Na druhém A-scanu vidíme místo, kde došlo k poklesu vlivem vady, která se zde nachází. Z výchozí hodnoty 80 % obrazovky došlo k poklesu na 36 %. Pokles echa je roven 44 %, což je větší než 30 %, a vyhovuje tedy kritériu pro rozlišitelnost indikací.

7.1 Postup měření TTU

1. Upnutí desky do rámu
2. Nastavení oblasti měření v softwaru
3. Najetí sondou do středu desky, kde se nachází místo bez vady
4. Nastavení vodní dráhy vysílací sondy, vykolmení sondy v ose x a y vůči desce
5. Nastavení vodní dráhy přijímací sondy, vykolmení sondy v ose x a y vůči desce
6. Nastavení pozice sond v ose x a y tak, aby byly naproti sobě
7. Nastavení průchodového echa na 80 % obrazovky
8. Spuštění automatického skenování
9. Ruční nájezd do oblasti vad, jejich změření

Postup je obdobný jako u metody PE. Hlavní rozdíl spočívá v nastavování vykolmení. To nám zajišťuje, že svazek vycházející ze sondy bude kolmý vůči desce, stejně jako bylo popsáno u metody PE. Rozdíl spočívá ve vykolmení obou sond, jak přijímací, tak i vysílací. Při nastavování vykolmení přijímací sondy musí přejít do režimu průchodu, aby bylo možné ji nastavit. Po úspěšném vykolmení v režimu PE se vysílání přepne do režimu TTU. Zde je také nutné zajistit, aby sondy byly naproti sobě, což maximalizuje průchodový signál. Toho docílíme pohybem vysílací sondy v ose x a y. Vzhledem k tomu, že vady se zde neprojevují nárůstem echa, ale poklesem, není nutné nastavovat křivku DAC. To nám poskytuje časovou úlevu, ale zároveň přicházíme o možnost určování hloubky, ve které se vada nachází.

7.2 Vodní dráha sond

Nastavení vodní dráhy A vychází z Airbus předpisů a zajišťuje optimalizaci vysílaného ultrazvukového signálu. Doporučuje se zde, aby při technice TTU blízké pole N končilo na druhé straně zkoušeného dílu. Délka blízkého pole vychází z parametrů sondy, které uvádí výrobce Technisonic.

ISL-0502-HR – N = 34,1 mm

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 2 mm} = 34,1 - 2 = 32,1 \text{ mm}$$

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 5 mm} = 34,1 - 5 = 29,1 \text{ mm}$$

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 10 mm} = 34,1 - 10 = 24,1 \text{ mm}$$

ISL-1002-VHR – N = 68,1 mm

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 2 mm} = 68,1 - 2 = 66,1 \text{ mm}$$

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 5 mm} = 68,1 - 5 = 63,1 \text{ mm}$$

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 10 mm} = 68,1 - 10 = 58,1 \text{ mm}$$

ISL-0304-HR – N = 95,4 mm

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 5 mm} = 95,4 - 5 = 90,4 \text{ mm}$$

$$\text{Vodní dráha A pro CFRP T 10 mm} = 95,4 - 10 = 85,4 \text{ mm}$$

7.3 Deska tloušťky 2 mm TTU

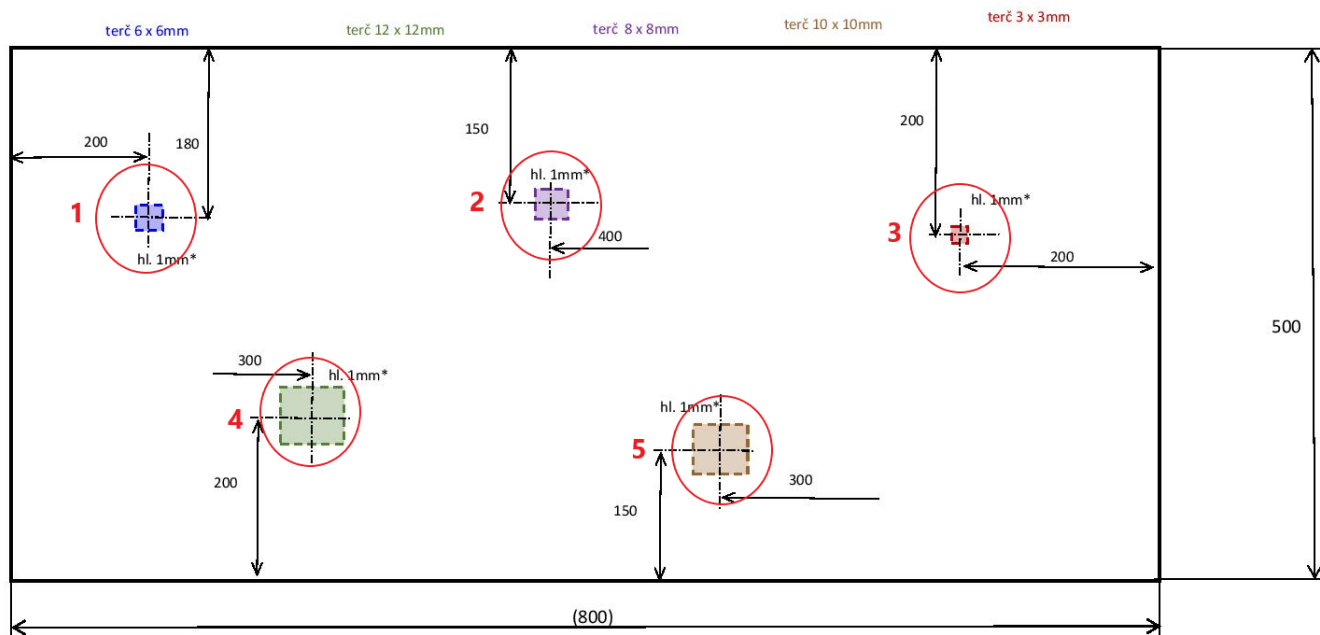
Parametry zkoušení

Deska bude měřena dvěma sondami, ISL-0502-HR a ISL-1002-VHR. V první části shrneme nastavení parametrů měření. Na rozdíl od PE metody zde budou sondy uváděny dohromady pro větší přehlednost. Opět budeme využívat označení **RUB** pro hloubky, které jsou opačné od výkresových a **LÍC** pro hodnoty shodné s výkresovými. Výjimkou bude pouze deska 2 mm, kde měření bude probíhat pouze z jedné strany.

Tabulka 30: T 2 mm, ISL-0502, ISL-1002, místo bez vady, parametry

	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR
Frekvence zesílení	2,1 dB	10,9 dB
Vodní dráha	32,183 mm	65,927 mm
Napětí	125 V	125 V
Rychlost šíření v materiálu	2700 m/s	2700 m/s
Rychlost šíření ve vodě	1480 m/s	1480 m/s

Zkoušená deska tloušťky 2 mm:

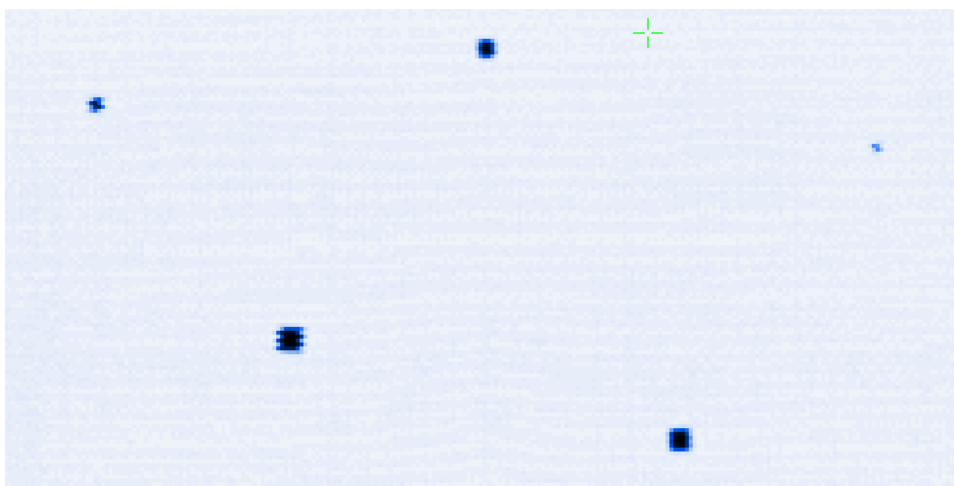


Obrázek 32: Deska T 2 mm, očíslování vad

Výsledky zkoušení

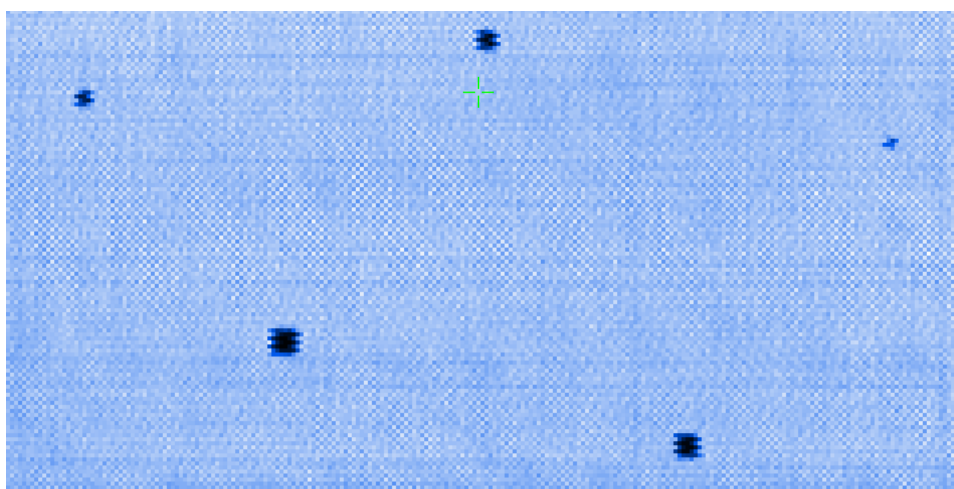
Automatická detekce umělých vad ve vzorku TTU

ISL-0502-HR



Obrázek 62: T 2 mm, ISL-0502, sken, průchodová brána

ISL-1002-VHR



Obrázek 63: T 2 mm, ISL-1002, sken, průchodová brána

Obě sondy našly všech 5 vad ve velmi dobré kvalitě. Budeme tedy pokračovat porovnáním dalších kritérií pro optimální výběr.

Rozlišitelnost indikací TTU

Tabulka 31: Rozlišitelnost indikací TTU, T 2 mm

Sonda	ISL-0502-HR		ISL-1002-VHR	
Vada	Pokles [%]	Odpovídá	Pokles [%]	Odpovídá
1	70	Ano	67	Ano
2	78		78	
3	33		42	
4	80		80	
5	80		80	

Stabilita průchodového echa TTU

Tabulka 32: Stabilita průchodového echa TTU, T 2 mm

Sonda	Stabilita echa [%]
ISL-0502-HR	79-81
ISL-1002-VHR	70-95

7.3.1 Vyhodnocení výsledků T 2 mm TTU

Při vyhodnocování používáme číslo 1. pro nejvhodnější sondu a číslo 2. v případě dalších desek, číslo 3. pro nejhorší. V případě shodných výsledků u některého z kritérií lze použít stejné ohodnocení vícekrát.

Tabulka 33: Vyhodnocení výsledků TTU, T 2 mm

	Kritérium	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR
Pořadí	Autodetekce	1.	1.
	Rozlišitelnost	1.	1.
	Stabilita	1.	2.

Z výsledného hodnocení plyne, že obě sondy poskytují dobrou detekci vad a jejich rozlišitelnost. Určujícím faktorem je zde tedy stabilita echa, která je lepší u sondy ISL-0502-HR.

V případě desky tloušťky 2 mm metodou TTU tedy doporučuji sondu ISL-0502-HR. Sonda ISL-1002-VHR je také přípustná.

7.4 Deska tloušťky 5 mm TTU

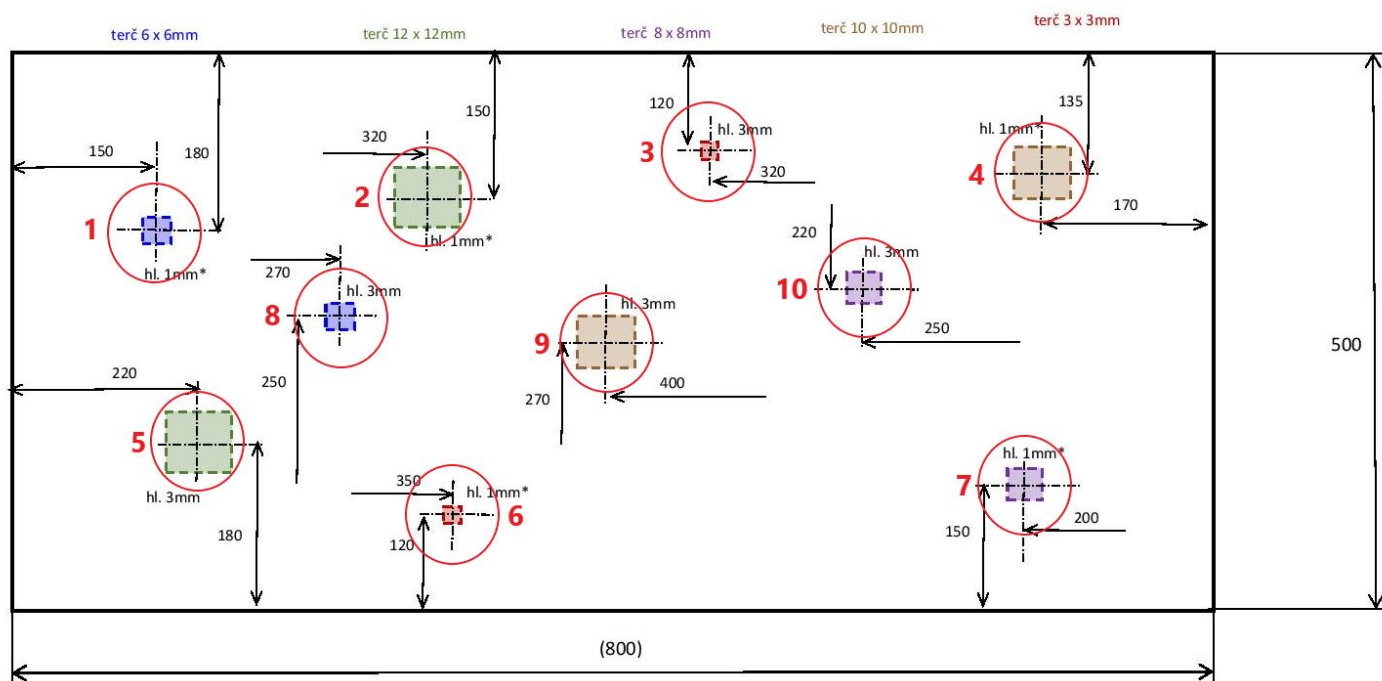
Parametry zkoušení

Pro TTU zkoušení desky tloušťky 5 mm budou použity tři sondy ISL-0502-HR, ISL-1002-VHR a ISL-0304-CMP. Všechny sondy budou měřit desku z obou stran. Pro měření z rubové strany, nenastává změna parametrů, neboť jsou sondy stejné, a je pouze přepojen kabel. Není tedy nutné u parametrů rozlišovat rubovou a lícovou stranu.

Tabulka 34: T 5 mm, ISL-0502, ISL-1002, ISL-0304, místo bez vady, parametry

	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP
Frekvence zesílení	4 dB	17 dB	1,2 dB
Vodní dráha	27,6 mm	64,2 mm	83,4 mm
Napětí	125 V	125 V	125 V
Rychlost šíření v materiálu	2700 m/s	2700 m/s	2700 m/s
Rychlost šíření ve vodě	1480 m/s	1480 m/s	1480 m/s

Zkoušená deska tloušťky 5 mm:

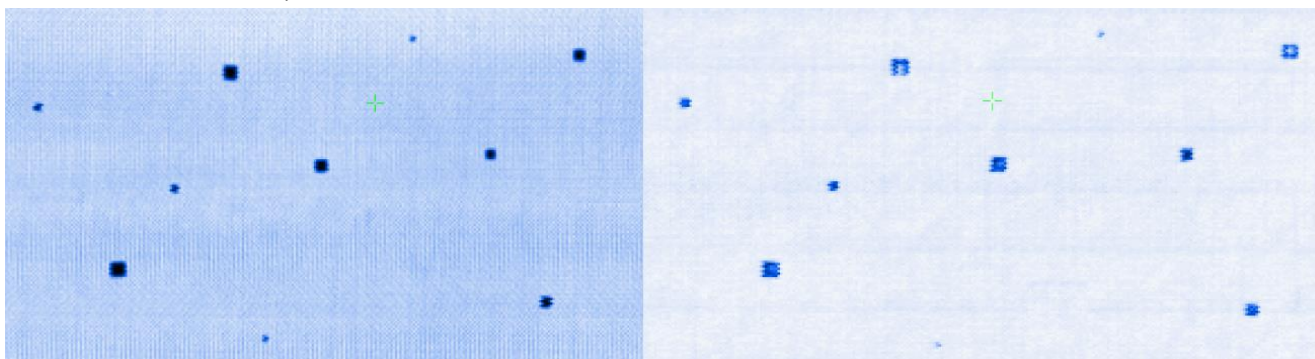


Obrázek 37: Deska T 5 mm, očíslování vad

Výsledky zkoušení

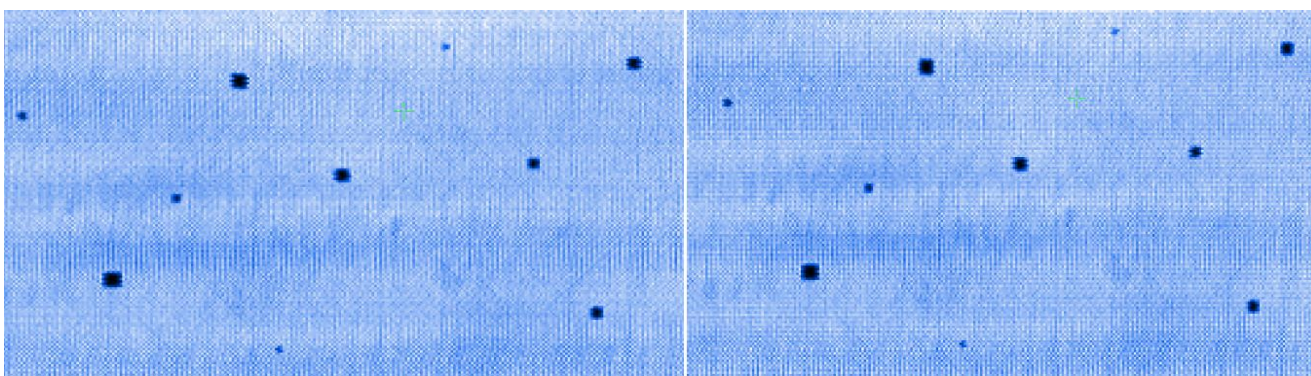
Automatická detekce umělých vad ve vzorku TTU

ISL-0502-HR – LÍC, RUB



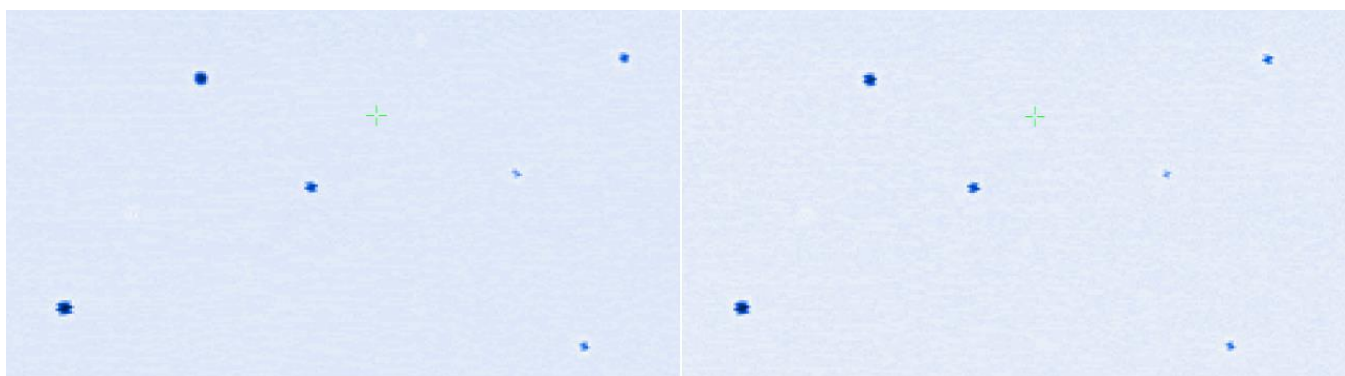
Obrázek 64: T 5 mm, lic, rub, ISL-0502, sken, průchodová brána

ISL-1002-VHR – LÍC, RUB



Obrázek 65: T 5 mm, lic, rub, ISL-1002, sken, průchodová brána

ISL-0304-CMP – LÍC, RUB



Obrázek 66: T 5 mm, lic, rub, ISL-1002, sken, průchodová brána

Rozlišitelnost indikací TTU

Tabulka 35: Rozlišitelnost indikací TTU, T 5 mm, ISL-0502

Sonda	ISL-0502-HR					
	LÍC			RUB		
Vada	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá
1	1	66	Ano	4	65	Ano
2	1	80		4	80	
3	3	38		2	38	
4	1	78		4	78	
5	3	80		2	80	
6	1	42		4	41	
7	1	78		4	78	
8	3	64		2	66	
9	3	80		2	78	
10	3	76		2	76	

Tabulka 36: Rozlišitelnost indikací TTU, T 5 mm, ISL-1002

Sonda	ISL-1002-VHR					
	LÍC			RUB		
Vada	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá
1	1	62	Ano	4	63	Ano
2	1	78		4	78	
3	3	28	Ne	2	22	Ne
4	1	79	Ano	4	79	Ano
5	3	78		2	79	
6	1	42		4	45	
7	1	78		4	78	
8	3	63		2	64	
9	3	79		2	79	
10	3	77		2	76	

Tabulka 37: Rozlišitelnost indikací TTU, T 5 mm, ISL-0304

Sonda	ISL-0304-CMP					
	LÍC			RUB		
Vada	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá
1	1	-	Ne	4	-	Ne
2	1	64	Ano	4	64	Ano
3	3	-	Ne	2	-	Ne
4	1	36	Ano	4	44	Ano
5	3	68		2	67	
6	1	-	Ne	4	-	Ne
7	1	38	Ano	4	38	Ano
8	3	-	Ne	2	-	Ne
9	3	54	Ano	2	54	Ano
10	3	26	Ne	2	27	Ne

Stabilita průchodového echa TTU

Tabulka 38: Stabilita průchodového echa TTU, T 5 mm

Sonda	Stabilita echa [%]
ISL-0502-HR	75-85
ISL-1002-VHR	71-98
ISL-0304-CMP	80-80

7.4.1 Vyhodnocení výsledků T 10 mm TTU

Tabulka 39: Vyhodnocení výsledků TTU, T 10 mm

	Kritérium	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP
Pořadí	Autodetekce	1.	1.	2.
	Rozlišitelnost	1.	2.	3.
	Stabilita	2.	3.	1.

Při automatickém skenování našly všechny vady pouze sondy ISL-0502-HR a ISL-1002-VHR. Tří megahertzová sonda nenalezla vady velikosti 3x3 a 6x6 mm. Z toho důvodu se umístila na posledním místě.

V rozlišitelnosti umělých vad pod povrchovou vrstvou byla stoprocentně úspěšná pouze sonda ISL-0502-HR. Deseti megahertzová zaznamenala nepřipustný pokles pouze v případě vady 3, která je o rozměrech 3x3 mm. Vzhledem k tomuto faktu sonda ISL-1002-VHR ještě splňuje požadavky Airbusu, který požaduje zachycení vad o nejmenší velikosti 6x6 mm. Sonda ISL-0304-CMP nebyla schopna zachytit některé vady, a tudíž je ani vyhodnotit.

Stabilita echa zde byla v případě prvních dvou sond nižší než u desky tloušťky 2 mm. Naopak sonda ISL-0304-CMP má vysokou stabilitu průchodového echa. Právě tato vysoká stabilita způsobuje přehlédnutí některých vad. Při měření desky tloušťky 10 mm se tedy zaměříme na to, zda při větším útlumu bude sonda schopna nalézt i menší vady.

V případě desky tloušťky 5 mm metodou TTU tedy doporučuji sondu ISL-0502-HR. Sonda ISL-1002-VHR je taktéž přípustná.

7.5 Deska tloušťky 10 mm TTU

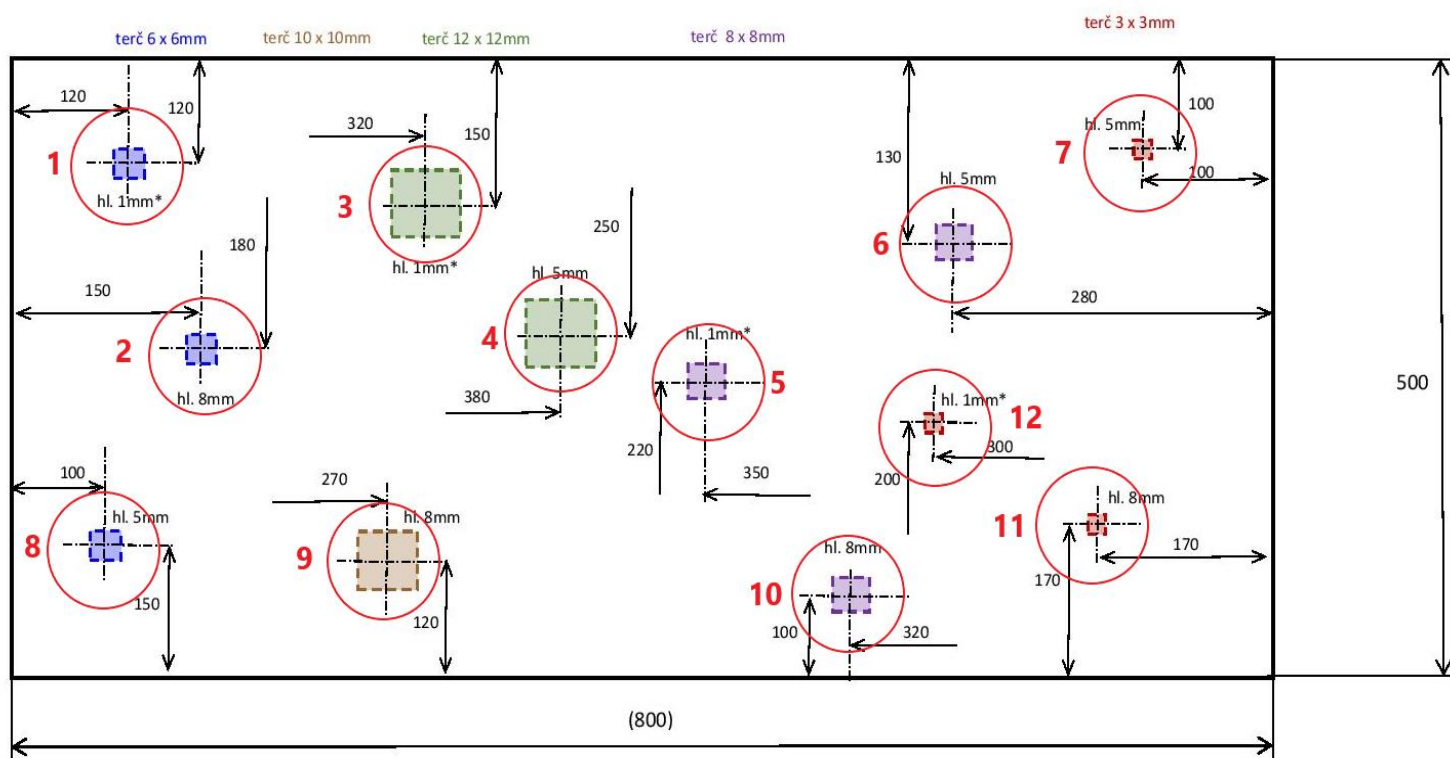
Parametry zkoušení

Stejně jako deska tloušťky 5 mm bude i tato zkoušena třemi sondami ISL-0502-HR, ISL-1002-VHR a ISL-0304-CMP. Měření bude probíhat obdobně jako pro desku 5 mm.

Tabulka 40: T 10 mm, ISL-0502, ISL-1002, ISL-0304, místo bez vady, parametry

	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP
Frekvence zesílení	8,7 dB	30 dB	1,1 dB
Vodní dráha	32,1 mm	65,8 mm	84,8 mm
Napětí	125 V	125 V	125 V
Rychlost šíření v materiálu	2700 m/s	2700 m/s	2700 m/s
Rychlost šíření ve vodě	1480 m/s	1480 m/s	1480 m/s

Zkoušená deska tloušťky 10 mm:

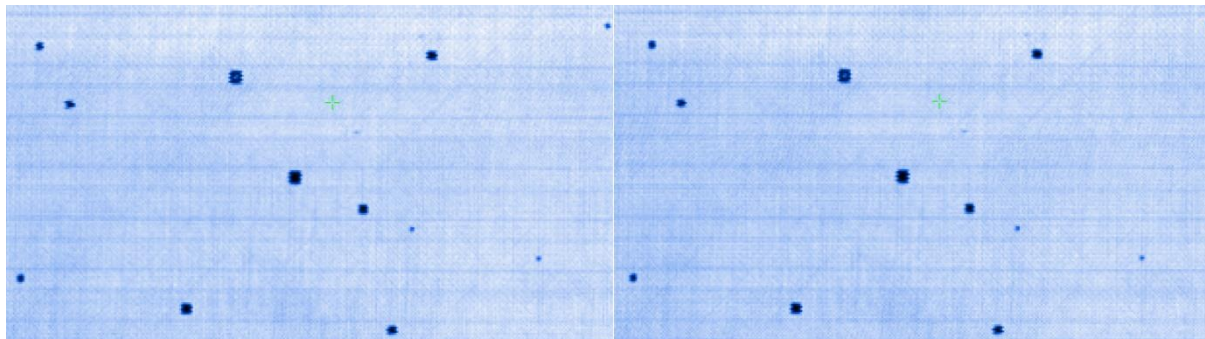


Obrázek 46: Deska T 10 mm, očíslování vad

Výsledky zkoušení

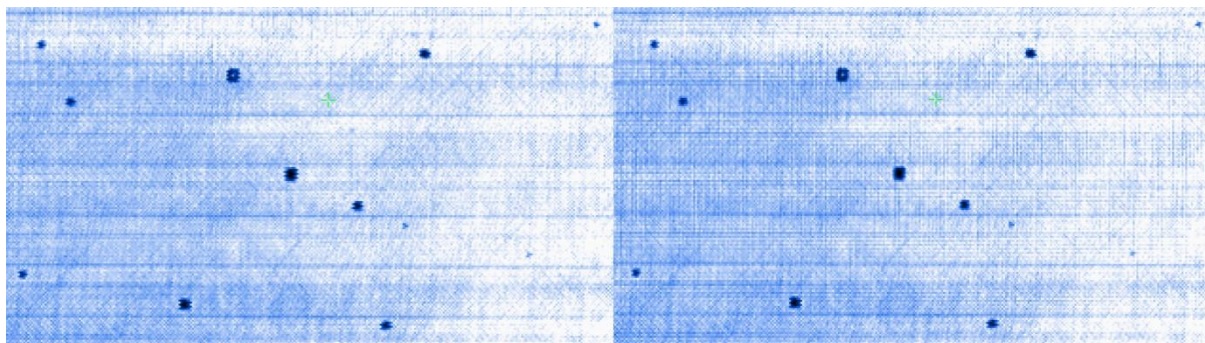
Automatická detekce umělých vad ve vzorku TTU

ISL-0502-HR – LÍC, RUB



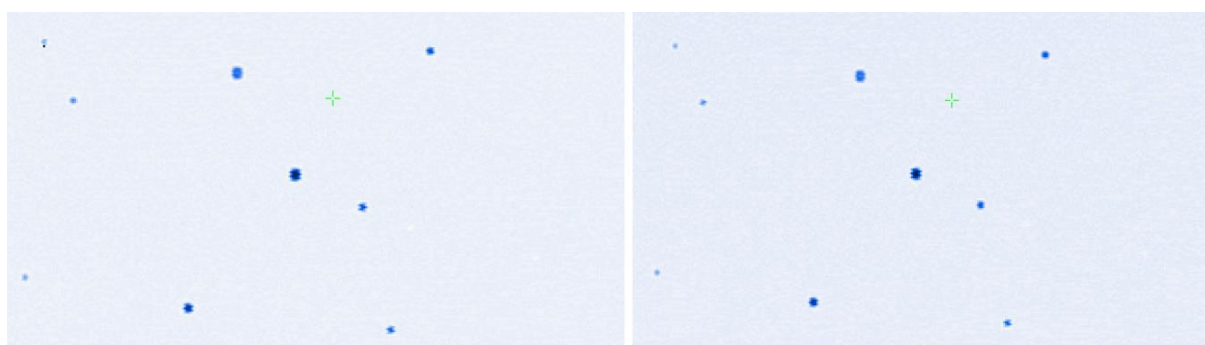
Obrázek 67: T 10 mm, lic, rub, ISL-0502, sken, průchodová brána

ISL-1002-VHR – LÍC, RUB



Obrázek 68: T 10 mm, lic, rub, ISL-1002, sken, průchodová brána

ISL-0304-CMP – LÍC, RUB



Obrázek 69: T 10 mm, lic, rub, ISL-0304, sken, průchodová brána

Rozlišitelnost indikací TTU

Tabulka 41: Rozlišitelnost indikací TTU, T 10 mm, ISL-0502

Sonda	ISL-0502-HR					
	LÍC			RUB		
Vada	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá
1	1	68	Ano	9	68	Ano
2	8	72		2	72	
3	1	70		9	70	
4	5	79		5	80	
5	1	78		9	77	
6	5	77		5	77	
7	5	48		5	50	
8	5	71		5	71	
9	8	78		2	78	
10	8	76		2	76	
11	8	39		2	40	
12	1	41		9	42	

Tabulka 42: Rozlišitelnost indikací TTU, T 10 mm, ISL-1002

Sonda	ISL-1002-VHR					
	LÍC			RUB		
Vada	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá
1	1	64	Ano	9	65	Ano
2	8	68		2	72	
3	1	68		9	66	
4	5	78		5	79	
5	1	75		9	77	
6	5	72		5	72	
7	5	40		5	40	
8	5	66		5	66	
9	8	78		2	78	
10	8	76		2	74	
11	8	15	Ne	2	16	Ne
12	1	20		9	26	

Tabulka 43: Rozlišitelnost indikací TTU, T 10 mm, ISL-0304

Sonda	ISL-0304-CMP					
	LÍC			RUB		
Vada	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá	Hloubka [mm]	Pokles [%]	Odpovídá
1	1	18	Ne	9	20	Ne
2	8	30	Ano	2	30	Ano
3	1	37		9	33	
4	5	66		5	66	
5	1	44		9	45	
6	5	47		5	45	
7	5	-	Ne	5	-	Ne
8	5	20	Ano	5	22	Ano
9	8	66		2	56	
10	8	40		2	47	
11	8	-	Ne	2	-	Ne
12	1	-	Ne	9	-	Ne

Stabilita průchodového echa TTU

Tabulka 44: Stabilita průchodového echa TTU, T 10 mm

Sonda	Stabilita echa [%]
ISL-0502-HR	75-95
ISL-1002-VHR	70-100
ISL-0304-CMP	80-80

7.5.1 Vyhodnocení výsledků T 10 mm TTU

Tabulka 45: Vyhodnocení výsledků TTU, T 10 mm

	Kritérium	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR	ISL-0304-CMP
Pořadí	Autodetekce	1.	1.	2.
	Rozlišitelnost	1.	2.	3.
	Stabilita	2.	3.	1.

Automatická detekce odhalila všechny defekty v případě pěti a deseti megahertzových sond, což je stejné jako v případě pro desku tloušťky 5 mm. Naproti tomu tři megahertzová sonda našla i vady 6x6 mm, ale 3x3 mm opět chybí. Je vidět, že s rostoucí tloušťkou materiálu se její výsledky zlepšují.

Stoprocentní rozlišitelnost měla opět pouze sonda ISL-0502-HR. Deseti megahertzová sonda si oproti desce tloušťky 5 mm připsala dva nepřijatelné poklesy, které ovšem i zde jsou pouze na vadách 3x3 mm. Tři megahertzová sonda má nepřijatelných poklesů více. Vady 3x3 mm nejde vyhodnotit, protože nedojde k poklesu a indikace 6x6 mm nemají dostatečně velký pokles, který by splňoval normu Airbus.

Stabilita echa je nejlepší u ISL-0304-CMP, kde nedochází k poklesu mimo vady skoro vůbec. Naopak nejhůře dopadla sonda ISL-1002-VHR, která zaznamenává kolísání v rozsahu minimálně 30 %. Tato hodnota může být i vyšší, neboť nad 100 % nám software neumožňuje výkyvy zaznamenávat. Přestože tedy tato sonda vyhovuje v ostatních kritériích, z tohoto důvodu bych ji z doporučených vyloučil, neboť by mohlo dojít k výkyvům, ve kterých by se mohla ztratit potenciální vada. Nižší stabilita je vidět i na záznamu automatického skenování. Stabilita sondy ISL-0502-HR dosahuje akceptovatelných hodnot.

V případě desky tloušťky 10 mm metodou TTU tedy doporučuji sondu ISL-0502-HR.

8 Shrnutí výsledků

V rámci této práce byly použity tři sondy ISL-0502-HR, ISL-1002-VHR, ISL-0304-CMP na desky tloušťky 2, 5, 10 mm. V deskách se nacházely uměle vytvořené vady o předem známé pozici a rozměrech. Cílem bylo najít optimální sondu pro každou z těchto CFRP desek, pro metody odrazu PE a průchodu TTU. Pro tyto metody byla stanovena kritéria, podle kterých budou sondy hodnoceny. Níže je uvedena tabulka výsledků měření:

Metoda odrazu PE

Tabulka 46: Doporučené sondy PE

Tloušťka desky	Doporučená sonda	
2 mm	ISL-0502-HR	
5 mm	ISL-1002-VHR	
10 mm	ISL-0304-CMP	ISL-0502-HR

U desky tloušťky 10 mm byly vybrány dvě sondy, které se navzájem doplňují. ISL-0304-CMP je nejvhodnější na účely automatického skenování a ISL-0502-HR pro manuální zkoušení podpovrchových vad, které v případě první sondy splývají se vstupním echem a nelze tedy určit některé jejich parametry.

Metoda průchodu TTU

Tabulka 47: Doporučené sondy TTU

Tloušťka desky	Doporučená sonda	Přípustná sonda
2 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR
5 mm	ISL-0502-HR	ISL-1002-VHR
10 mm	ISL-0502-HR	-

V tomto případě se jako univerzální sonda použitelná pro všechny tloušťky ukázala ISL-0502-HR. V kategorii přípustná sonda jsou zařazeny sondy, které měly sice horší výsledky, ale stále splňují požadavky Airbusu a lze je tedy také použít.

Metoda odrazu PE a průchodu TTU

Metoda TTU je jednodušší na správné nastavení, a proto je vhodná pro rychlou kontrolu zkoušeného dílu. Sken nám poskytuje informace o umístění vady, její přibližné velikosti. Neumožňuje nám však zjistit její hloubku. Charakter každého dílu také neumožňuje umístit dvě sondy tímto způsobem.

Metoda PE je složitější na nastavení a doporučoval bych ji zařadit až po kontrole TTU. Při správném nastavení programu však umožní určování přesných rozměrů vad a určení hloubky, ve které se nachází.

Tato data budou základem pro další vývoj softwaru společnosti ATG s.r.o., který bude schopen po nahrání odpovídajícího konfiguračního souboru samostatně vyhodnotit všechny parametry, kterými jsem se v této práci zabýval. To přinese operátorům značnou časovou úsporu. V další části vývoje se data přenesou z imerzního systému na ostřikový a finálním krokem bude aplikace poznatků na robotické systémy, které budou schopny kontrolovat i zakřivené díly. Základem všech těchto systémů ale vždy bude správně zvolená sonda.

Závěr

V teoretické části diplomové práce jsem zpracoval téma ultrazvukového měření. Zařadil jsem ho mezi ostatní NDT metody a určil, jaké defekty můžeme s jeho pomocí nalézt. Pokračoval jsem rozbořem jeho fyzikální podstaty. Zde jsem se zaměřil na způsob vzniku vln, jejich rozdělení a šíření. Rozebral jsem spojitost mezi akustickým tlakem a odhalením indikace, stejně jako prostředí, ve kterém může měření probíhat. V teorii jsem také popsal jednotlivé druhy sond, včetně jejich základních částí. Pokračoval jsem základními metodami zkoušení, které byly použity v experimentální části. Následuje rozbor zkoušeného materiálu, kterým jsou CFRP kompozity. Zpracoval jsem jejich výrobu, vlastnosti a využití v leteckém průmyslu na konkrétních příkladech. V poslední části jsem uvedl výběr z požadavků na ultrazvukové zkoušení vycházející z předpisů firmy Airbus S.A.S. Zaměřil jsem se na výrobu kompozitních desek pro testování nových systémů, automatické ultrazvukové testování a metody PE a TTU.

V praktické části jsem navrhl vlastní experiment, vyhodnocení optimální sondy pro různé tloušťky CFRP desek, v souladu s předpisy firmy Airbus S.A.S. Definoval jsem podmínky, za kterých zkoušení probíhalo. Popsal jsem použité sondy a zkoušené desky. Určil parametry automatického skenování. Důležitým bodem bylo zvolení kritérií pro hodnocení metod PE a TTU. Jako první proběhlo zkoušení metodou PE. Detailně jsem popsal průběh měření, stejně jako nastavení stroje. Ukázalo se, že deska tloušťky 2 mm se při rychlém pohybu skenování rozvlní a bylo nutné rychlost snížit. Nakonec jsem vyhodnotil zjištěná data a doporučil optimální sondu pro každou tloušťku desky. Druhou použitou metodou byl průchod. Měření bylo rychlejší, jednodušší na nastavení, ale neumožňovalo zjištění některých parametrů, jakým je například hloubka, ve které se indikace nachází. Popsal jsem způsob zkoušení, nastavení systému, vyhodnotil data a doporučil sondu. V poslední kapitole jsem výsledky obou metod přehledně uvedl do tabulky a okomentoval. Do přílohy jsem umístil naměřená data. Výsledky této práce budou použity ve společnosti ATG s.r.o. pro navazující výzkum.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Jandura, V.; Zavadil, T. *NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ ZÁKLADNÍ KURZ*; ATG s.r.o.: Praha, 2020.
- [2] Matoušek, Jakub. *Nedestruktivní defektoskopie*, [online]. Copyright © [cit. 15.11.2021]. Dostupné z: <http://www.matousekhk.cz/et.html>
- [3] Žbánek, P.; Blahušek, J.; Matoušek, J.; Zavadil, T. *ULTRAZVUKOVÁ METODA STUPEŇ I, II*; ATG s.r.o.: Praha, 2017.
- [4] *NON-DESTRUCTIVE TESTING: Ultrasonic Testing* [online]. In. [cit. 03.01.2022]. Dostupné z: http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html
- [5] ASNT Level III Study Guide: Ultrasonic Method (UT), Second Edition. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, [2013]. ISBN 9781571173096.
- [6] Kmitání [online]. Copyright © [cit. 11.03.2022]. Dostupné z: <https://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/BF/ohlidal/Kmitani.pdf>
- [7] *Tlumená a netlumená vlna ELUC*. ELUC [online]. [cit. 29.12.2021] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1657>
- [8] Rudolf Mentzl: *Když se třese ionosféra. Aldebaran homepage* [online]. Copyright © Copyright Aldebaran Group for Astrophysics [cit. 01.02.2022]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2020_02_ion.php
- [9] ASNT Level II Study Guide: Ultrasonic Method (UT), Third Edition. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, [2016]. ISBN 9781571173676.
- [10] *Princip metody a využití ultrazvukového vlnění* [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 01.04.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/105508053-Princip-metody-spojiva-ve-vyuziti-ultrazvukoveho-vlneni-resp-jeho-odrazu-od-plosnych-necelistvosti.html>
- [11] *Zákon odrazu* [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 15.04.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11940287-Zakon-odrazu-uhel-odrazu-je-roven-uhlu-dopadu-pricemz-odrazene-paprsky-zustavaji-v-rovine-dopadu.html>
- [12] NAVRÁTIL, L. a J. ROSINA, et al. *Medicínská biofyzika*. 2. vydání. Praha: Grada, 2005. ISBN 978-80-247-1152-2.
- [13] *Zákon odrazu* [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 15.04.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11940287-Zakon-odrazu-uhel-odrazu-je-roven-uhlu-dopadu-pricemz-odrazene-paprsky-zustavaji-v-rovine-dopadu.html>
- [14] *Lékařská fakulta Masarykovy univerzity | MED MUNI* [online]. Copyright © [cit. 24.04.2022]. Dostupné z: <https://www.med.muni.cz/biofyz/zobrazovacimetody/files/Ultrazvuk.pdf>
- [15] *Concave Lens - Stock snímky, obrázky a fotky - iStock*. [online]. Copyright © 2022 [cit. 24.04.2022]. Dostupné z: <https://www.istockphoto.com/cs/fotky/concave-lens>
- [16] Hill CR, Bamber JC, ter Haar GR. *Physical principles of medical ultrasonics*. Chichester: Wiley; [2004]. ISBN: 978-0-471-97002-6

- [17] Kremkau FW. *Diagnostic ultrasound: principles, instrumentation and exercises*. 7th edn. Philadelphia: Saunder; [2006].
- [18] ČSN EN ISO 5577 (015005) *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení ultrazvukem* [2018].
- [19] B.W. Maxfield and Z. Wang, 2018, *Electromagnetic Acoustic Transducers for Nondestructive Evaluation*, in *ASM Handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation of Materials*, ed. A. Ahmad and L. J. Bond, ASM International, Materials Park, OH, pp. 214–237.
- [20] *ULTRASONIC PROBE CONSTRUCTION: Compression Probes, Single crystal, Twin crystal, Cross-talk, Ultrasonic thickness measurement ~ MECHTECH GURU*. MECHTECH GURU [online]. [cit. 18.02.2022] Dostupné z: <https://www.mechtechguru.com/2020/08/ultrasonic-probe-construction.html>
- [21] *What is Ultrasonic Testing - Pulse-Echo Method - Definition | Material Properties*. Material Properties | Website about Elements and Materials [online]. [cit. 20.02.2022] Dostupné z: <https://material-properties.org/what-is-ultrasonic-testing-pulse-echo-method-definition/>
- [22] *Simple Guy, Simple Thoughts: Ultrasonic Testing - Probe Systems (Theory)*.Simple Guy, Simple Thoughts [online]. [cit. 21.02.2022] Dostupné z: <http://abloggermind.blogspot.com/2011/09/ultrasonic-testing-probe-systems-theory.html>
- [23] *Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging* [online]. [cit. 21.02.2022] Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.3.1.2.pdf>
- [24] Mazumdar, S.K.: *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. CRC press, Taylor Francis Group (2001) ISBN 9780849305856
- [25] Ashby, M.F., et al.: *Engineering materials and processes desk reference*. Butter worth-Heinemann, USA (2009) ISBN 978-1856175869
- [26] Schwartz, M.: *Encyclopedia of smart Materials Set, 1st edn, p.2259*. Wiley-interscience (2001) ISBN 978-0-471-17780-7
- [27] Karnik, S.R., et al.: *Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model*. *Mater. Des.*, 1768-1776 (2008) ISSN 0261-3069
- [28] Morgan, P.: *Carbon Fibers and Their Composites*. CRC PRESS, Boca Raton, FL, USA (2005) ISBN 9780429116827
- [29] Chawla, K.K.: *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer Science Business Media, New York (2012) ISBN 978-0-387-74364-6
- [30] *What are composites* [online]. [cit. 18.11.2021] Dostupné z: <https://discovercomposites.com/what-are-composites/>
- [31] GURIT. *Guide to composites* [online]. [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <http://gurit.com/>
- [32] Soutis, C.: *Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction*. *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.* (2005), ISSN 171-176
- [33] *Handbook- AirFrame*, A.M.: *Aviation Maintenance Technician Handbook*. FFA:1 Oklahoma City, USA. [online]. [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: www.faa.gov

[34] Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Materials, Their Characteristic Properties, Industrial Application Areas and Their Machinability. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 2019, Kauno Technologijos Universitetas. All rights reserved. [cit. 28.02.2022]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/339718199_Carbon_Fiber_Reinforced_Polymer_CFRP_Composite_Materials_Their_Characteristic_Properties_Industrial_Application_Areas_and_Their_Machinability

[35] B-2: The Stealth Bomber Built for a War with Russia or China - 19FortyFive. 19FortyFive: Military, Defense, National Security News and Analysis [online]. Copyright © 2022 19FortyFive. [cit. 17.06.2022]. Dostupné z: <https://www.19fortyfive.com/2021/10/b-2-the-stealth-bomber-built-for-a-war-with-russia-or-china/>

[36] Airbus. *Manufacture of Structural Fiber-reinforced Plastic (FRP) Components, General.* (2012), Certifikovaná metodika, číslo předpisu: 80-T-31-2910

[37] Airbus Test Method For Inspection Processes Non Destructive Inspection of Composite Parts. (2015), Certifikovaná metodika, číslo předpisu: AITM6-0011

[38] Airbus Test Method For Inspection Processes Reference standards for non-destructive inspection methods on fibre composites. (2014), Certifikovaná metodika, číslo předpisu: AITM6-0012

[39] Airbus Test Method For Inspection Processes Evaluation of conventional ultrasonic inspection facilities, equipment and probes. (2014), Certifikovaná metodika, číslo předpisu: AITM6-0013

[40] Airbus Test Method For Inspection Processes Ultrasonic pulse-echo inspection of carbon fibre plastics (2012), Certifikovaná metodika, číslo předpisu: AITM6-4005

[41] Airbus Test Method For Inspection Processes Ultrasonic through transmission inspection of fibre plastics (2013), Certifikovaná metodika, číslo předpisu: AITM6-4002

Přílohy

Přílohy obsahují A-scany z metody PE a TTU. Záznamy jsou ve stejném pořadí, v jakém se vyskytují v práci. Vady jsou očíslovány vždy v levém horním rohu. Pokud je to nutné, bude u čísla vady také uvedeno, zda se jedná o rubovou R, nebo lícovou L, stranu desky.

Seznam příloh

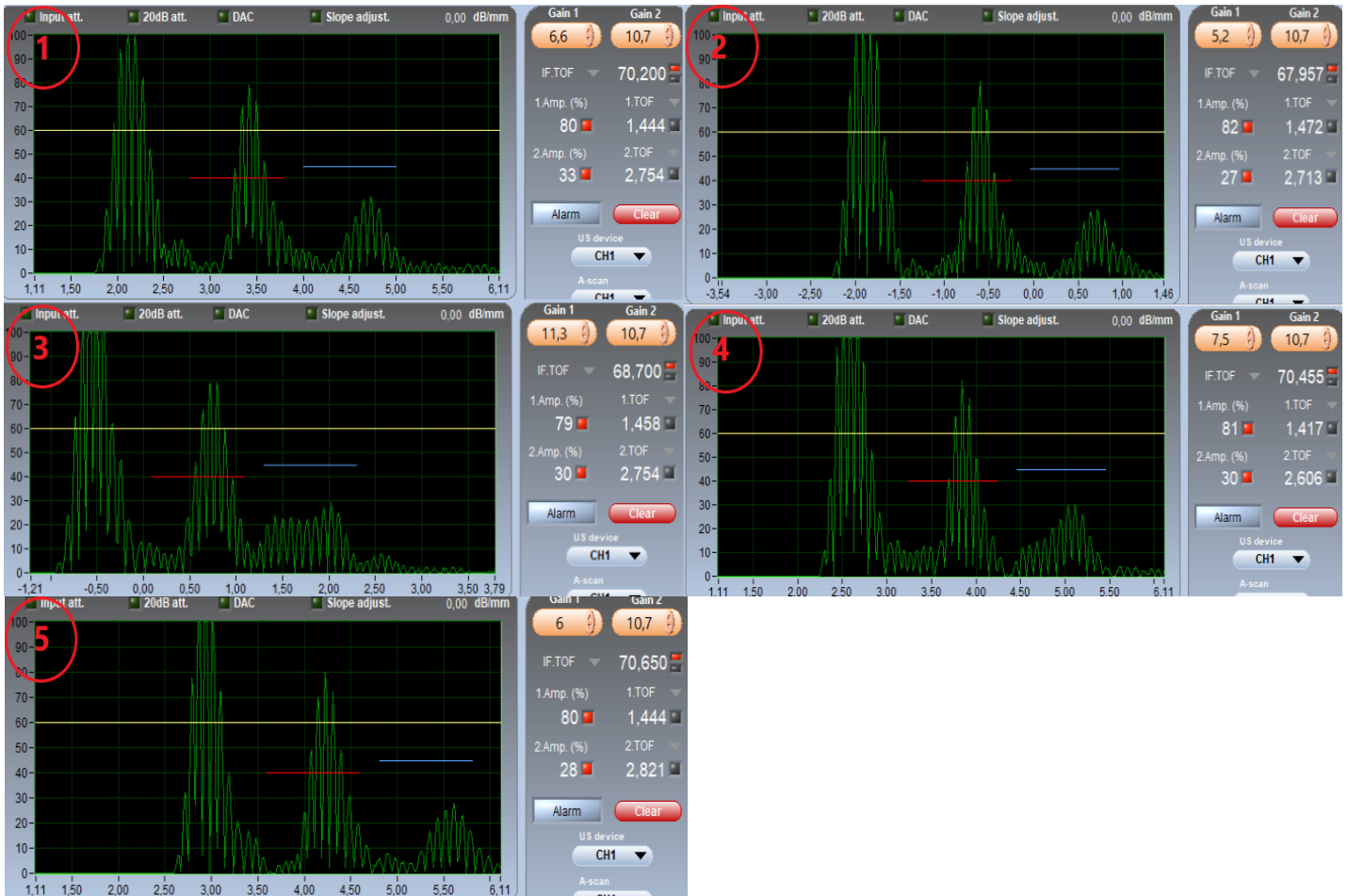
Příloha A PE	102
T 2 mm PE	102
ISL-0502-HR	102
ISL-1002-VHR	103
T 5 mm PE	104
ISL-0502-HR	104
ISL-1002-VHR	106
T 10 mm PE	108
ISL-0502-HR	108
ISL-1002-VHR	110
ISL-0304-CMP	112
Příloha B TTU	115
T 2 mm TTU	115
ISL-0502-HR	115
ISL-1002-VHR	116
T 5 mm TTU	117
ISL-0502-HR	117
ISL-1002-VHR	119
ISL-0304-CMP	121
T 10 mm TTU	122
ISL-0502-HR	122
ISL-1002-VHR	124
ISL-0304-CMP	126

T 2 mm PE
ISL-0502-HR



Příloha A PE: T 2 mm PE, ISL-0502-HR

ISL-1002-VHR



Příloha A PE: T 2 mm PE, ISL-1002-VHR

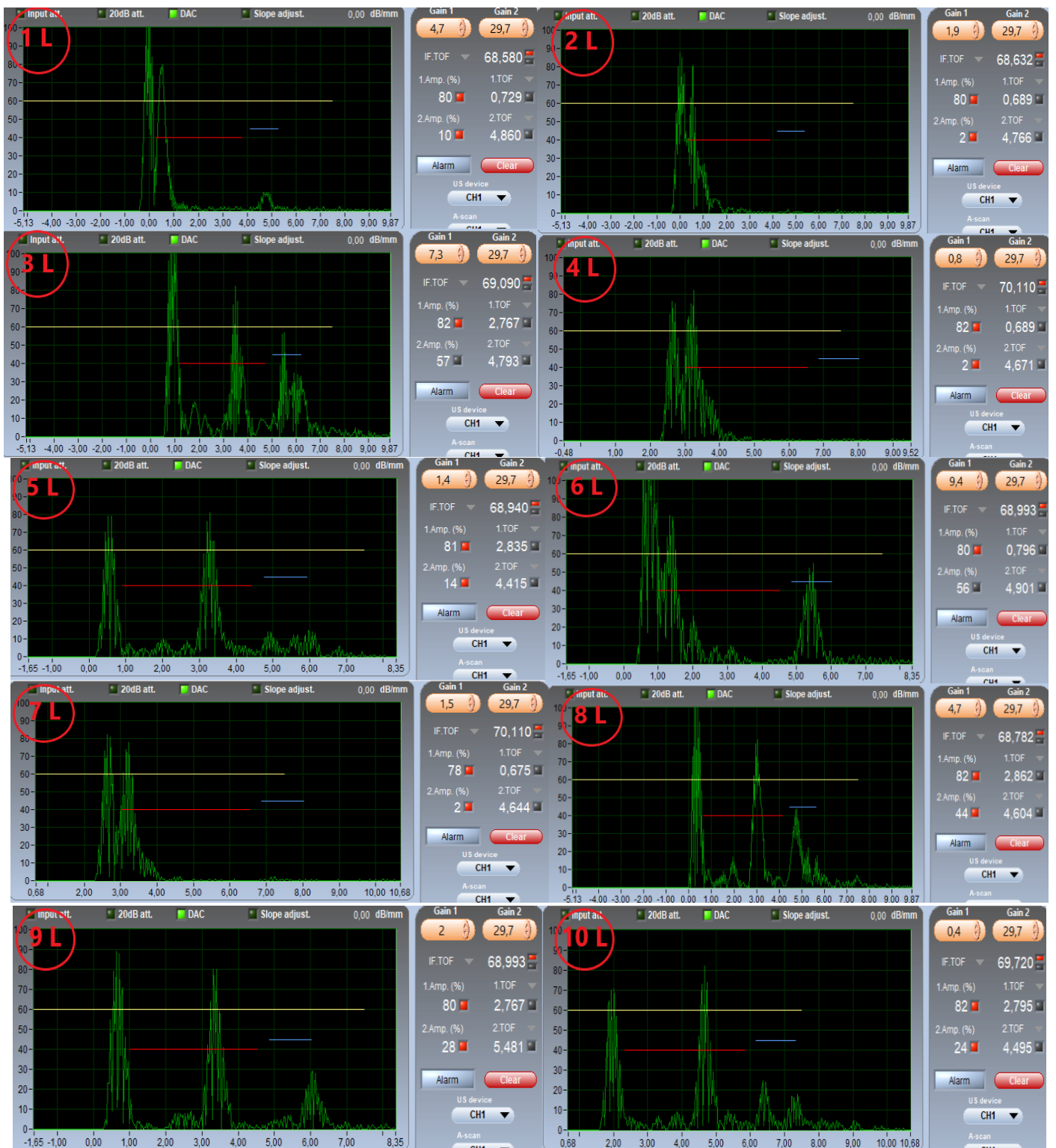
T 5 mm PE
ISL-0502-HR

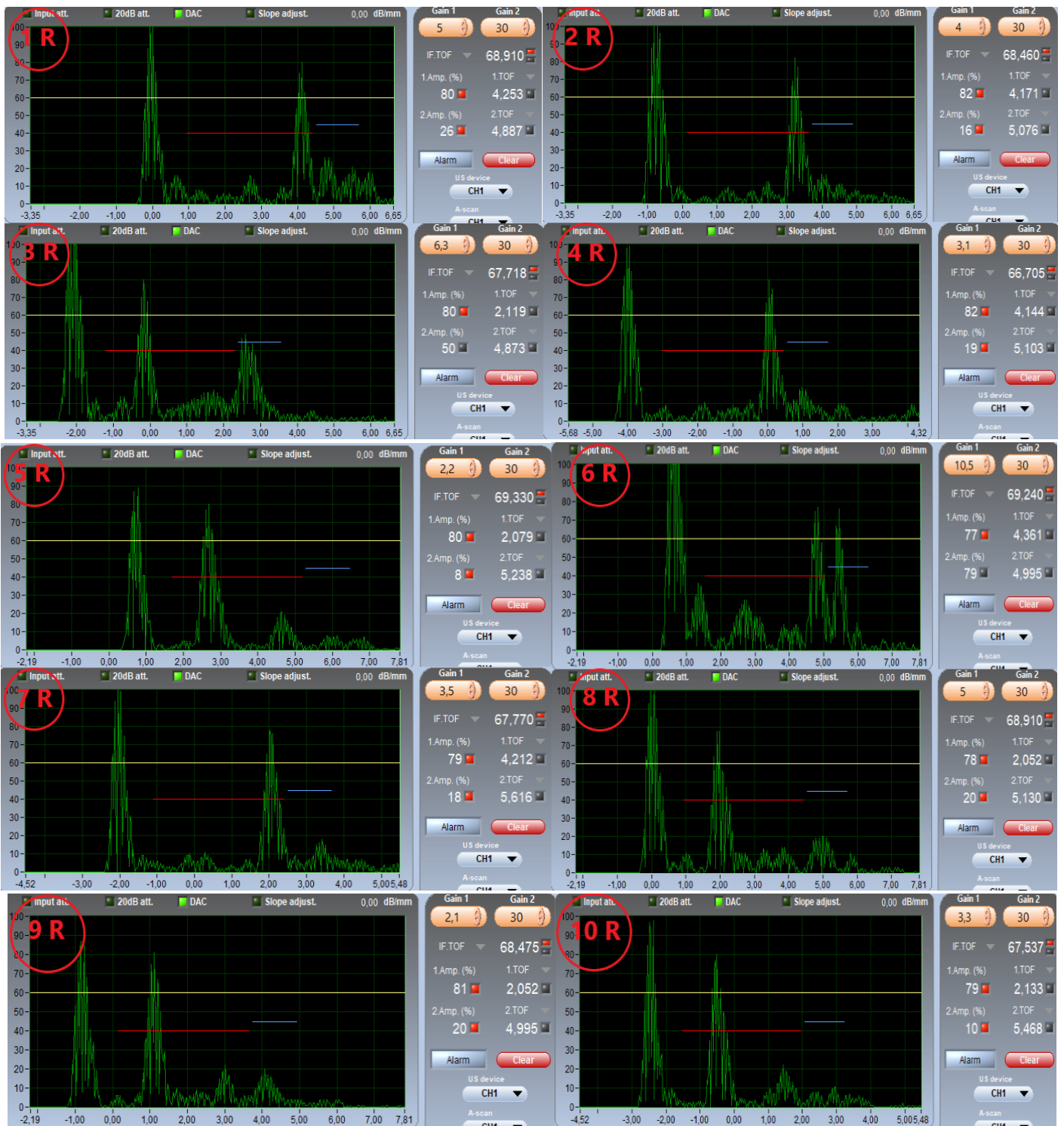




Příloha A PE: T 5 mm PE, ISL-0502-HR

ISL-1002-VHR



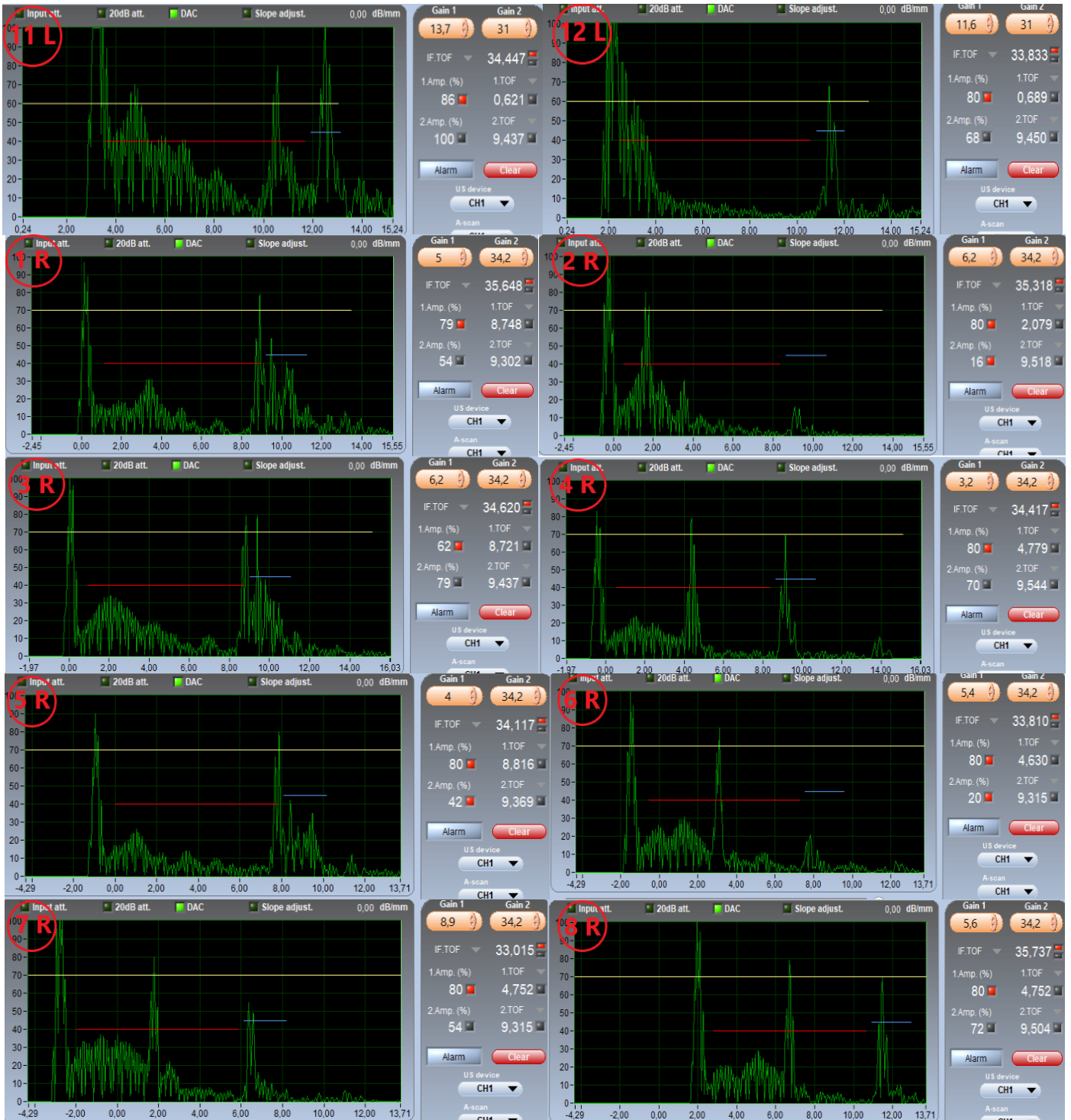


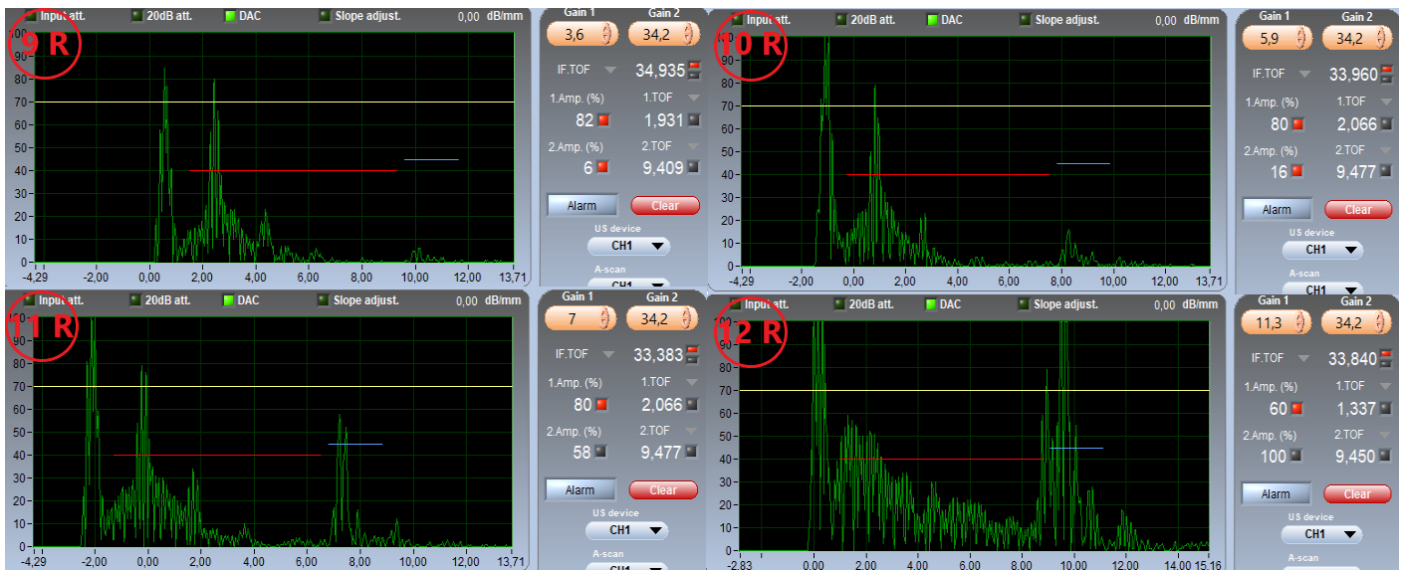
Příloha A PE: T 5 mm PE, ISL-1002-VHR

T 10 mm PE

ISL-0502-HR



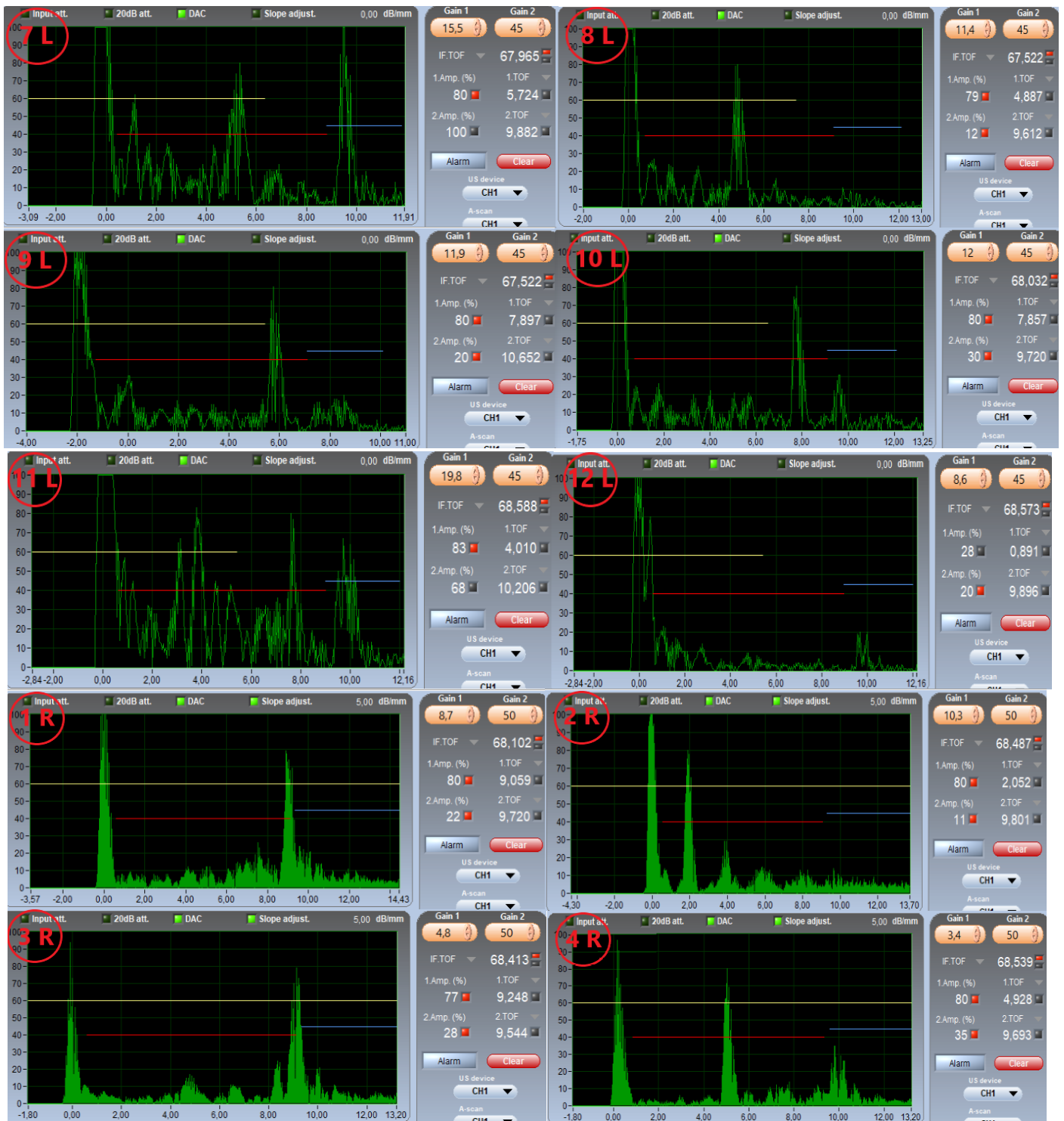




Příloha A PE: T 10 mm PE, ISL-0502-HR

ISL-1002-VHR

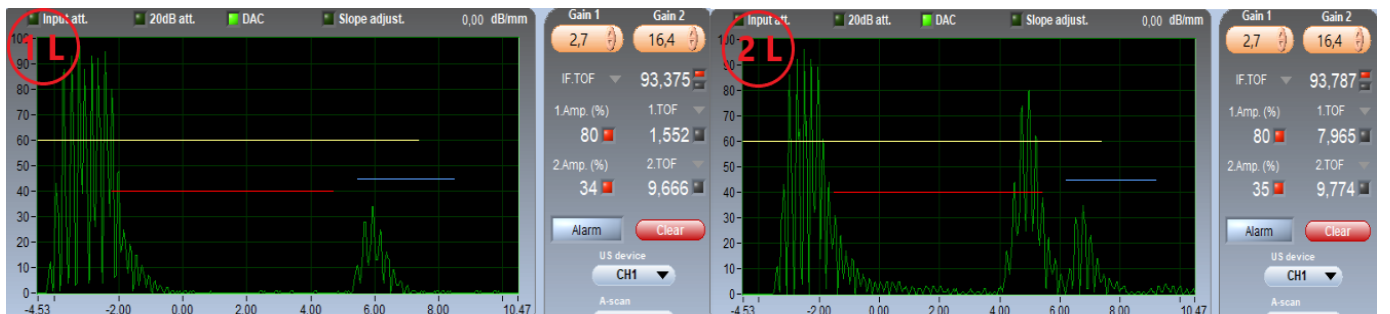


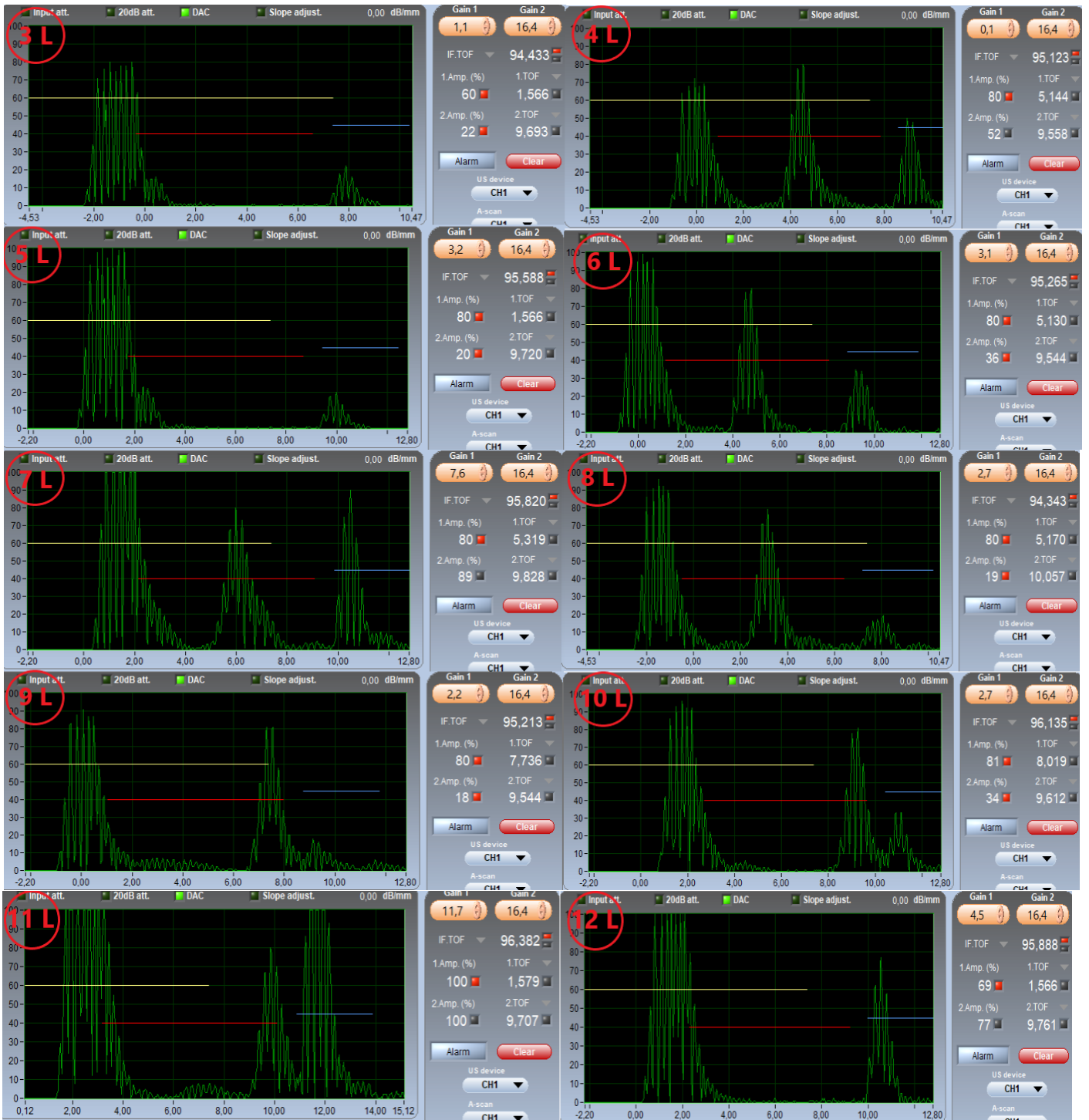


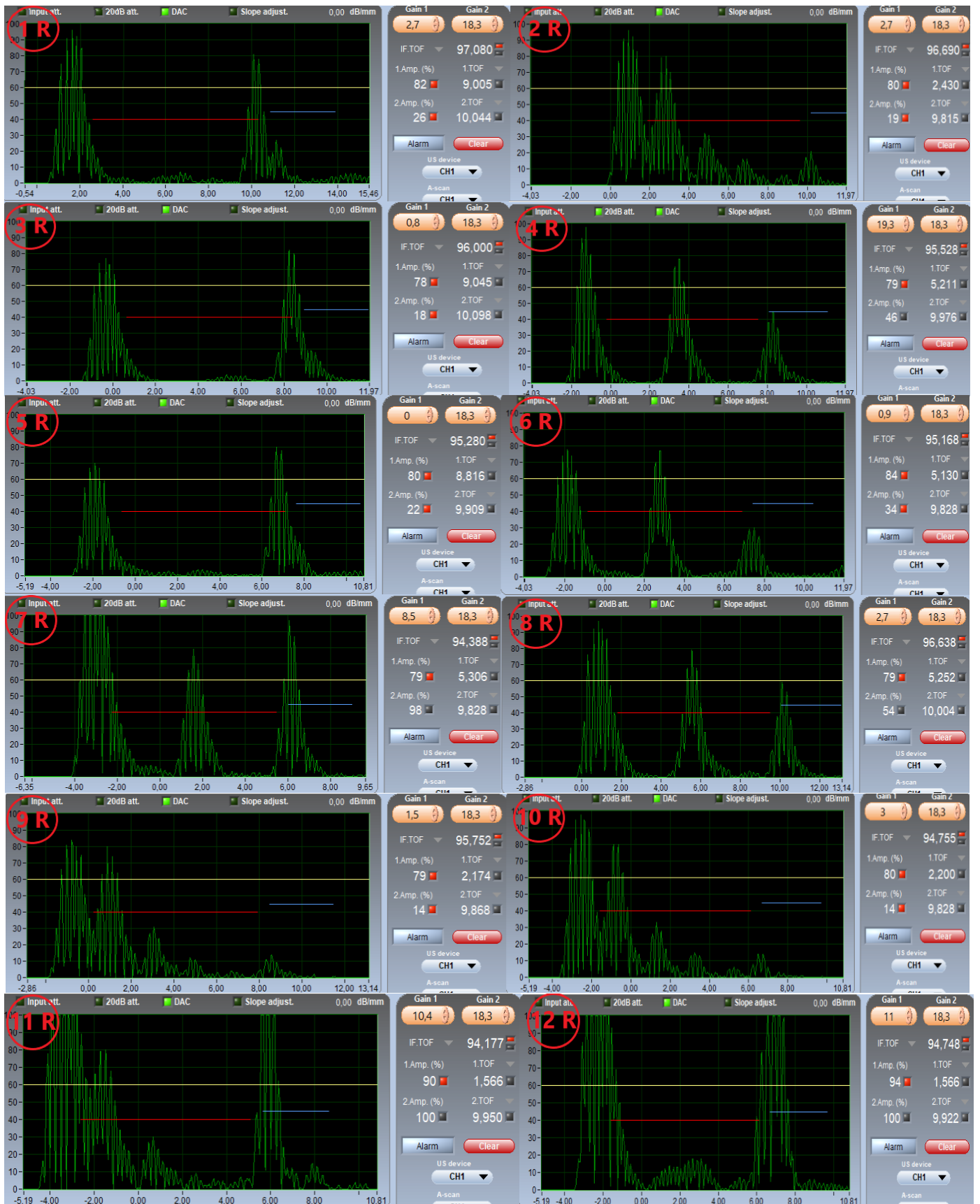


Příloha A PE: T 10 mm PE, ISL-1002-VHR

ISL-0304-CMP







Příloha A PE: T 10 mm PE, ISL-0304-CMP

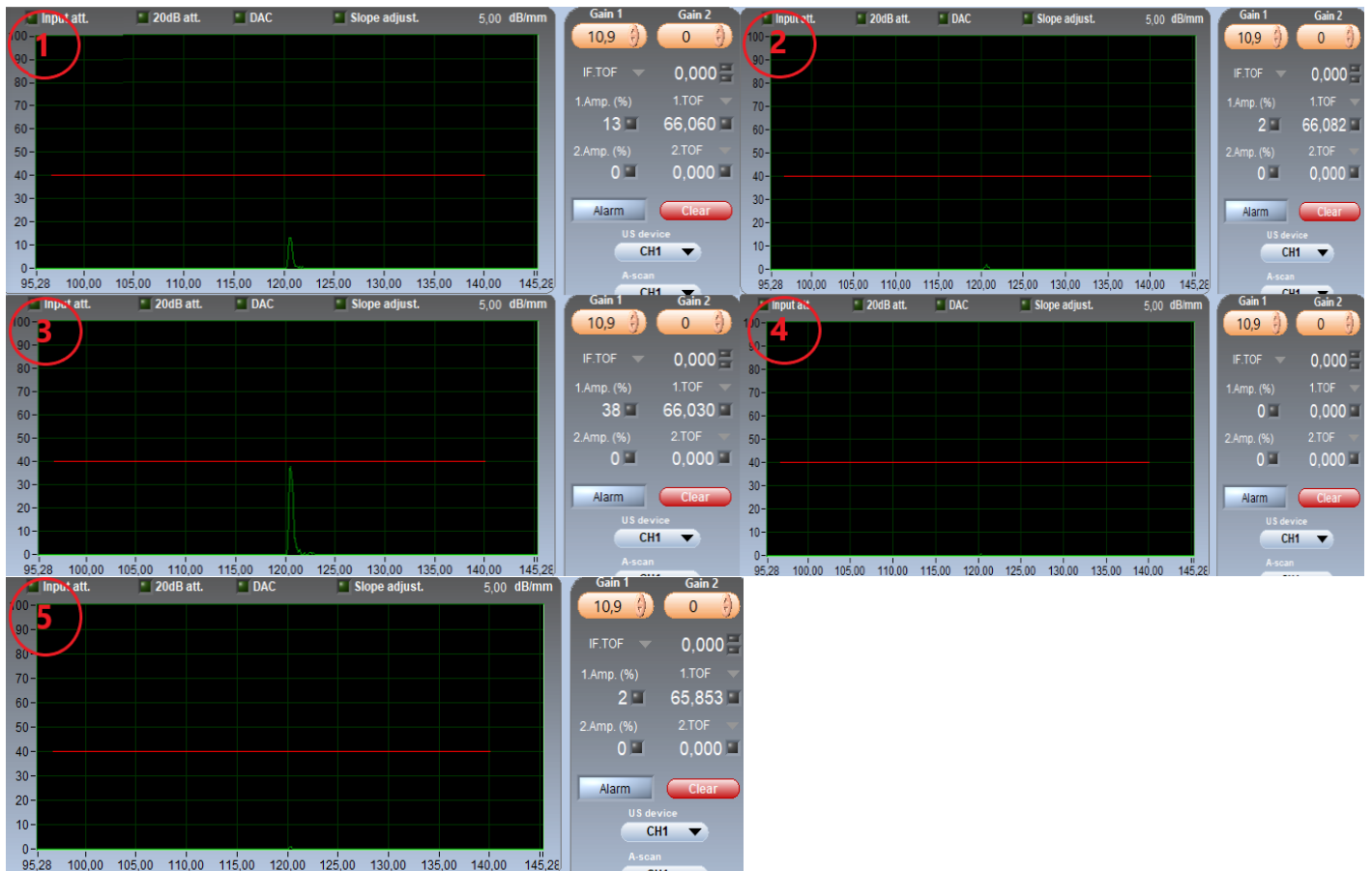
T 2 mm TTU

ISL-0502-HR



Příloha B TTU: T 2 mm TTU, ISL-0502-HR

ISL-1002-VHR



Příloha B TTU: T 10 mm TTU, ISL-1002-VHR

T 5 mm TTU

ISL-0502-HR





Příloha B TTU: T 5 mm TTU, ISL-0502-HR

ISL-1002-VHR





Příloha B TTU: T 5 mm TTU, ISL-1002-VHR

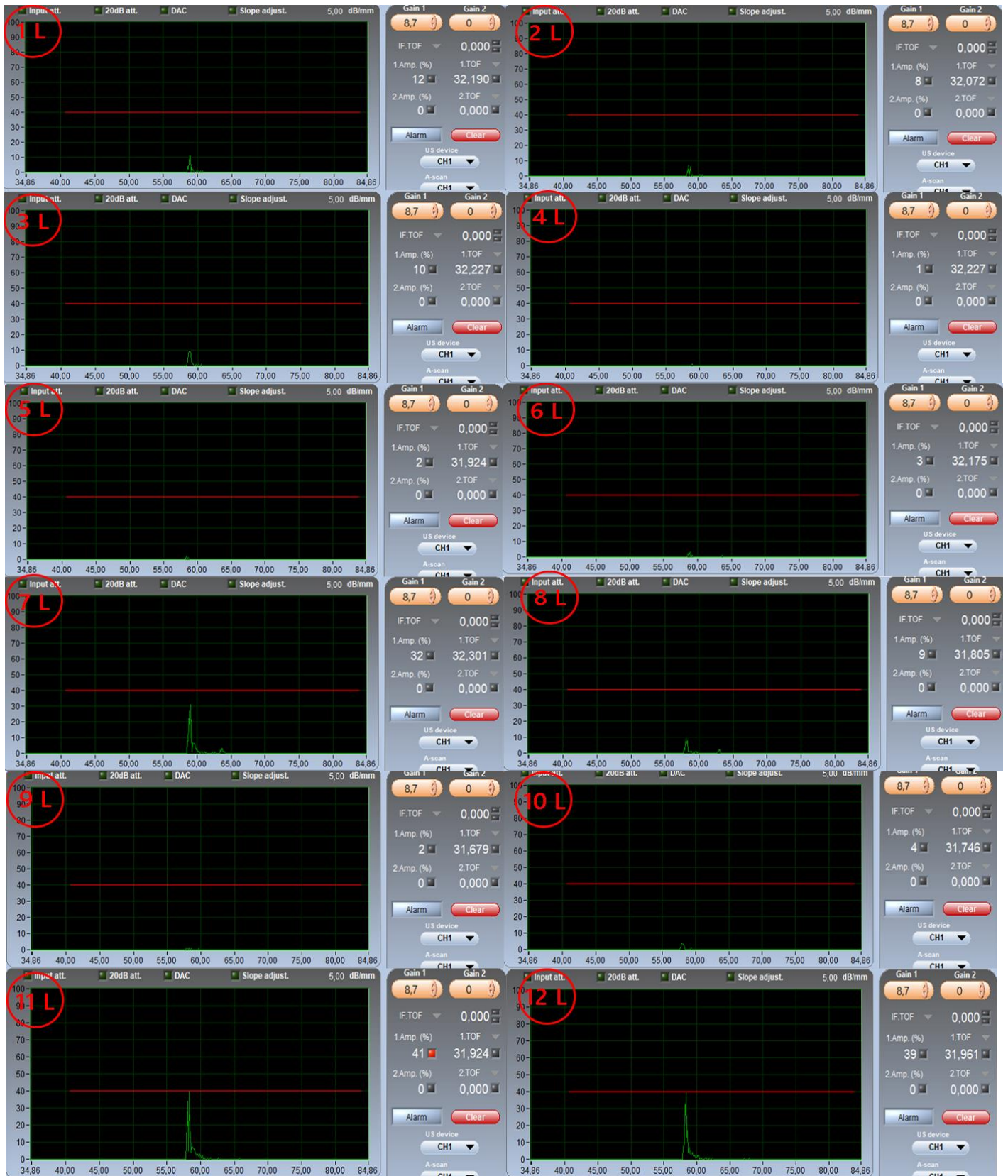
ISL-0304-CMP



Příloha B TTU: T 5 mm TTU, ISL-0304-CMP

T 10 mm TTU

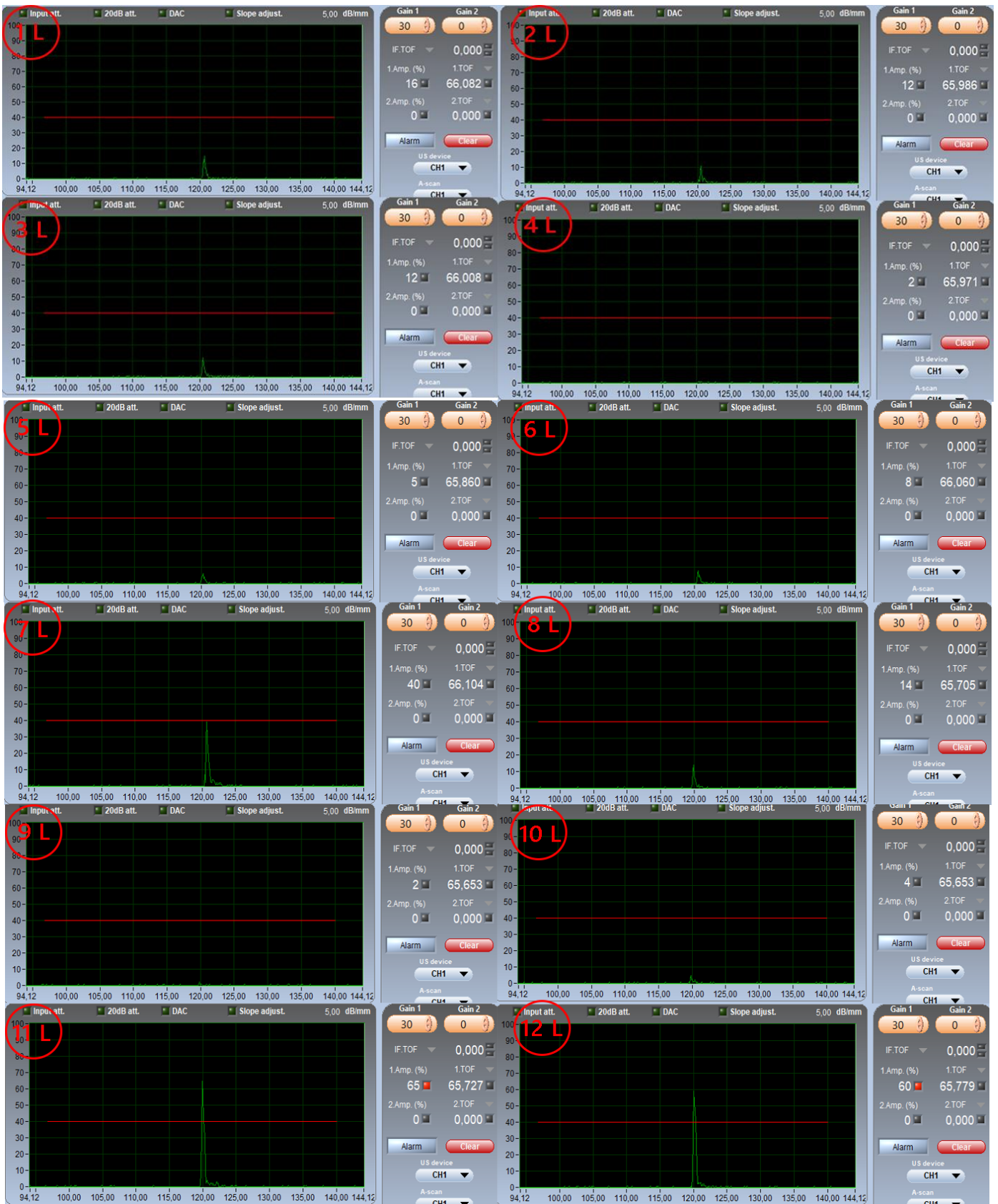
ISL-0502-HR

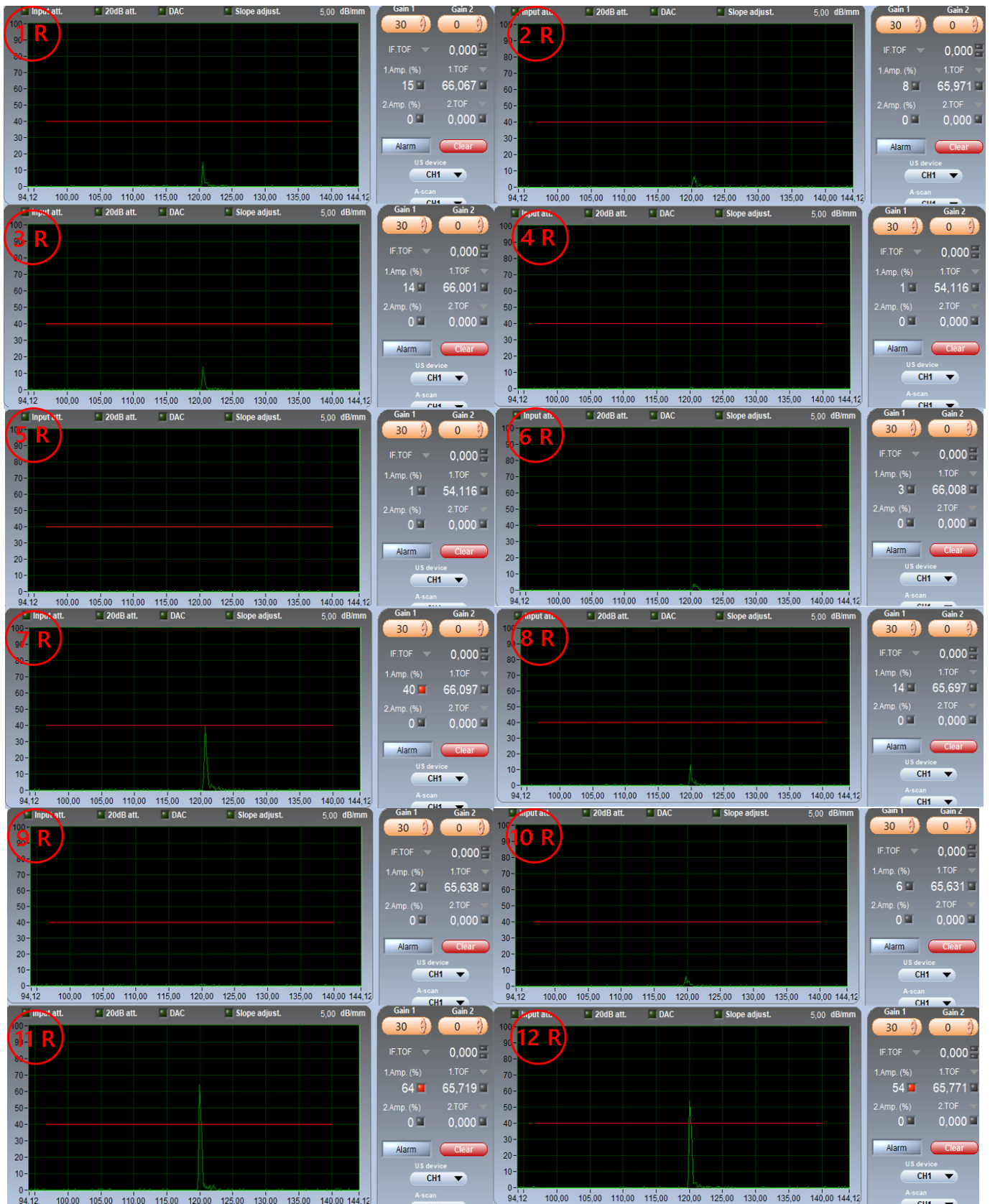




Příloha B TTU: T 10 mm TTU, ISL-0502-HR

ISL-1002-VHR





Příloha B TTU: T 10 mm TTU, ISL-1002-VHR

ISL-0304-CMP





Příloha B TTU: T 10 mm TTU, ISL-0304-CMP