



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**NÁVRH SONDY VÍŘIVÝCH PROUDŮ A JEJÍ  
APLIKACE PRO ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH  
LETECKÝCH KONSTRUKCÍ**

EDDY CURRENT PROBE DESIGN AND ITS APPLICATION ON AIRCRAFT COMPOSITE STRUCTURES

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Marie Boháčová

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

BRNO 2017

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala zejména společnosti INDETEC ndt, s.r.o., která mi poskytla mnoho cenných informací a know-how v oblasti návrhu snímačů vířivých proudů. Také můj dík patří společnostem Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. a LATECOERE Czech Republic s.r.o., které mi ochotně poskytly kompozitní vzorky. Dále bych ráda poděkovala svému školiteli doc. Pavlu Mazalovi za podporu během doktorského studia. A v neposlední řadě děkuji mé rodině, bez které bych tuto práci jen těžko dokončila.

## **PROHLÁŠENÍ O SAMOSTATNOSTI**

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracovala samostatně na základě uvedené literatury a poskytnutých cenných informací.

V Brně dne 23. 8. 2016

.....  
Marie Boháčová

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BOHÁČOVÁ, M. *Návrh sondy vířivých proudů a její aplikace pro zkoušení kompozitních leteckých konstrukcí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 100 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

## **ABSTRAKT**

Tato disertační práce se zabývá návrhem snímače vířivých proudů, který umožní nedestruktivní kontrolu leteckých kompozitních konstrukcí, zejména plastů vyztužených uhlíkovými vlákny (CFRP), v oblastech výroby a údržby letadel. Návrh snímače vycházel z analyticko-experimentálního přístupu, přičemž jeho elektrické a mechanické parametry byly optimalizovány k zajištění dobrého poměru užitečného signálu k šumu na šesti kompozitních vzorcích. Tyto vzorky obsahují umělé nespojitosti v podobě různých typů vad, simulující různé druhy poškození leteckých konstrukcí, zejména delaminace či změn tloušťky kompozitních materiálů. Byla realizována experimentální měření, sběr dat a jejich následné vyhodnocení. Výsledkem této práce je funkční snímač vířivých proudů, schopný spolehlivě odhalit poškození uhlíkových kompozitních konstrukcí do hloubky materiálu 3,9 mm.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Kompozitní materiál, CFRP, vířivé proudy, NDT, návrh snímače, poškození

## **ABSTRACT**

This thesis deals with design of an eddy current transducer which enables non-destructive inspection of composite aircraft structures primarily carbon fiber reinforced plastic (CFRP) in areas of manufacture and maintenance. The design of the transducer is based on analytical-experimental approach and its electrical and mechanical parameters were optimized to ensure a good signal to noise ratio at the six composite samples. These samples contain artificial discontinuities in the form of various types of defects. These defects are simulating the various types of damage created in the aircraft structure, especially delamination or thickness changes of composite materials. The experimental measurements, data collection and non-destructive evaluation were performed during the period. The result of this work is functional eddy current probe, which is reliably able to detect some damage of the carbon composite structures to the depth of 3,9 mm.

## **KEYWORDS:**

Composite structure, CFRP, eddy current, NDT, probe design, damage

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH V LETECTVÍ</b> .....	<b>8</b>
2.1	Vlastnosti a struktura kompozitních materiálů pro letecké konstrukce .....	8
2.1.1	<i>Základní rozdělení kompozitních materiálů</i> .....	8
2.1.2	<i>Vláknové kompozity</i> .....	9
2.1.3	<i>Uhlíková vlákna</i> .....	10
2.1.4	<i>Kompozity s epoxidovou matricí vyztuženou uhlíkovými vlákny (CFRP)</i> .....	12
2.1.5	<i>Strukturní kompozity</i> .....	12
2.2	Druhy nespojitostí u kompozitních materiálů .....	14
2.2.1	<i>Nespojitosti v kompozitních materiálech</i> .....	14
2.2.2	<i>Nespojitosti lepených spojů</i> .....	16
<b>3</b>	<b>METODA VÍŘIVÝCH PROUDŮ PRO KONTROLU LETECKÝCH KONSTRUKCÍ</b> .....	<b>17</b>
3.1	Úvod do metody vířivých proudů (ECT) .....	17
3.2	Aplikace metody vířivých proudů u leteckých hliníkových konstrukcí .....	20
3.2.1	<i>Detekce povrchových nespojitostí</i> .....	20
3.2.2	<i>Detekce podpovrchových nespojitostí</i> .....	22
3.2.3	<i>Kontrola otvorů spojů</i> .....	24
3.2.4	<i>Měření vodivosti</i> .....	26
3.2.5	<i>Zkoušení vodivých a nevodivých povlaků</i> .....	29
3.2.6	<i>Třídění hliníkových slitin</i> .....	32
3.3	Aplikace metody vířivých proudů u kompozitních materiálů .....	35
3.3.1	<i>Uhlíkové kompozity</i> .....	35
<b>4</b>	<b>ZÁKLADNÍ ASPEKTY PRO KONTROLU UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ VÍŘIVÝMI PROUDY</b> .....	<b>41</b>
4.1	Základní charakteristika elektrických vlastností uhlíkových kompozitů .....	41
4.2	Základní charakteristiky .....	42
4.3	Návrh koncepce způsobu řešení .....	44
<b>5</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A TECHNIKA</b> .....	<b>46</b>
6.1	Návrh vysokofrekvenční sondy vířivých proudů .....	46
6.2	Použité kompozitní vzorky .....	49
<b>7</b>	<b>SHRNUTÍ PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ</b> .....	<b>55</b>
7.1	Výsledky zkoušení .....	55
7.1.1	<i>Dílčí výsledky zkoušení</i> .....	55
7.1.2	<i>Stínící kryty a jejich vliv na výslednou odezvu vířivých proudů</i> .....	79

7.2	Finální sonda pro kontrolu uhlíkových kompozitních materiálů .....	83
7.2.1	<i>Detekce nespojitosti v závislosti na tloušťce materiálu</i> .....	85
<b>8</b>	<b>DISKUZE NOVÝCH POZNATKŮ VYCHÁZEJÍCÍ Z NÁVRHU SONDY VÍŘIVÝCH PROUDŮ</b> .....	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>89</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>91</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>95</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM GRAFŮ</b> .....	<b>96</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>97</b>
<b>14</b>	<b>LITERATURA</b> .....	<b>98</b>

# 1 ÚVOD

Ekonomické podmínky stále více nutí provozovat letadla nad hranici jejich životnosti, z čehož plyne neustálá inovace technik nejen v opravách leteckých konstrukcí. V důsledku toho se lepené kompozitní opravy stávají neoddelitelnou součástí kovových letadlových celků [1]. Tyto kompozitní opravy jsou mechanicky i nákladově efektivní a velmi rychle se mohou stát součástí koncepce přípustnosti poškození (Damage Tolerance). Zastoupení kompozitních materiálů v letectví trvale roste, nezaujímají již roli pouze v opravách leteckých konstrukcí, ale i v návrhu nových letounů. V 80. letech tvořil objemový podíl kompozitních materiálů v konstrukci osobních dopravních letounů jen 5 %. Postupně docházelo ke zvyšování na 25 %. V současné době tvoří podíl kompozitních materiálů na draku letounů Boeing B787 nebo Airbus A350XWB více než polovinu.

Pokročilé uhlíkové kompozity se používají pro primární a sekundární konstrukce nových letadel. Výhody uhlíkového kompozitu spočívají v úspoře hmotnosti, která se pohybuje mezi 25 až 50 procenty oproti konstrukci z hliníkové slitiny, v měrné pevnosti v tahu (poměr mezi pevností materiálu a hmotností), která je čtyři až šestkrát vyšší než z hliníkové slitiny nebo oceli, dále v měrném modulu (poměr mezi tuhostí materiálu a hustotou), který je třikrát až pětkrát vyšší než u hliníkové slitiny nebo oceli. Kompozity jsou obecně přizpůsobivější než kovy a mohou být „ušité“ na míru potřebám výkonu a složité konstrukce. Mají vynikající konstrukční tlumící vlastnosti a lepší únavovou a lomovou odolnost, která se blíží až k 60 procentům meze pevnosti (podstatně vyšší než u hliníkové slitiny a oceli) [2]. V oblasti letectví se nejvíce využívá uhlíkových kompozitů zejména pak tzv. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic). Vzhledem k tomu, že kompozity CFRP mají laminátovou strukturu lze snadno dojít při vnějším zatížení k poškození, zejména pak k delaminaci, která značně snižuje pevnost konstrukce. V současné době se k detekci delaminace využívá zejména ultrazvukové a vizuální metody, které mají ovšem své limity. Kontrola se provádí ve stanovených inspekčních intervalech pro údržbu letounu a většinou je nutná demontáž jednotlivých částí letounu, což představuje obrovské časové náklady. Vzniká tak zájem o rychlou detekci delaminace za provozu letadla. Tuto detekci může zajistit i metoda vířivých proudů.

Mezi další velmi významnou skupinu kompozitů využívajících se pro letecké a kosmické konstrukce patří strukturní laminátové kompozity typu ARALL (Aramid-Al) a GLARE (sklo-hliníkový laminát). Skládají se z tenkých hliníkových plechů spojených dohromady pomocí jednosměrného nebo dvouosého lepeného vyztuženého laminátu, který obsahuje vysoce pevná aramidová nebo skelná vlákna. Ke kontrole těchto strukturních laminátových kompozitů se standardně využívá metody vířivých proudů.

## 2 PŘEHLED KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH V LETECTVÍ

### 2.1 Vlastnosti a struktura kompozitních materiálů pro letecké konstrukce

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní [3].

#### 2.1.1 Základní rozdělení kompozitních materiálů

Dle [4] jsou kompozitní materiály složeny ze dvou nebo více chemicky odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice.

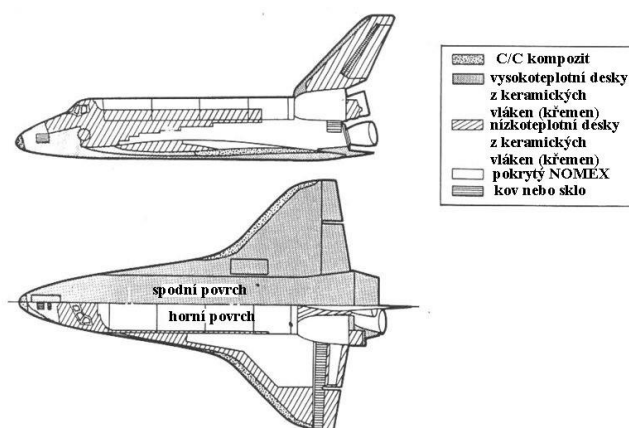
Kompozitní materiály lze dělit na mikrokompozity (největší příčný rozměr výztuže se pohybuje v rozmezí  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ ), makrokompozity a nanokompozity.

Další dělení mikrokompozitů dle [4] je možné dle materiálu matrice, která může být polymerní, kovová, uhlíková, skleněná, sklokeramická a keramická.

Podle tvaru výztuže lze kompozity dělit na vláknové kompozity, částicové kompozity a strukturní (vrstvené) kompozity.

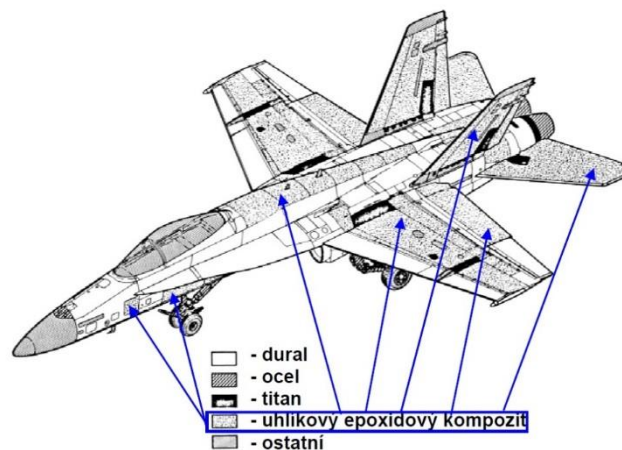
V letectví se nejvíce využívá kovových materiálů, zejména slitin na bázi lehkých kovů (dural), vláknových a strukturních kompozitů. Jedná se především o kompozity s polymerní, uhlíkovou, keramickou, duralovou, Mg, Ti maticí vyztuženou vysokomodulovými, skleněnými, uhlíkovými, kevlarovými či bórovými vlákny nebo jejich kombinacemi jako uhlík + kevlar nebo uhlík + sklo.

Na Obr. 2.1 až Obr. 2.3 je zobrazeno zastoupení jednotlivých kompozitních materiálů na vybraných leteckých konstrukcích. Dle [20] tvoří kompozitní materiály 3 % hmotnosti draku u dopravního letounu B-767 a u letounu F-18 tvoří 10,3 % hmotnosti draku.

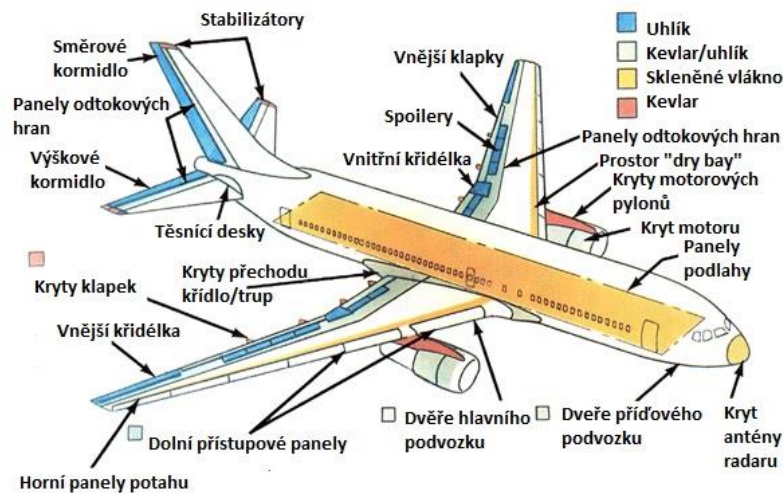


Obr. 2.1 Zastoupení jednotlivých kompozitních materiálů na raketoplánu [19]





Obr. 2.2 Zastoupení materiálů u letounu F-18 [20]



Obr. 2.3 Zastoupení kompozitních materiálů u dopravního letounu B-767 [5]

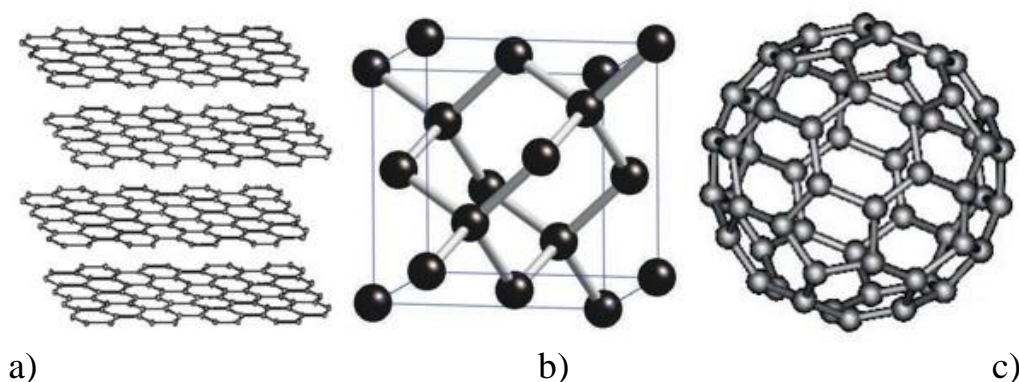
## 2.1.2 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity mohou obsahovat kovová vlákna, nekovová vlákna nebo polymerní vlákna. Uspořádání a orientace vláken, jejich koncentrace a rozložení mají vliv zejména na pevnost a další vlastnosti kompozitů. Existují dva způsoby orientace vláken. Vlákna upořádaná v jednom směru nebo mohou být upořádaná zcela nahodile. Dlouhá vlákna lze upořádat do dvou i více směrů např. kolmo nebo uhlopříčně. Krátká vlákna lze upořádat, částečně uspořádat nebo orientovat zcela nahodile. Jejich rozmístění má zásadní vliv na finální vlastnosti kompozitu.

Mezi vláknové kompozity patří i uhlíkové kompozity významně zastoupené v leteckém průmyslu, které z hlediska svých fyzikálních vlastností, zejména pak elektrické vodivosti, mohou být podrobeny nedestruktivnímu zkoušení pomocí metody vířivých proudů.

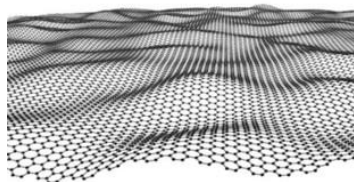
### 2.1.3 Uhlíková vlákna

Základním prvkem uhlíkového vlákna je tedy uhlík. Ten patří do skupiny nekovů, je základním prvkem organických sloučenin a v přírodě se vyskytuje ve dvou základních modifikacích, a to v podobě grafitu a diamantu. Zatímco diamant se chová jako izolant, je grafit elektricky vodivý. Uhlík se může vyskytovat i v uměle vytvořené modifikaci, a to ve formě tzv. fullerenu, který se skládá z atomů uhlíku uložených do rovin složených z pentagonů nebo hexagonů. Nejstabilnějším známým fullerenem je molekula obsahující 60 atomů uhlíku. Jednotlivé krystalové struktury jsou zobrazeny na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Ukázka jednotlivých forem uhlíku a) grafit b) diamant c) fuleren [17]

Při odebrání jedné roviny ze struktury grafitu vznikne forma uhlíku tzv. grafen. Jedná se o dvoudimenzionální uspořádání uhlíkových atomů o tloušťce jeden atom uhlíku. Monovrstva grafenu (viz Obr. 2.5) vykazuje zajímavé elektrické vlastnosti. Monovrstva je velmi dobře elektricky vodivá. Na rozdíl od klasických vodičů zde dochází k několika fenoménům. Dle [17] mají elektrony extrémně vysokou pohyblivost. Nejvyšší hodnota, kterou se podařilo naměřit, je asi  $200\,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  oproti pohyblivosti elektronů v křemíku, jejíž hodnota je  $1\,450\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Čím větší pohyblivost, tím větší vodivost. Rychlost elektronů dosahuje  $10^6\text{ m/s}$ .



Obr. 2.5 Ukázka uspořádání atomů uhlíku v monovrstvě grafenu [17]

Dle [17] se podařilo vytvořit dvojevrstvu uhlíkových atomů, u nichž lze nastavit šířku zakázaného pásu materiálu v rozmezí 0 až 0,2 eV pomocí působení vnějšího elektrického pole. Šířka zakázaného pásu souvisí s koncentrací elektronů v materiálu, která je přímo úměrná intenzitě elektrického pole. Koncentrace volných elektronů souvisí se zvyšováním dotace příměsí, která má vliv na šířku zakázaného

pásu. Pokud je nenulová (do 3 eV), pak materiál vykazuje polovodivé vlastnosti. Tedy monovrstva grafenu je velmi dobrý vodič, zatímco dvojevrstva je polovodič.

Ve vysokých magnetických polích a nízkých teplotách lze pozorovat tzv. kvantový Hallův jev. Dle [17] tento jev lze pozorovat ve dvoudimenzionálních strukturách, kdy za nízkých teplot a silných magnetických polí elektrická vodivost materiálu nabývá celočíselných násobků  $e^2/h$  ( $e$  – elementární náboj,  $h$  – Planckova konstanta) s velmi vysokou přesností. V tomto stavu vodivost nezávisí na jiných vlastnostech materiálu. Dle [18] se vlivem ideální struktury grafenu podařilo vědcům pozorovat kvantový Hallův jev již při pokojové teplotě.

Grafen vykazuje nejen zajímavé elektrické vlastnosti, ale i mechanické. Je nejtenčím a zároveň nejpevnějším materiálem na světě. Dle [18] je 200krát pevnější než ocel a Youngův modul pružnosti je odhadován na 500 Gpa (asi 25x větší než u ocele). Charakter grafenu z hlediska mechanických vlastností závisí na směru působícího zatížení. Pokud zatížení působí ve směru rovnoběžném k rovině monovrstvy grafenu, pak mechanické vlastnosti jsou mnohem vyšší než při působení zatížení ve směru kolmém. Vykazuje vysokou chemickou stabilitu a žáruvzdornost. Odolává teplotám vyšším než 3000°C. Směrová závislost se vyskytuje i u tepelné roztažnosti. Za dobrý tepelný vodič je považován ve směru rovnoběžném s rovinami, naopak za izolant ve směru kolmém.

Uhlíkové vlákno má krystalickou strukturu. Jak již bylo naznačeno, vyznačuje se vysokou anizotropií mechanických i fyzikálních vlastností. Dle [21] působí slabé Van der Waalovy vazby ve směru kolmém k bazálním rovinám šesterečné mřížky. Naopak v rovinách bazálních vrstev, v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány pevnými kovalentními vazbami. Aromatické roviny jsou ve vláknu orientovány přednostně ve směru podélné osy vlákna. Charakter vláken se odvíjí od paralelnosti aromatických rovin s osou vlákna, dále závisí na velikosti a dokonalosti krystalů a na obsahu vnitřních defektů (dutin, vměstků, trhlin) [4].

Dle [4] se modul pružnosti uhlíkového vlákna pohybuje v rozmezí 230 až 950 Gpa a pevnost v tahu se může pohybovat v rozmezí 2000 až 6000 Mpa.

Mezi nevýhody uhlíkových vláken patří jejich křehkost. Aby se zvýšila odolnost vlákna, je žádoucí jej povrchově upravit. Mezi nejčastější patří elektrochemická úprava povrchu nebo je lze chránit polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyamidů. U vláken s aromatickými rovinami (bazální roviny šesterečné mřížky) rovnoběžnými s povrchem se reaktivita povrchu zvyšuje a povrch vlákna se zdrsňuje. Nejběžněji se používá chemického působení oxidačních látek nebo elektrochemické úpravy viz výše. Nejnověji se využívá kontinuální úprava studeným vysokofrekvenčním plazmatem. Kompozity, který jsou vyrobené z upravených vláken, vykazují velkou smykovou pevnost rozhraní vláken, matrice i mezi-laminární pevnost. Navíc, pokud se do kompozitu přidá mezifáze v podobě polymerního povlaku, pak kompozit je méně náchylný ke vzniku podélných trhlin v rozhraní vlákno/matrice. Při použití lubrikačních látek (polyvinylalkohol, silikonový olej) se zvyšuje schopnost absorbovat energii při namáhání rázem.

Nedochází tak ke zlomení vláken v rovině šířící se lomové trhliny. Lepší houževnatosti vlákna se docílí nanesením kaučukového povlaku [4, 22].

### 2.1.4 Kompozity s epoxidovou matricí vyztuženou uhlíkovými vlákny (CFRP)

Široké spektrum vlastností uhlíkových vláken jako jsou kombinace nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a modulu pružnosti řadí tento typ kompozitu v současnosti mezi nejlepší kompozity. Modul pružnosti představuje míru tuhosti a pevnosti materiálu a CFRP kompozity se tímto mohou rovnat oceli. Kompozity s uhlíkovými vlákny mají také vynikající únavové vlastnosti a jsou extrémně odolné vůči korozi. Vzhledem k těmto všem vlastnostem se používají pro výrobu trupů a křídel letounů.

Jejich mechanické a fyzikální vlastnosti jsou zobrazeny v následující Tab. 2.1.

Mechanické vlastnosti		Fyzikální vlastnosti	
Youngův modul pružnosti	69 – 150 Gpa	Teplota skelného přechodu	99,85 – 179,9°C
Pevnost v tahu	550 – 1050 Mpa	Měrné teplo	901,7 – 1037 J/kg.K
Mez kluzu	550 – 1050 Mpa	Koeficient teplotní roztažnosti	1 – 4.10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup>
Tažnost	0,32 – 0,35 %	Tepelná vodivost	1,28 – 2,6 W/m.K
Tvrdoost Vickers	10,8 – 21,5 HV	Max. provozní teplota	139,9 – 219,9°C
Lomová houževnatost	6,12 – 20 Mpa.m <sup>1/2</sup>	Elektrický odpor	1,65 – 9,46.10 <sup>5</sup> μΩ.cm

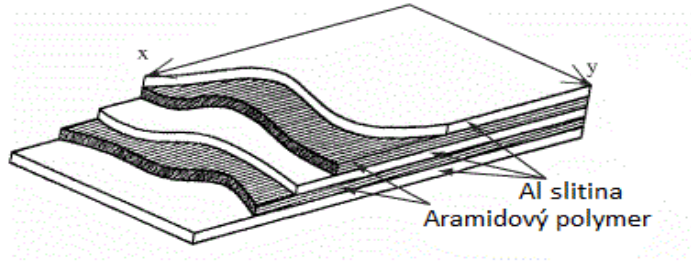
Tab. 2.1 Mechanické a fyzikální vlastnosti CFRP kompozitních materiálů [8]

Kompozity CFRP nabízejí nejvyšší specifickou energii vstřebávání. S termosetovou matricí (např. epoxidovou) mohou absorbovat energii zhruba 120 kJ/kg. S termoplastickou matricí mohou absorbovat zhruba 250 kJ/kg oproti cca 20 kJ/kg u ocele. Ačkoli CFRP může nabídnout snížení hmotnosti o 50 až 60 % oproti podobné součásti z ocele, je jeho cena 2krát až 10krát vyšší [15].

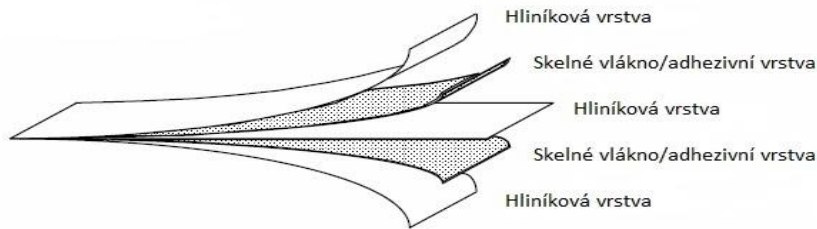
### 2.1.5 Strukturní kompozity

Skladba strukturních kompozitů je tvořena z vrstev různých materiálů. Každý materiál je zdrojem různých vlastností, jako jsou pevnost, houževnatost, tvrdost, korozní odolnost, žáruvzdornost aj. Hlavní skupinu tvoří lamináty a mikrolamináty. Mikrolamináty tvoří skladba Al a polymeru zpevněného vlákny. Mezi nejznámější patří Glare (laminát tvořen Al a sklem) a Arall (laminát tvořen Aramidem a Al). Oba typy jsou zobrazeny na Obr. 2.6 a Obr. 2.7. Další skupinu tvoří sendvičové kompozity, které se vyznačují velmi nízkou hmotností. Pro jádra sendvičových konstrukcí se používají tzv. voštiny, které jsou k potahu přilepeny pomocí fólie lepidla (viz Obr. 2.8). Voštiny mohou být různých výšek, velikostí a tvaru buněk. Používají se Al voštiny, voštiny se skleněnými vlákny, aramidovými vlákny ve fenolformaldehydové pryskyřici (obchodní značky Nomex a Kevlar). Oproti

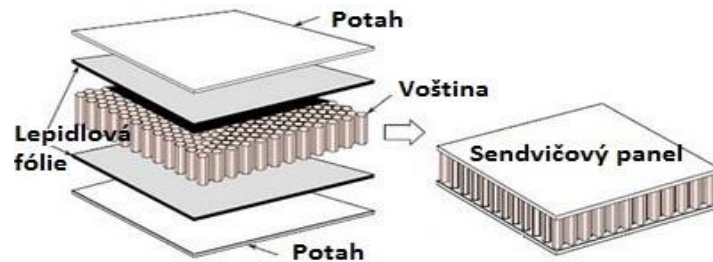
nomexovým voštinám jsou kevlarové voštiny odolnější vůči tlakovému i smykovému namáhání. V leteckém průmyslu se vyskytují voštiny s uhlíkovými vlákny a matricí sloužící k oddělení posádky od prostoru, kde se může vzniknout požár [22].



Obr. 2.6 Skladba vrstveného kompozitu Arall [24]

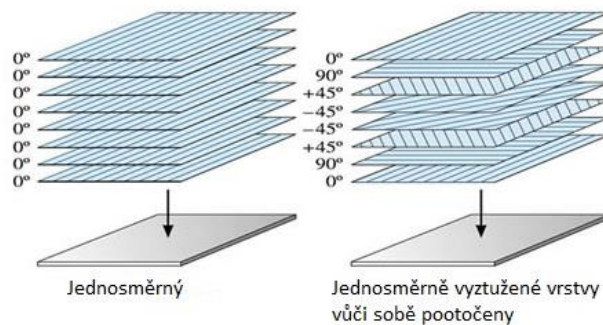


Obr. 2.7 Skladba vrstveného kompozitu Glare [25]



Obr. 2.8 Skladba sendvičového panelu s voštinovým jádrem [23]

Jednotlivé jednosměrně vyztužené vrstvy mohou být na sebe kladeny pod úhlem  $0^\circ$  nebo mohou být vůči sobě pootočený pod různými úhly, obvykle  $0^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  a  $90^\circ$ . Jednosměrný kompozit má poměrně malou tloušťku (0,1 až 0,15 mm).



Obr. 2.9 Ukázka skladby vrstvených kompozitního materiálu jednosměrného (vlevo), vrstveného pod různými úhly (vpravo) [26]

## 2.2 Druhy nespojitostí u kompozitních materiálů

U kompozitních materiálů se mohou vyskytnout různé druhy nespojitostí a poruch, které je nutné zejména za provozu letecké konstrukce odhalit při údržbě letounu. Tyto nespojitosti lze rozdělit do několika kategorií, které jsou popsány níže.

### 2.2.1 Nespojitosti v kompozitních materiálech

Tyto nespojitosti lze dle [16] kategorizovat následovně:

1. podle lokalizace:
  - vnitřní
  - povrchové (např. otevřená delaminace)
2. podle okamžiku v životním cyklu součásti, ve kterém vznikly:
  - při vývoji součásti (během zkoušek)
  - při výrobě
  - za provozu

Výskyt dané nespojitosti závisí na:

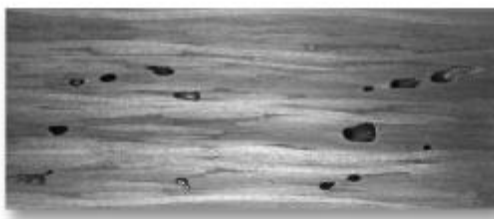
- typu a skladbě kompozitního materiálu (materiál pojiva a výtzuže)
- typu, rozměrech a tvaru konstrukce (integrální, lepená, sendvičová, nýtovaná atd.)
- způsobu výroby nebo opravy
- druhu provozního namáhání
- vlivu prostředí (teplota, vlhkost, chemické látky)
- způsobu možných náhodných poškození (nárazem, zásahem blesku apod.)

V kompozitním materiálu se dle [16] mohou vyskytovat tyto následující nespojitosti.

### ***Dutiny***

Jedná se o prostor s uzavřeným vzduchem nebo jiným plynem uvnitř materiálu. Tvar dutin může být v podobě drobných vad s pravidelným téměř kulovitým tvarem nebo mít podobu rozsáhlých vad s tvarem závislého na tvaru dílu nebo způsobu

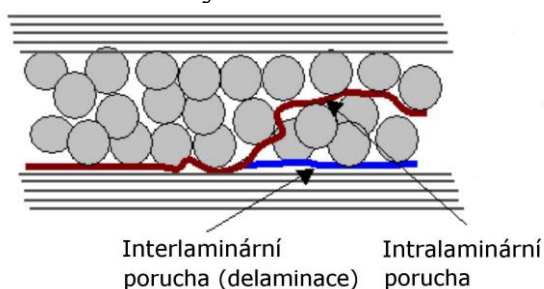
kladení vrstev výztuže. Dutiny se mohou vyskytovat samostatně nebo ve shlucích. Ukázka dutiny je zobrazena na Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Ukázka dutiny u kompozitního materiálu [16]

### **Delaminace**

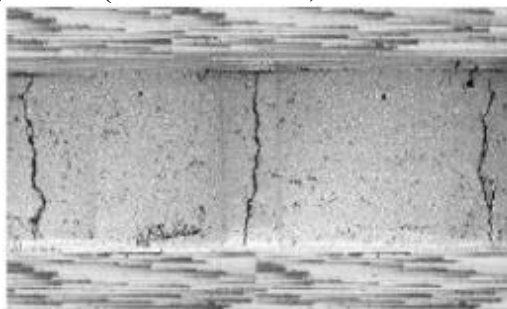
Delaminace je termín užívaný k definici oddělení vrstev kompozitního materiálu uvnitř konstrukce. Poškození jedné nebo více vrstev se nazývá intra-laminární poškození. Pokud dojde k oddělení vedlejší vrstvy, jedná se o tzv. inter-laminární (mezi-laminární) poškození, které probíhá na rozhraní vrstev. Obě tyto poruchy jsou zobrazeny na Obr. 2.11. Delaminace vzniká následkem přítomnosti vad ve výrobě. Roste s únavovým zatížením nebo navyšováním statického zatížení.



Obr. 2.11 Rozdíl mezi interlaminární a intralaminární poruchou [16]

### **Trhlina**

Jedná se o místní porušení soudržnosti materiálu. Často vznikají následkem tepelného pnutí během tepelného zpracování nebo za provozu součásti. Obecně vzniknou tam, kde v průřezu součásti probíhá náhlá změna. Trhliny většinou bývají kolmé k rozhraní vrstev výztuže (viz Obr. 2.12).



### **Separáční fólie**

Vlivem separáční fólie může vzniknout nespojitost typu delaminace. Může být způsobena jejím opomenutím při skládání prepregových vrstev nebo její část může být uzavřena mezi vrstvami výztuže.

### **Změna tloušťky kompozitu**

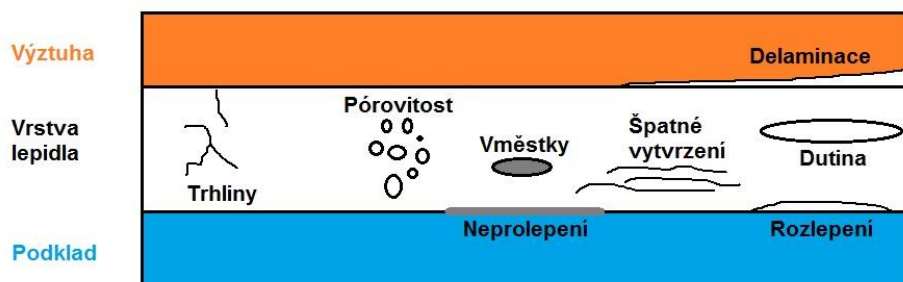
Tato porucha vzniká chybným založením nástřihu výztuže nebo jeho opomenutím.

### **Místa bez pojiva, s přebytkem pojiva a snížená jakost pojiva**

U prosycování suché výztuže pojivem může vzniknout místo bez pojiva vlivem kontaminace pojiva separáční látkou, nevhodnou procedurou prosycení nebo nevhodnými tlakovými poměry. Při nedostatečné nebo žádné dávce vytvrzovacího tlaku se mohou vyskytnout místa s přebytkem pojiva. Ke snížené jakosti pojiva dochází především vlivem nízké kohézní pevnosti pojiva. To nastává při nedodržení vytvrzovacího režimu pojiva.

## **2.2.2 Nespojitosti lepených spojů**

Při výrobě a provozu se může vyskytnout široké spektrum nespojitostí, které degradují lepený spoj. Nespojitosti mohou být lokálního charakteru, nebo se nacházejí v celém průřezu lepeného spoje. Na Obr. 2.13 jsou zobrazeny různé typy nespojitostí, které se mohou v lepeném spoji nacházet. Nespojení nebo rozlepení jsou vady, kde lepidlo přilepí pouze jeden povrch v lepených sestavách. Mohou být způsobeny nepřítomností lepidla ve spoji nebo naopak přítomností separátorů v lepených konstrukcích. Oblasti nespojení nemají žádnou pevnost a dalším namáháním okolních oblastí vytváří možné poškození.



Obr. 2.13 Ukázka nespojitostí v lepeném spoji [16]



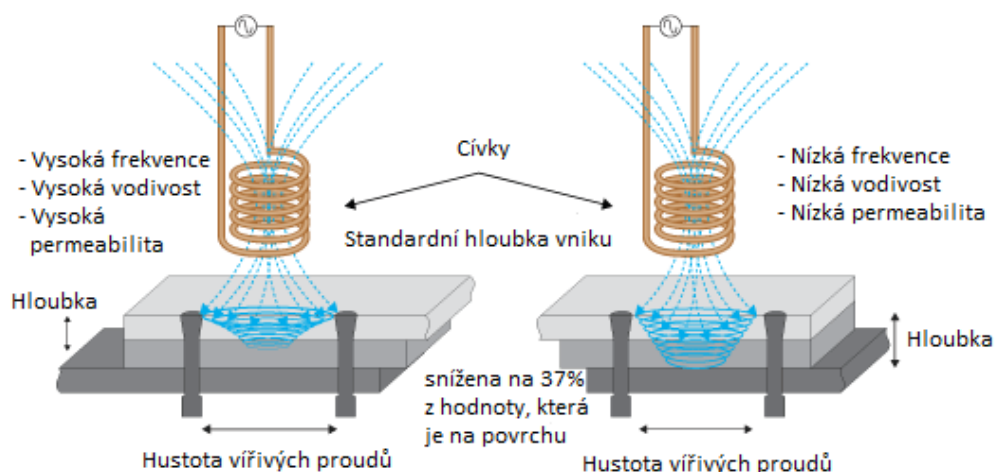
## 3 METODA VÍŘIVÝCH PROUDŮ PRO KONTROLU LETECKÝCH KONSTRUKCÍ

### 3.1 Úvod do metody vířivých proudů (ECT)

ECT („*Eddy Current Testing*“) je používána k zajištění kvality a ke stanovení stavu struktury a celistvosti průmyslových součástí vyrobených z elektricky vodivých materiálů. Dále se používá k detekci a charakterizaci povrchových nebo těsně podpovrchových vad nebo nespojitosti. Tato metoda kontroly materiálů pracuje na principu elektromagnetické indukce a může být vysvětlena například pomocí Maxwellových rovnic dle [6].

Základními elektrickými parametry této metody jsou elektrická vodivost a impedance. Změnu elektrické vodivosti způsobují vady, jako jsou trhliny, vměstky, zářezy nebo změny struktury materiálu, změnu impedance cívky způsobují magnetická permeabilita (mění homogenitu materiálu) a deformace toku vířivých proudů (prodlužují délku v šíření vířivých proudů v materiálu). Měření změny impedance je spojeno s parametry jako délka, hloubka, umístění, směr vady atd. V místě vad dochází ke změnám rozložení hustoty vířivých proudů, což způsobí měřitelnou změnu impedance cívky, nazývanou obvykle jako EC signál. Průnik vířivých proudů do hloubky materiálu je omezován skin-efektem. Skin-efekt nebo také „šíření vířivých proudů“ v povrchové vrstvě materiálu je závislý na kontrolní (měřicí) frekvenci [9].

Dalším důležitým parametrem je hloubka vniku vířivých proudů do materiálu, která je závislá na frekvenci, vodivosti a relativní permeabilitě (viz Obr. 3.1). Při praktickém měření je vznik a velikost skin-efektu ovlivněn především zkušební frekvencí (předpokladem je, že vodivost a relativní permeabilita se nemění) a to tak, že čím vyšší hodnota frekvence je, tím více se uplatňuje skin-efekt, což způsobuje menší hloubku vniku vířivých proudů do materiálu. Skin-efekt umožňuje detekci vad pouze na povrchu materiálu a v tenké povrchové vrstvě. Tudíž se v praxi vířivých proudů využívá pro indikaci (lokalizaci) krátkých „úzkých neviditelných“ povrchových trhlin. Většinou se jedná o materiál popraskaný vlivem velkého teplotního a únavového namáhání částí jako jsou lopatky rotorů turbín, různé letecké konstrukce atd. [9].

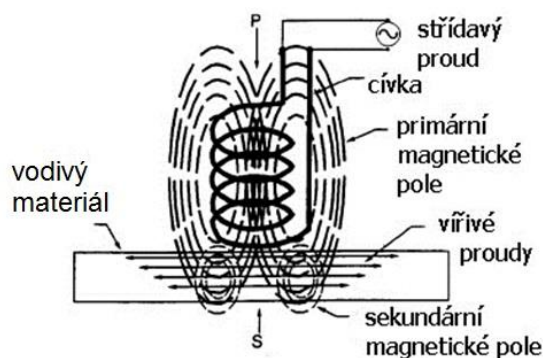


Obr. 3.1 Standardní hloubka vniku vířivých proudů [14]

Dalšími průmyslovými aplikacemi zkoušení pomocí vířivých proudů, mimo indikací povrchových a těsně podpovrchových trhlin různých hloubek a směrů, jsou detekce korozního napadení materiálu, měření vlastností materiálu jako je vodivost materiálu (využívá se pro kontrolu záměny materiálu), povrchová tvrdost (zakalení materiálu), druhové znečištění a měření tloušťky materiálu [9].

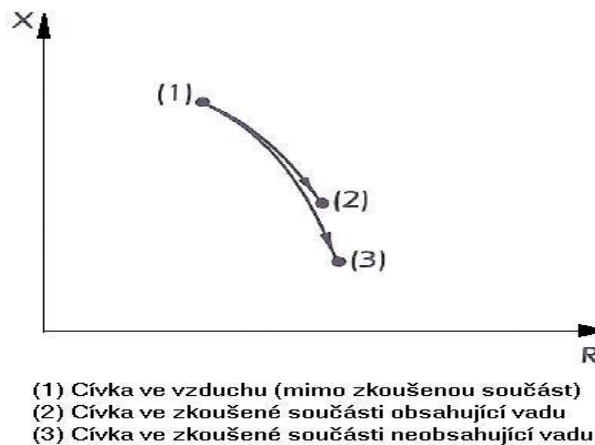
### Impedance cívky

Základním principem metody vířivých proudů (viz Obr. 3.2), je cívka buzená sinusovým střídavým proudem (frekvence,  $f$ ), který způsobí, že se ve zkoušené součásti indukují vířivé proudy a případné vady v materiálu se projeví jako změny impedance cívky. Při této metodě vznikají tedy dvě magnetická pole: jedno od magnetizační cívky, druhé od vířivých proudů, indukovaných ve vzorku. Tato dvě magnetická pole se vektorově skládají. V souladu s Lenzovým zákonem je směr indukovaných vířivých proudů v součásti (sekundární pole od vířivých proudů) opačně orientovaný a působí tedy proti směru působení proudů v primárním poli (od budící cívky). Směry proudů jsou zobrazeny na Obr. 3.2 [9].



Obr. 3.2 Princip metody vířivých proudů [13]

Za předpokladu, že je zkoušená součást z neferomagnetického materiálu, tak se vlastní indukčnost cívky snižuje. Toto snížení indukčnosti se projevuje zvýšením činného odporu. Přítomnost nespojitosti ve zkoušené součásti se projevuje zeslabením šíření vířivých proudů a v důsledku tohoto jevu jsou změny indukčnosti a odporu budící cívky sníženy. Chování cívky při změnách impedance, kdy cívka přichází do styku s neferomagnetickým vodivým materiálem s vadou či bez vady, je ukázáno na Obr. 3.3. Komplikovanější situace nastává, pokud je součást z feromagnetického materiálu. Zde naopak dochází ke zvýšení indukčnosti vzhledem k vyšší permeabilitě materiálu. Změny impedance vlivem výskytu dané nespojitosti ve zkoušené součásti jsou obvykle velmi malé v porovnání s hodnotou impedance cívky, kdy je cívka „v klidu“ [9].



Obr. 3.3 Impedanční trajektorie cívky dle [7]

### **Elektrická vodivost**

Elektrická vodivost je fyzikální veličina, která popisuje schopnost vést elektrický proud. Kovy jsou obecně dobrými vodiči elektřiny. Vodivost je závislá na uspořádání atomů v každé krystalové mřížce a rozdělení elektronů v okolí každého atomu. Jakákoli změna ve struktuře kovu, která ovlivní strukturu elektronů a energii atomů, snižuje vodivost kovů. Pro jednoduchost, snížení vodivosti lze přirovnat k překážkám, které vstupují do cesty toku elektronů skrz kov. Tyto překážky mohou být způsobeny deformací krystalové mřížky (dislokace, chybějící atomy, cizí atomy nebo hranice zrn) [7].

Většinu kovových materiálů je tvořena slitinami. Jednotlivé legující prvky jsou obvykle přidány během tavení základního kovu a jejich množství je specifikováno procentuální hodnotou. Mohou vzniknout dvě základní formy tuhých roztoků. Tuhý roztok substituční vznikne tehdy, pokud atomy přidaného legujícího prvku a atomy základního kovu v krystalové mřížce se mohou vzájemně zastupovat. Tuhý roztok

intersticiální vznikne tehdy, pokud atomy přidaného legujícího prvku se umístí do pozice krystalové mřížky mezi atomy základního kovu [7].

Měření vodivosti kovů se nejčastěji využívá u hliníkových slitin, jelikož vykazují velké rozdíly v elektrické vodivosti a mechanických vlastnostech mezi jednotlivými druhy slitin a tepelným zpracováním. Více o měření vodivosti je popsáno v kapitole 3.2.1.

### **3.2 Aplikace metody vířivých proudů u leteckých hliníkových konstrukcí**

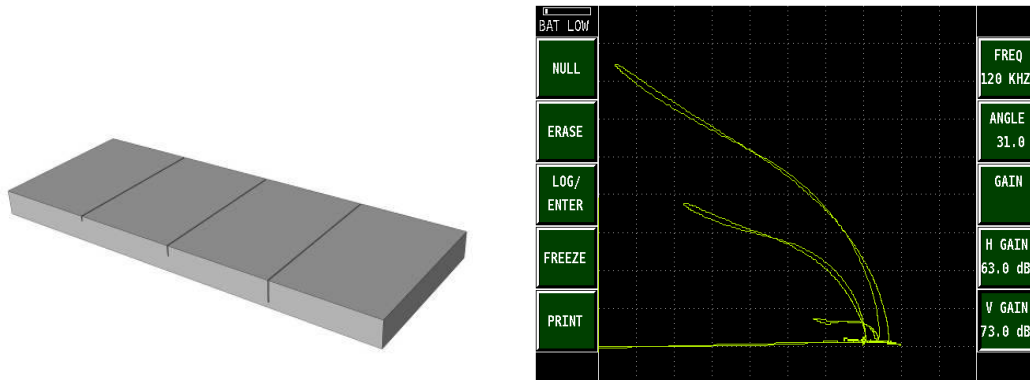
Široké použití hliníkových slitin pro kritická místa letounu umožňuje a přímo vyžaduje použití metody vířivých proudů ke kontrole leteckých konstrukcí během stanovených inspekčních intervalů pro údržbu a k detekci poškození vzniklých za provozu letounu. Tyto kontroly se používají především k detekci únavových trhlin, které mohou vzniknout vlivem cyklického zatěžování během letu, ale také startu nebo přistání. Také ji lze použít ke zjištění rozsahu korozního poškození nebo k identifikaci částí poškozených vysokou teplotou, např. požárem, bleskem. Každá část může být vyrobena ze specifické hliníkové slitiny a dané vlastnosti jednotlivých slitin vycházejí z jejich složení a tepelného zpracování. Tyto vlastnosti se mohou lišit dle různých požadavků na jejich aplikaci v letectví.

Mezi typické aplikace metody vířivých proudů v letectví patří [7]:

- detekce povrchových nespojitostí;
- detekce podpovrchových nespojitostí;
- kontrola spojů (nýtové, šroubové) rotačními sondami;
- měření vodivosti;
- zkoušení vodivých a nevodivých povlaků;
- třídění hliníkových slitin;
- vyhodnocení tepelného poškození hliníkových leteckých konstrukcí;
- zjišťování kovových ředin, vzdáleností mezi jednotlivými kovovými podklady

#### **3.2.1 Detekce povrchových nespojitostí**

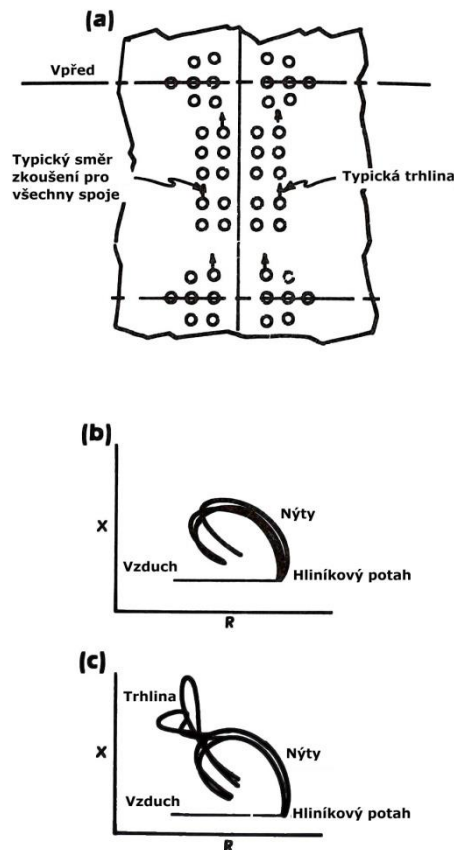
K nalezení povrchových trhlin v leteckých hliníkových konstrukcích při údržbě letounu za provozu se využívá vysokých frekvencí cca od 50 kHz do 500 kHz. Pro kalibraci zkušebního vybavení je opět vyžadován referenční vzorek, který je vyroben ze stejného materiálu jako zkoušený materiál a obsahuje většinou vyjiskřené drážky dané šířky a hloubky, které představují náhradní velikosti trhlin (viz Obr. 3.4)



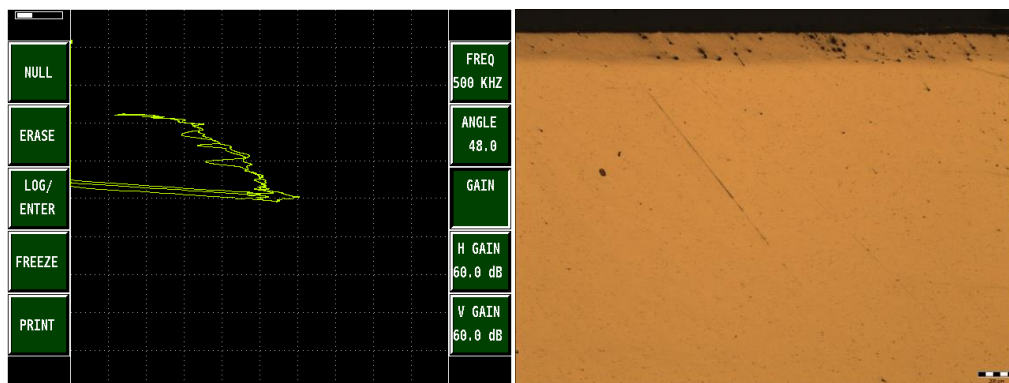
Obr. 3.4 Kalibrační vzorek pro povrchové zkoušení (vlevo), odezva vířivých proudů na vyjiskřené drážky (vpravo)

Trhliny vyskytující se v potahu iniciované od nýtových či jiných spojů mohou vznikat během zatížení draku letounu. Tyto únavové trhliny vznikají ve směru kolmém na zatížení. Pro detekci těchto trhlín se využívá standardně dostupných sond. Typické odezvy jsou vyobrazeny na Obr. 3.5.

Pomocí povrchových sond lze odhalit nejen trhliny od spojů a trhlín v potahovém plechu, ale i jiná poškození jako jsou koroze či přítomnost vměstku v hliníkové slitině (viz Obr. 3.6), které mají nemalý vliv na mechanické a únavové vlastnosti hliníkové slitiny. Takový příklad je zobrazen na snímcích metalografické analýzy kde v oblasti příložky z hliníkové slitiny pod pásnicí nosníku křídla byly v těsně podpovrchové vrstvě nalezeny cizorodé částice, pravděpodobně se jedná o vměstky a důlkovou korozi (Obr. 3.6) Všechna tato poškození mají nemalý vliv na degradaci únavových charakteristik hliníkových slitiny.



Obr. 3.5 Trhliny v potahovém plechu iniciované od otvorů nýtových spojů (a), odezva vířivých proudů na přítomnost nýtu bez trhliny (b), odezva vířivých proudů na přítomnost nýtu s trhlinou (c) [7]

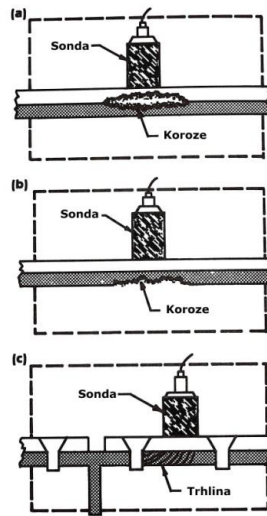


Obr. 3.6 Odezva vířivých proudů na cizorodé částice v těsně podpovrchové vrstvě (vlevo), snímek metalografické analýzy (vpravo)

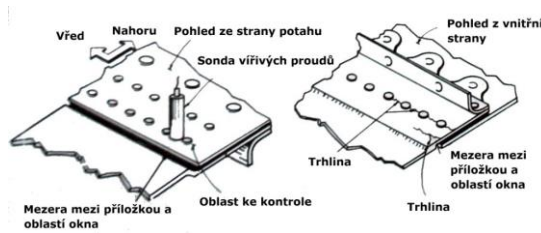
### 3.2.2 Detekce podpovrchových nespojitostí

Detekce podpovrchových nespojitostí je založena na nízkofrekvenční kontrole (řádově od 100 Hz do 10 kHz) k odhalení skryté koroze a trhlin (viz Obr. 3.7). Nízkofrekvenční kontrola v letectví je nejčastěji spojována s tzv. detekcí trhlin ve druhé vrstvě. Typickou aplikací je detekce trhlin u nýtových či jiných spojů pod potahovým plechem jako jsou oblasti podélníků, žebor, nosníků, oblasti oken u trupu

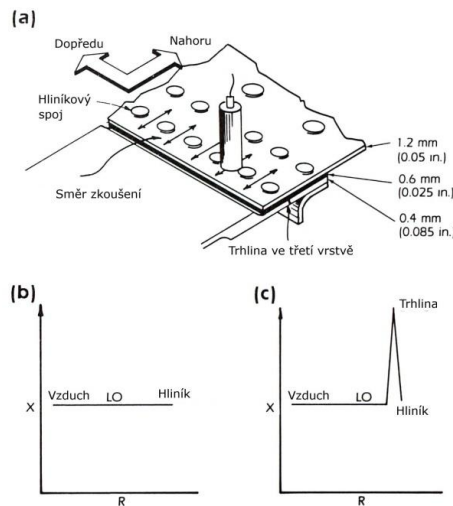
atd. (viz Obr. 3.8). Na dalším Obr. 3.9b a Obr. 3.9c jsou zobrazeny odezvy vířivých proudů bez přítomnosti trhliny a na skrytou trhlinu pod potahovým plechem z hliníkové slitiny.



Obr. 3.7 Typické aplikace nízkofrekvenční kontroly metodou vířivých proudů [7]



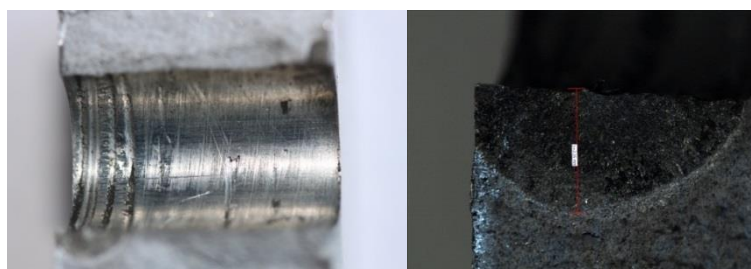
Obr. 3.8 Trhliny ve druhé vrstvě iniciované od otvorů spojů [7]



Obr. 3.9 Detekce trhlin ve druhé vrstvě: (a) směr zkoušení; (b) odezva vířivých proudů bez trhliny; (c) odezva vířivých proudů na přítomnost trhliny [7]

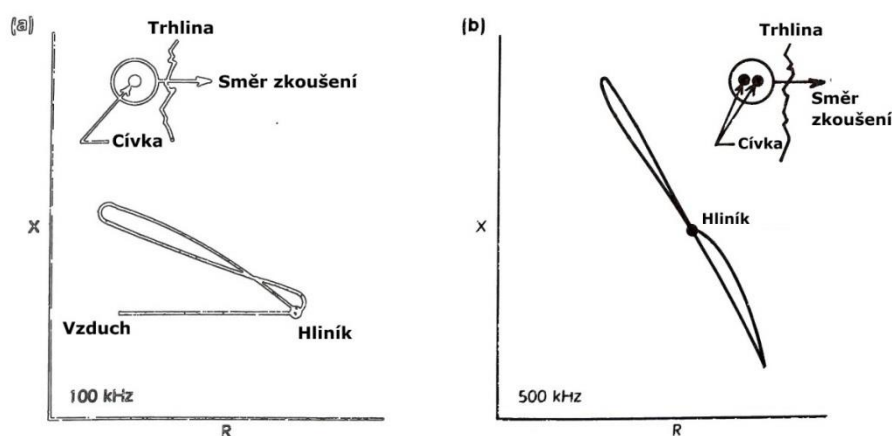
### 3.2.3 Kontrola otvorů spojů

Otvory spojů jsou předkládány kontrole, jelikož vlivem zatížení a koncentrace napětí jsou zdrojem iniciace trhlin. Obvyklý způsob kontroly je pomocí rotačních sond vířivých proudů (Bolt-Hole Eddy Current, BHEC). Spolehlivost této kontroly se odvíjí od kvality a čistoty otvoru. Proto je důležité všechny otvory spojů řádně očistit a používat vhodné nástroje k odstranění spojů. Při použití nevhodných nástrojů mohou vzniknout náhodná či další poškození, což často způsobí komplikace při vyhodnocování a následně chybné pozitivní indikace přítomnosti trhliny. Také je nutné dodržet správné technologické postupy již ve výrobě. Na Obr. 3.10 jsou vyobrazeny drážky po nástroji vzniklé při výrobě otvorů s následkem iniciace a šíření únavové trhliny za provozu letadla.



Obr. 3.10 Drážky po nástroji vzniklé při výrobě otvorů a vzniklá únavová trhlina

Pro kontrolu otvorů se využívají sondy pracující v absolutním nebo diferenciálním režimu. V absolutním režimu je pouze jedna cívka používána pro buzení a snímání vířivých proudů. Diferenciální sondy se dvěma cívkami jsou obvykle vinuty v opačném směru a jedna cívka se používá jako budící a druhá jako snímací. Typická odezva vířivých proudů na přítomnost trhliny u hliníkové slitiny při absolutním a diferenciálním režimu je zobrazena na Obr. 3.11.

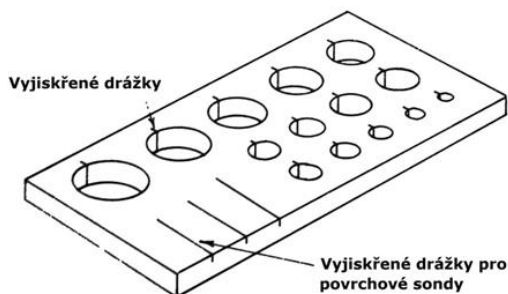


Obr. 3.11 Odezva vířivých proudů na trhlinu: (a) absolutní sonda; (b) diferenciální sonda [7]

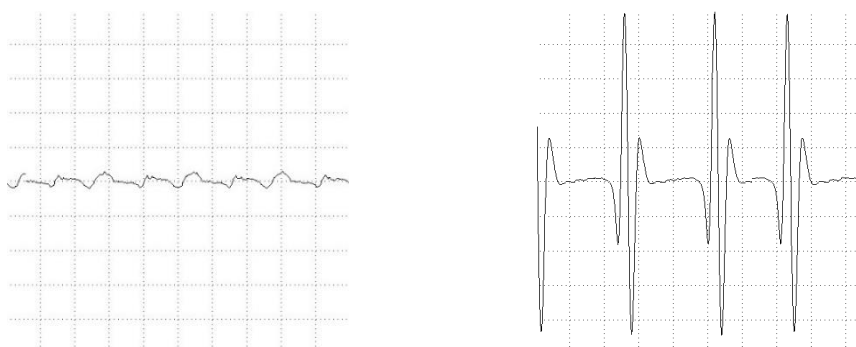
Pro nastavení parametrů přístroje a ověření správné funkčnosti rotační sondy je nezbytný referenční vzorek Obr. 3.12. Kalibrační vzorek zpravidla obsahuje vyjiskřené drážky v otvorech různých průměrů. Je žádoucí, aby byl vzorek ze stejného materiálu, stejné povrchové úpravy a měl odpovídající tepelné zpracování



jako zkoušená součást. Na Obr. 3.13 je zobrazena odezva vířivých proudů bez přítomnosti drážky v otvoru a typická odezva vířivých proudů na vyjiskřené drážku o šířce 0,1 mm a hloubce 1,1 mm. Tato drážka představuje náhradní velikost trhliny.

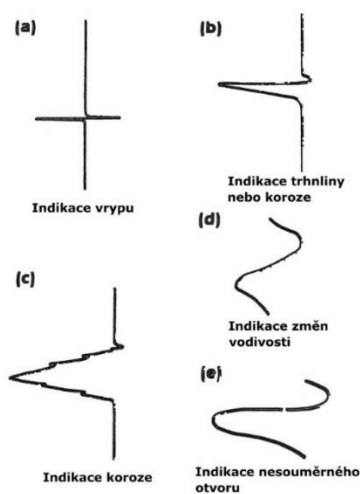


Obr. 3.12 Kalibrační vzorek pro kontrolu rotačními sondami [7]



Obr. 3.13 Odezva vířivých proudů: bez přítomnosti drážky v otvoru (vlevo); na drážku v otvoru (vpravo)

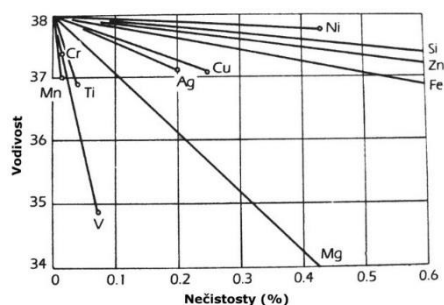
Při kontrole otvorů spojů se lze setkat s různými typy indikací, které představují různé druhy poškození. Typické průběhy indikací u hliníkové slitiny jsou zobrazeny na Obr. 3.14.



Obr. 3.14 Typické průběhy indikací různých poškození u hliníkové slitiny [7]

### 3.2.4 Měření vodivosti

Slitiny mají vliv nejen na mechanické vlastnosti z hlediska procentuálního množství legujících prvků, ale i na vodivost, která se snižuje zvyšováním množství legujících prvků. Dokonce i malé množství cizích atomů může výrazně snížit vodivost (viz Obr. 3.15). Obecně platí, že atomy, které se ve velikosti a rozdělení elektronů nejvíce liší od základního kovu, způsobí největší pokles vodivosti [7].



Obr. 3.15 Vliv kovových přísad na vodivost hliníku [7]

Měření vodivosti kovů se nejčastěji využívá pro zjišťování vodivosti hliníkových slitin, jelikož tyto slitiny jsou nejvíce používány v leteckém průmyslu a vykazují velké rozdíly v elektrické vodivosti a mechanických vlastnostech mezi jednotlivými druhy slitin a tepelným zpracováním. Rozsah měrné elektrické vodivosti nejběžnějších hliníkových slitin používaných v leteckém průmyslu je zobrazen v Tab. 3.1. Tyto údaje jsou získány od různých výrobců draků letounů a leteckých organizací.

Z hlediska tepelného zpracování má hliníková slitina největší vodivost a nejnižší mez pevnosti při žíhání. Po ochlazení se mez pevnosti zvýší a vodivost sníží. Mnoho hliníkových slitin je po určité době nestabilních i přesto, že jsou drženy při pokojové teplotě. Během této inkubační doby dochází k tzv. přirozenému stárnutí, které je vyvoláno migrací atomů zahajující tvorbu submikroskopických částic. Tento proces sice zvyšuje pevnost, ale nemá žádný nebo velmi malý vliv na vodivost. Některé slitiny hliníku po ochlazení zůstávají tak dlouho nestabilní, že se tepelnému zpracování nevystavují (např. 7075) [7].

Důležitými aspekty při měření vodivosti pomocí metody vířivých proudů jsou [7]:

1. výběr vhodného a spolehlivého přístroje;
2. výběr vhodného kalibračního etalonu;
3. definování správného postupu pro vyhodnocování a požadavků pro měření.

Měrná elektrická vodivost hliníkových slitin		
Slitina	Elektrická vodivost (% IACS)	
	Minimum	Maximum
1100	57,0	62,0
2014-0	48,5	51,5
2014-T3XX	31,5	35,0
2014-T4XX	31,5	35,0
2014-T6XX	37,0	41,5
2024-0	45,5	50,0
2024-T3XX	28,0	33,0
2024-T4XX	28,5	32,5
2024-T6XX	35,0	41,0
2024-T8XX	36,0	42,5
2219-0	43,0	46,0
2219-T3XX	27,0	31,0
2219-T62X	31,0	35,5
2219-T8XX	31,0	35,5
3003-0	44,5	50,0
6061-0	47,0	51,0
6061-T4XX	35,5	41,5
6061-T6XX	40,0	45,0
7075-0	44,0	48,0
7075-T6XX	30,0	35,0
7075-T73X	38,0	42,5
7075-T76X	36,0	39,0
7079-0	44,0	47,0
7079-T6XX	30,0	35,0
7178-0	43,0	47,0
7178-T6XX	29,0	34,0
7178-T76	35,0	39,0

*Tab. 3.1 Přehled hodnot elektrické vodivosti nejběžnějších hliníkových slitin používaných v leteckém průmyslu [7]*

Vodivost ovlivňuje celá řada faktorů. Mezi tyto faktory, patří především vliv přidaných legujících prvků, vliv tepelného zpracování a mechanické namáhání a správné vyhodnocování vodivosti v laboratorních podmínkách. Vodivost čistého kovu v žíhaném stavu je rovna hodnotě 100 %, což odpovídá hodnotě vodivosti čisté žíhané mědi. Jak již bylo řečeno, u většiny konstrukčních kovů se jedná o slitiny obsahující základní kov s několika přidanými legujícími prvky pro získání specifických vlastností. Přidáním těchto legujících prvků do čistého kovu se mění jeho vodivost. Obvykle legující prvek se stává rušivým elementem pro tok

elektronů, čímž dochází ke snížení vodivosti než v případě čistého kovu. Ačkoli je vodivost mědi dána hodnotou 100 % IACS, musí být při měření vodivosti mědi brán ohled na její ovlivnění malými přísadkami legujících prvků nebo nečistost. Vodivost je také ovlivňována teplotou kovu a prostředím, kde je měření pomocí vířivých proudů vykonáváno [7].

Níže jsou uvedeny praktické aspekty, které by se měly dodržovat při výběru přístroje vířivých proudů, etalonů a vzorků pro laboratorní hodnocení s cílem stanovit rozsahy vodivosti hliníkových slitin. Jsou požadovány:

- přístroj vířivých proudů a sondy
- referenční vzorky známé vodivosti – tyto vzorky by měly být ploché, z neplátovaného materiálu a bez povlaku a takové velikosti, aby se eliminoval hranový efekt.

Správná kalibrace celého systému je pro měření velmi důležitým aspektem a může mít významný vliv na přesnost měření. S ohledem na tuto skutečnost bylo stanoveno šest základních vlivů, které mohou přesnost měření ovlivnit [7]:

1. zakřivený povrch – je nutné vyloučit zkoušení ploch, které mají malý poloměr zakřivení, jelikož mění efektivní oddálení cívky a tím se pozměňuje odezva vířivých proudů.
2. hranový efekt – projevuje se přiblížením sondy k hraně zkušební vzorku a lze pozorovat změnu odezvy vířivých proudů. Aby se zabránilo hranovému efektu, musí být sonda stíněná.
3. tloušťka materiálu – ovlivňuje výsledek měření vodivosti, pokud hloubka vniku vířivých proudů bude větší, než je tloušťka materiálu. S tímto fyzikálním jevem jsou úzce spjaty pojmy jako je standardní hloubka vniku  $\delta$  a efektivní hloubka vniku  $3\delta$ .
4. tloušťka vodivého povlaku – vrstva komerčně čistého, vysoce vodivého hliníku na slitině hliníku jako základního materiálu (nižší vodivost) způsobí větší pozitivní odchylku zdánlivé vodivosti se zvyšující tloušťkou povlaku. Měření vodivosti například u materiálu Alcad (pracovní frekvence 60 kHz) je obvykle omezeno tloušťkou materiálu nepřesahující 2 mm.
5. tloušťka nevodivého povlaku – stanovuje se pomocí efektu oddálení (lift-off efekt)
6. teplota – teplota patří mezi důležité parametry při stanovení vodivosti. Pozornost musí být věnována zejména těmto třem parametrům:
  - a) teplota zkoušeného materiálu;
  - b) teplotní rozdíl mezi zkoušenou částí a referenčním vzorkem;
  - c) typem použitého přístroje vířivých proudů.

Závislost mezi teplotou a měrným odporem kovu lze vyjádřit pomocí následující rovnice (Rov. 1):

$$R_t = R_0(1 + \alpha T) \quad (\text{Rov.1})$$

kde:

$R_t$  měrný odpor kovu při zkušební teplotě;

$R_0$	počáteční měrný odpor kovu;
$\alpha$	teplotní součinitel;
$T$	rozdíl teplot.

Z rovnice vyplývá, že při zvýšení teploty se zvyšuje měrný odpor a klesá vodivost. Opačně, pokud se teplota snižuje, měrný odpor se snižuje a vodivost se zvyšuje.

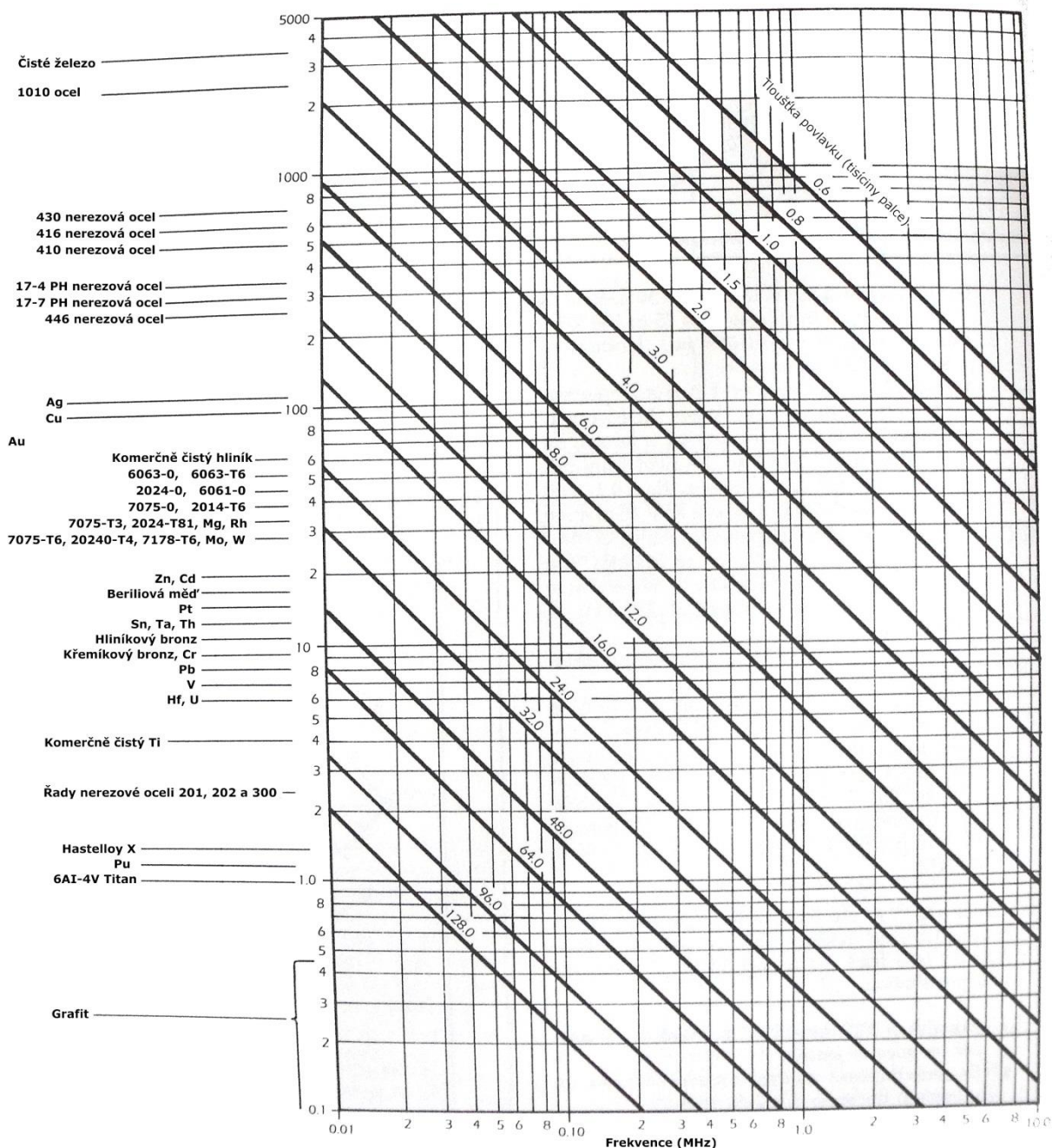
### 3.2.5 Zkoušení vodivých a nevodivých povlaků

V leteckém průmyslu je poměrně velké zastoupení kovových částí, které jsou pokryty různými povlaků k zajištění speciálních povrchových vlastností dané části, jako jsou např. odolnost proti korozi, opotřebení či zlepšení vzhledu. Tyto povlaky jsou na vodivý základní materiál aplikovány různými metodami, mezi které patří elektrolytické pokovování, pokovení ponorem, plátování a naprašování.

Existují čtyři základní typy povlaků a základních materiálů, které jsou vhodné pro zkoušení vířivými proudy. Základní klasifikace jednotlivých kombinací materiálů je následující:

1. kovový povlak na nevodivém základním materiálu (podkladu) např. kovová tenká vrstva na skle, keramice nebo plastu;
2. kovový plát s vyšší vodivostí, než má základní kov např. měď, zinek nebo kadmium na oceli nebo čistý hliník na hliníkové slitině (Alclad);
3. kovový plát s nižší vodivostí, než má základní kov např. nikl na hliníku;
4. nevodivý povlak na kovovém základním materiálu např. anodická tenká vrstva nebo barva na hliníku nebo jiné organické povlaky na kovech.

S měřením tlouštěk povlaků jsou spojené základní fyzikální hodnoty, kterými jsou hodnota vodivosti a permeability. Tyto veličiny ( $\sigma_1\mu_1$ ) jedné vrstvy by měla být alespoň 1,5krát větší než hodnota vodivosti a permeability ( $\sigma_2\mu_2$ ) druhé vrstvy. Hodnota vodivosti pro izolanty jako jsou vzduch, keramika, sklo a barvy je rovna nule. Relativní hodnota permeability neferomagnetických materiálů je rovna 1. Hodnoty vodivosti (v % IACS) a permeability jako funkce frekvence pro různé druhy materiálů jsou uvedeny na Obr. 3.16. Pokud se měří povlaky na vodivém podkladu, tak celková tloušťka základního materiálu, včetně povlaku (pokud je vodivý), by měla být minimálně tři standardní hloubky vniku vířivých proudů.



Obr. 3.16 Graf pro určení použitelnosti metody vířivých proudů a zkušební frekvence pro různé vodivé a feromagnetické materiály [7]

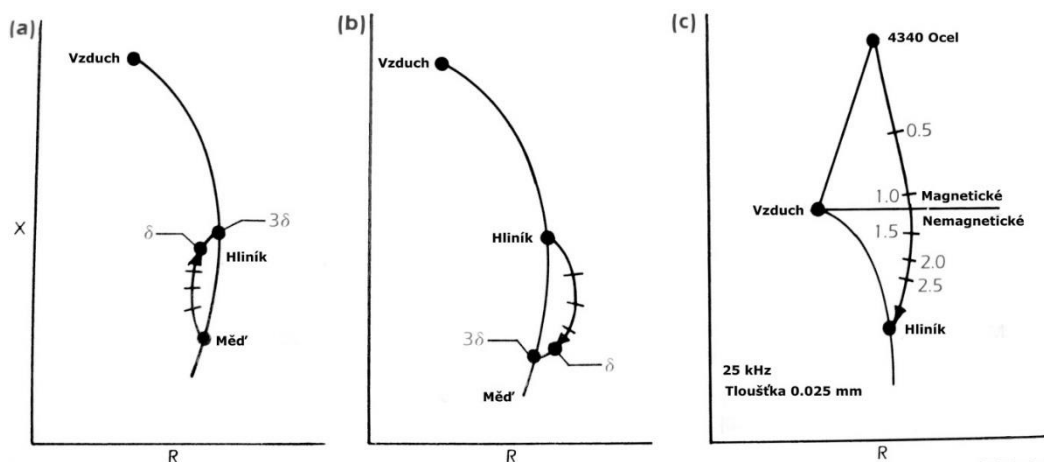
### Měření tloušťky vodivé vrstvy na vodivém podkladě

Měření tloušťky vodivého povlaku se využívá v zásadě ve dvou případech, kde se vodivosti dvou kovových vrstev liší. V prvním případě je vodivost vrstvy vyšší, než je vodivost základního materiálu (podkladu). Ve druhém případě je tomu naopak. Tuto tloušťku kovových povlaků lze určit experimentálně dle vzájemného působení indukovaného pole cívky a pole vybuzeného v materiálu (princip vířivých proudů). Na Obr. 3.17a) je zobrazen průběh posunu koncového bodu impedance cívky v impedanční rovině pro vodivý povlak nižší vodivosti na podkladu vyšší vodivosti.

Jestliže měděný podklad je pokrytý vrstvou hliníku, tak impedance cívky se posune vzhůru a doleva ve směru hodinových ručiček. Impedance se blíží k efektivní hloubce vniku  $3\delta$  odpovídající vrstvě hliníku. Pokud na hliník jako podklad je nanášena vrstva mědi, dochází zde k posunu bodu impedance cívky směrem dolů a doprava. Tento pohyb bodu impedance se zvyšováním tloušťky není úměrný tloušťce, jelikož odchylka pro dané změny tlouštěk se mění pomaleji než dané hodnoty tlouštěk. Bod impedance tedy odpovídá tloušťce, která je přibližně rovna standardní hloubce vniku  $\delta$  (viz Obr. 3.17b). Poté se bod impedance rychle blíží k efektivní hloubce vniku  $3\delta$  odpovídající vrstvě mědi.

Důležitým poznatkem z hlediska měření tloušťky vodivých povlaků na vodivém podkladě je, že křivky na Obr. 3.17a a Obr. 3.17b se spirálovitě zakřivují ve směru hodinových ručiček. V obou případech počátek dané křivky odpovídá přibližně rovné linii, ale jakmile dojde ke zvyšování tloušťky, začne se spirála zakřivovat. Stupeň zakřivení a tvar křivky se mění s hodnotou pracovní frekvence.

Mimo dva základní případy, kde se vodivosti dvou kovových vrstev významně liší, existuje případ nemagnetického povlaku na magnetickém podkladu – vrstva hliníku na oceli (viz Obr. 3.17c). V tomto případě se hodnota induktivní reaktance snižuje v nelineárním tvaru.



Obr. 3.17 Vliv tloušťky povlaku na průběh posunu koncového bodu v impedanční rovině [7]

### **Měření tloušťky nevodivé vrstvy na vodivém podkladě**

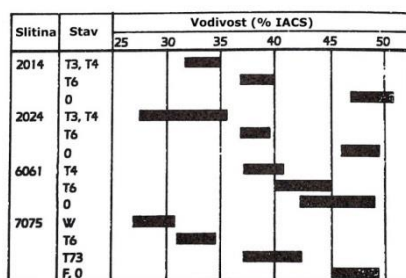
Princip měření tloušťky nevodivé vrstvy na vodivém základním materiálu vychází ze změny velikosti indukovaného pole vířivých proudů (oddálení). Poměrovým měření lze podle polohy koncového bodu vektoru napětí určit a vyhodnotit jednotlivé změny polohy bodu odpovídající různým tloušťkám nevodivých povlaků. Základem je referenční vzorek o známé tloušťce nevodivého povlaku na podkladovém vodivém materiálu. Pracovní frekvence se pohybuje v rozmezí cca desítky až stovky kHz (20 kHz – 500 kHz). V tomto případě záleží na použité sondě a materiálu.

### ***Měření tloušťky vodivé vrstvy na nevodivém podkladě***

Princip je založen na stejné fyzikální podstatě jako v případě nevodivé vrstvy na vodivém podkladě s tím rozdílem, že se používají vyšší pracovní frekvence v rozmezí 1 MHz – 10 MHz.

### **3.2.6 Třídění hliníkových slitin**

Elektrická vodivost hliníkové slitiny je dána jejím chemickým složením a zpracováním. Tudíž zkoušení vodivosti zajišťuje pro vířivé proudy jedinečnou možnost třídít různé druhy slitin nebo slitiny, jejichž vlastnosti mohly být změněny vlivem různých tepelných procesů. Třídění je tedy založeno na měření vodivosti těchto slitin. Omezení v měření vodivosti nastává, pokud dojde k přesahu měrných odporů u dvou nebo více slitin. Rozsahy vodivostí jednotlivých hliníkových slitin jsou zobrazeny na Obr. 3.18. Z obrázku jsou patrné jednotlivé přesahy vodivostí. Například hliníkové slitiny 2014-T6, 2024-T6 a 6061-T4 nemohou být rozlišeny pomocí měření jejich vodivosti, jelikož jejich rozsahy měrných odporů jsou téměř identické. V mnoha případech je pak zapotřebí k jejich identifikaci provést zkoušku tvrdosti. V Tab. 3.2 je uveden rozsah hodnot vodivosti a tvrdosti pro různé hliníkové slitiny [7].



Obr. 3.18 Rozsahy vodivostí tvářených hliníkových slitin [7]

Letecké konstrukční materiály jsou tvářeny za účelem získání vyšší pevnosti či získání požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností. Vliv tepelného zpracování jako je proces stárnutí používaný ke zvýšení pevnosti slitiny, je spojený s fyzikálními vlastnostmi slitin a jejich elektrickými vodivostmi. Při tomto typu tepelného zpracování obvykle měrný odpor klesá a elektrická vodivost stoupá.

Přímý vztah mezi vodivostí, tvrdostí a pevností vlivem tepelného zpracování je založen na metalurgických principech. Některé dokumenty se zabývají velmi rozsáhlou studií o procesu přestárnutí hliníkových slitin. Tyto studie zcela jasně ukazují, že vodivostní zkoušení pomocí metody vířivých proudů je efektivní nástrojem v zjišťování tepelných poškození u hliníkových slitin. Tyto procedury zkoušení jsou popsány v SAE ARP 891B a MIL-STD-1537. V těchto předpisech jsou popsány dvě metody vyhodnocení. Při absolutním měření jsou kontrolovány konkrétní body v oblasti zájmu a přístroj je kalibrován na referenčních vzorcích vodivosti. Při relativním měření jsou kontrolovány velké plochy za účelem určení rozpětí vodivosti [7].



Slitina	Stav	Vodivost (% IACS)	Tvrđost Rockwell E stupnice	Tvrđost Rockwell B stupnice
2014	0	43,50 - 51,10	70 max	22
	T3, T4	31,50 - 35,00	95	65
	T6	35,00 - 41,50	102	78
2024	0	46,00 - 51,00	70 max	22 max
	T3	28,50 - 32,50	94	63
	T4	28,50 - 34,00	94	63
	T6	34,00 - 44,00	98	72
	T72	38,00 - 45,00	98	72
	T8	35,00 - 42,50	99	74
6061	0	42,00 - 49,00	-	-
	T4	35,50 - 43,00	60	-
	T6	40,00 - 47,00	85	-
7075	0	44,00 - 50,00	70 max	22 max
	T6	30,50 - 36,00	106	84
	T73	40,00 - 43,00	102	78
	T76	38,00 - 42,00	104	42

Tab. 3.2 Typické rozsahy hodnot vodivosti a tvrđosti pro různé hliníkové slitiny [7]

Na závěr této kapitoly je v Tab. 3.3 zobrazen všeobecný přehled metody vířivých proudů z hlediska základních charakteristik.

Hledisko	Komentář
<p><b>Fyzikální princip</b></p> <p>Indukované elektrické pole (10 Hz až 10 MHz) je rozrušeno nespojitostmi vytvářející magnetické pole, které ovlivňuje induktivní reaktanci sondy.</p>	<p>Vířivé proudy jsou citlivé na vodivost, permeabilitu a geometrii zkoušeného součásti. Jednoduché nebo vícevrstvé cívky a sensory se využívají k vybuzení pole a detekci změn v materiálu.</p>
<p><b>Aplikace</b></p> <p>Detekce nespojitostí na povrchu a pod povrchem jako jsou trhliny, koroze, inkluze a další poškození v materiálech.</p> <p>Měření tloušťky</p> <p>Měření elektrické vodivosti z hlediska třídění slitin a tepelného poškození.</p>	<p>Kontrola vodivých materiálů z hlediska přítomnosti trhlín, koroze, poškození, povlaků nebo jiných změn na povrch nebo těsně pod povrchem daného materiálu.</p> <p>Hloubka vniku vířivých proudů závisí na frekvenci a velikosti cívky. Nižší frekvence a větší cívky jsou používány pro vyšší hloubku vniku.</p> <p>Rozlišení je ovlivněno frekvencí, vyšší frekvence s menšími cívkami zvyšují rozlišení.</p>
<p><b>Výhody</b></p> <p>Velmi rychlá a finančně nenákladná metoda pro povrchovou a podpovrchovou detekci poškození. Lze konfigurovat celou škálu různých typů cívek.</p>	<p>Bezkontaktní technologie bez nutnosti použití vazebního prostředku.</p> <p>Provedení cívky a magnetických sensorů lze vyvinout dle účelu použití metody vířivých proudů.</p>
<p><b>Omezení</b></p> <p>Použití pro vodivé materiály.</p> <p>Hloubka vniku vířivých proudů je závislá na frekvenci a vodivosti.</p>	<p>Magnetické materiály ovlivňují citlivost.</p> <p>Velikost oddálení cívky (lift-off) od povrchu a od změn nerovností povrchu ovlivňuje měření.</p>
<p><b>Zkoušená součást</b></p> <p>Polymery vyztužené vlákny (FRP)</p> <p>Odlitky</p> <p>Výkovky</p> <p>Obrobené části</p> <p>Spoje</p> <p>Svarové spoje</p> <p>Povlaky</p> <p>Motory a součásti</p> <p>Podsestavy</p> <p>Provoz</p>	<p><b>Předmět kontroly</b></p> <p>Vířivé proudy nejsou běžně používány ke kontrole kompozitů, ale lze jimi detekovat změny v kompozitní struktuře, pokud matrice nebo vlákna jsou vodivá.</p> <p>Trhliny, přeložky, lemy, trhliny za tepla, staženiny (lunkry), inkluze</p> <p>Trhliny, inkluze</p> <p>Trhliny, inkluze</p> <p>Trhliny, koroze</p> <p>Trhliny, studené spoje, pórovitost</p> <p>Tloušťka, degradace</p> <p>Trhliny, třídění materiálu, tepelné zpracování</p> <p>Trhliny</p> <p>Únavové trhliny, koroze, ztenčování materiálu</p>

Tab. 3.3 Všeobecný přehled metody vířivých proudů [4]

### 3.3 Aplikace metody vířivých proudů u kompozitních materiálů

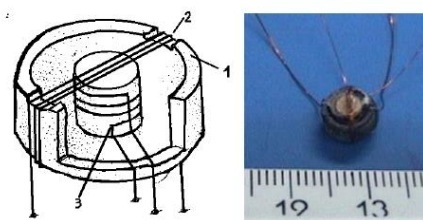
#### 3.3.1 Uhlíkové kompozity

Kompozity ve srovnání s kovovými materiály vykazují řadu výhod, mezi které dle [10] patří:

- vysoká pevnost v tahu
- nízká hustota
- nízký koeficient tepelné roztažnosti
- absence jevů specifických pro únavové stavy
- možnost relativně jednoduché výroby vrstevnatých struktur

Použití metody vířivých proudů lze vysvětlit na příkladu využití vlákna Kevlar pro výrobu neprůstřelných bund. Vlákna Kevlar mají schopnost zastavit kulku vypálenou z malé ráže či velké vzdálenosti. Tento náraz s malou energií způsobí, že textura se otevře a vlivem pružnosti vláken tuto nízkou energii střely absorbuje. Ovšem při dopadu střely s vysokou energií, kulka pronikne do první vrstvy, ta se lokálně zahřeje a místní tepelné poškození způsobí změnu v ukládání uhlíku. Tohoto jevu lze pozitivně využít ve prospěch vířivých proudů, které jsou schopné lokální tepelné změny indikovat. Z hlediska návrhu snímače lze použít:

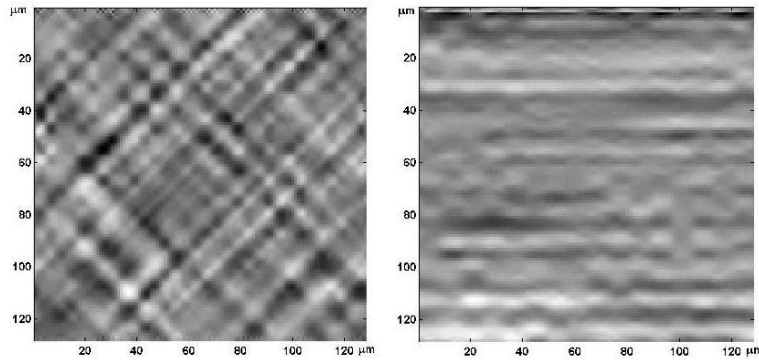
- absolutní snímač pracující ve přijímovém/vysílacím režimu při optimální pracovní frekvenci 6 MHz
- feritové hrníčkové jádro o relativní permeabilitě 12



Obr. 3.19 Snímač vířivých proudů (1-feritové jádro, 2-přijímací cívka, 3- vysílací cívka) (vlevo), skutečná podoba (vpravo) [10]

Pro účel ověření snímače lze vyrobit uhlíkové kompozitní vzorky, které mohou obsahovat 16 vrstev uhlíkových vláken o průměru 20  $\mu\text{m}$  s orientací  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ .

Strukturu uhlíkových vláken lze také zobrazit pomocí C-skenu (viz Obr. 3.20). Z obrázku je patrné, že lze využít snímač vířivých proudů, který je schopen zjistit orientaci uhlíkových vláken v kompozitu s epoxidovou matricí. Při zkoumání textury Kevlar, kdy z elektrického hlediska se jedná o izolant, se při tepelném poškození vlákna vysokou energií objeví oblasti bez přítomnosti uhlíku.



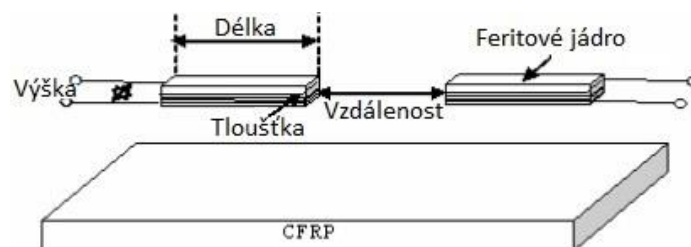
Obr. 3.20 Odezva snímače: vlákno orientované  $+45^\circ$  (vlevo), vlákno orientované  $0^\circ$  (vpravo) [10]

Mezi další uhlíkové kompozity patří již zmiňované polymery vyztužené uhlíkovými vlákny CFRP. U těchto kompozitních materiálů je pozorován vztah mezi signály z různých typů snímačů a mikrostrukturou vzorků těchto uhlíkových kompozitů [11].

Návrh celého diagnostického systému je založen na základním vztahu vzájemné indukčnosti  $M$ , kde cívka představuje indukčnost  $L_1$  a naindukované proudy v materiálu  $L_2$ .

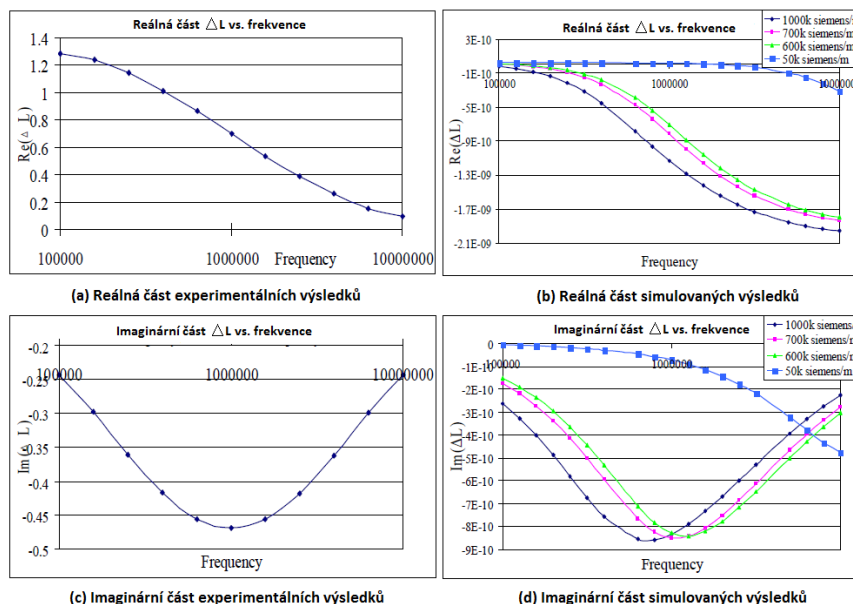
Důležitý parametry jako je elektrická vodivost uhlíkového kompozitního materiálu, resp. její ekvivalentní velikost, lze měřit experimentálně nebo analyticky na základě metody tzv. „Deeds and Dodd’s“, která poskytuje základy pro predikci a detekci lomu vlákna a materiálové vady. Vodivost kompozitního materiálu je dána vodivostí jednotlivých vláken a podílem objemu vláken. Experimentálně bylo prokázáno, že odpor CFRP se zvyšuje, pokud dochází k výskytu interních poškození, jako jsou zlomená vlákna a delaminace [11]. K zjišťování ekvivalentní velikosti elektrické vodivosti lze použít kruhovou vzduchovou cívku s 15 závitů.

K detekci směru vláken, zejména u jednosměrných kompozitů, je využíváno anisotropie elektrické vodivosti vláken. K této detekci lze využít rotační sondu, která je složena ze dvou totožných obdélníkových cívek s 5 závitů navinutých na feritovém jádře zapojené jako vysílač/přijímač (viz Obr. 3.21). Rozsah frekvenčního spektra se pohybuje v rozmezí od 100 kHz do 10 MHz.



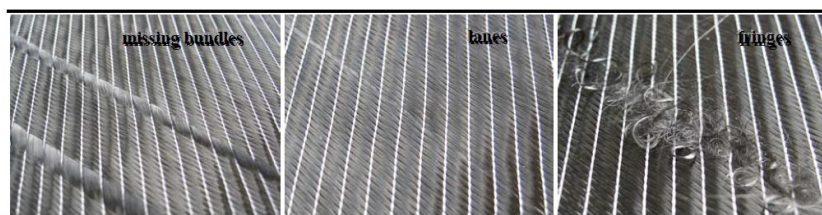
Obr. 3.21 Zobrazení rotační sondy k detekci směru vláken [11]

Celé analytické a experimentální měření lze nasimulovat s cílem prokázat propojení sond a vzorků a také podpořit experimentální metodu. Jak lze pozorovat z Obr. 3.22, oba experimentální a simulační výsledky ukazují dobrou shodu s analytickým řešením „Deeds and Dodd’s”. A navíc, lze jasně pozorovat vliv změny vodivosti vláken na metodu vířivých proudů, která je citlivá na strukturální modifikace jako jsou zlomené vlákno či inter-laminární delaminace.



Obr. 3.22 Výsledky měření vodivosti [11]

Vzhledem k tomu, že v dnešní době se častěji vyskytují více vrstvé kompozitní materiály, je nutné k zajištění vysoké kvality a spolehlivosti kontroly vyvinout účinný a spolehlivý zkušební systém pro přímou kontrolu materiálů RCF a CFRP. Skryté vady, které mohou vzniknout během výroby, mohou mít dalekosáhlé důsledky s vysokým rizikem poškození produktu či konstrukce nebo představovat zvýšení nákladů související s likvidací produktu po obrábění. Mezi typické vady patří chybějící svazky, pruhy způsobené překrytím nebo třepením (viz Obr. 3.23). V současné době je kontrola pro jedno či dvou vrstvé materiály realizována ruční kontrolou nebo automatizovanou optickou kontrolou [12].



Obr. 3.23 Typické nespojivosti v RCF a CFRP kompozitních materiálech [12]

Jak již bylo řečeno v předešlých kapitolách, materiály z uhlíkových vláken vykazují nízkou elektrickou vodivost. Nicméně je postačující pro změření odchylky

vodivosti materiálu pomocí metody vířivých proudů. Pro zjišťování sktruktury kompozitních materiálů lze použít vysoce přesný manipulátor skenující ve směrech XY, umožňující zobrazení odezvy vířivých proudů v časovém diagramu nebo v zobrazení C-sken [12].

Dle [12] lze k sestavení snímače využít různých typů senzorů jako jsou absolutní, diferenciální a kompenzační. Jako optimální se jeví absolutní na půl vysílací anizotropní typ s 20 závitů tak, jak je zobrazeno na Obr. 3.24. Aby se mohla zvýšit rychlost skenování byly vytvořena sonda na bázi pole vířivých proudů s 16 páry jednotlivých senzorů (viz Obr. 3.24)

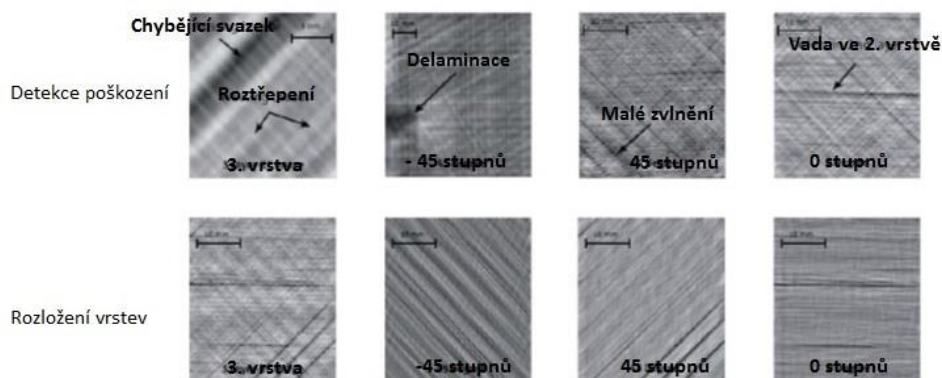


Obr. 3.24 Ukázka anizotropního senzoru (vlevo), 16 párového senzoru (vpravo) [12]

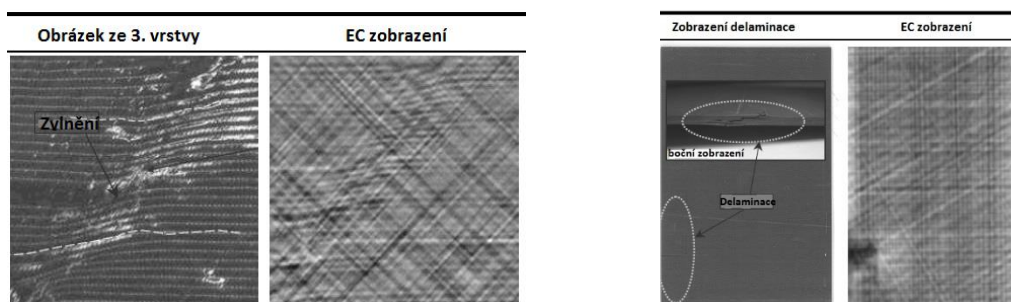
Pro kontrolu RCF a CFRP vzorků se jeví optimální rozsah pracovní frekvence od 2 MHz do 10 MHz. Necelistvosti a charakteristiky, které lze odhalit jsou [12]:

- delaminace
- zlomení vlákna
- chybějící svazek
- třepení,
- orientace vláken
- impakty
- různá zvlnění

Ukázky zobrazení jednotlivých poškození u vzorků RCF jsou zobrazeny na Obr. 3.25 a u vzorků CFRP na Obr. 3.26.

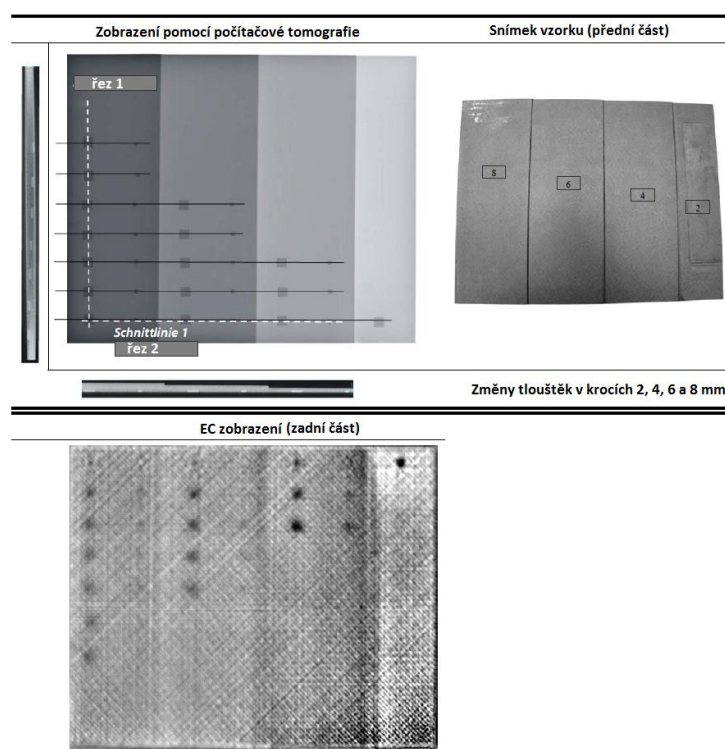


Obr. 3.25 Ukázka zobrazení jednotlivých poškození pomocí zobrazení C-sken [12]



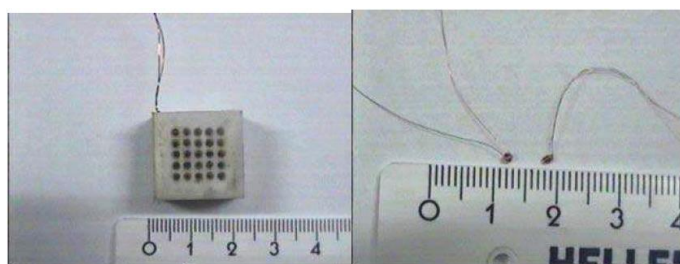
Obr. 3.26 Ukázka zvlnění ve 3. vrstvě (vlevo), delaminace (vpravo) [12]

Parametry hloubka vniku patří mezi jeden z nejdůležitějších parametrů vířivých proudů. Jak již bylo řečeno tento parametr je spjatý s hodnotou pracovní frekvence, elektrickou vodivostí a permeabilitou. Na Obr. 3.27 je zobrazen snímek kontrolovaného schodovitého vzorku různých tloušťek pomocí počítačové tomografie a pomocí vířivých proudů. Z výsledků ovšem není jasné, v jaké hloubce se nespojitosti nacházejí. Také vzorek pro kontrolu vířivými proudy je kontrolován z druhé strany vzorku.



Obr. 3.27 Charakterizace hloubky vniku vířivých proudů [12]

Dle [2] lze senzor na bázi pole vířivých proudů realizovat pomocí vysílací cívky o 100 závitů. Přijímač obsahuje dvě pole o velikosti 5x5 s identickými cívkami, jejichž vnější průměr je 2 mm a vzdálenost mezi středy cívek je 2,4 mm.



*Obr. 3.28 Senzor pole vířivých proudů 5x5 (vpravo), přijímací cívky (vpravo) [2]*

Tento snímač lze aplikovat na zkoušení desek z uhlíkových kompozitů impaktovaných nízkou energií. Pro experiment lze použít kompozitní desky obsahující dva typy umělých vad:

1. delaminaci vytvořenou tenkovrstvou teflonovou páskou o rozměrech 2x2x0,1 mm vloženou mezi vrstvy uhlíkových vláken při výrobě desek; a
2. zlomené vlákno, které je nasimulováno příčným uložením uhlíkových vláken. Toto zlomení se může objevit zejména v důsledku působení vysokoenergetického rázu.

I v tomto případě zkoušení uhlíkových kompozitů prokazuje způsobilost metody pole vířivých proudů (ECA). Využití těchto sensorových polí společně s rozlišovací procedurou, jako je zpracování signálu, vede ke zlepšení odstupu signálu od šumu. Je třeba zdůraznit, že touto metodou lze odhalit i malé rozměry delaminací a zlomení uhlíkových vláken.



## 4 ZÁKLADNÍ ASPEKTY PRO KONTROLU UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ VÍŘIVÝMI PROUDY

V dnešní době se přední letečtí výrobci snaží o přenesení kombinace provozních výhod kompozitních materiálů společně s kovovými materiály. Podílejí se na vývoji a výzkumu ultra lehkých slitin souběžně s kompozity. Stejně jako u kovových materiálů se u kompozitních konstrukcí vyskytují poškození vznikající při nárazovém či únavovém zatížení. Poškození, která se nacházejí uvnitř konstrukce, jsou obtížně sledovatelná, zejména vlivem tvaru, velikosti či přístupu ke konstrukci za provozu a vlivem omezení dané nedestruktivní metody kontroly. Tudíž velikost celého poškození může být podhodnocena. Správné vyhodnocení poškození a ověření poškození v kompozitní konstrukci, která vykazuje často komplikované mechanické chování, je důležité pro bezpečný návrh konstrukce a pro stanovení její životnosti a s ní spojených inspekčních intervalů.

Vývoj pokročilých diagnostických systémů, které jsou schopny jednoduše detekovat a identifikovat degradaci materiálu v uhlíkových kompozitech, tak aby byla zaručena jakost kvality „bez defektu“ při výrobě a spolehlivá kontrola při údržbě letounu, je novou výzvou pro různé metody nedestruktivního zkoušení.

### 4.1 Základní charakteristika elektrických vlastností uhlíkových kompozitů

Při aplikaci metody vířivých proudů na uhlíkové kompozitní materiály musí být zajištěny tyto aspekty:

- Elektrická vodivost výztuhy
- Potlačení šumu

Prvním nejdůležitějším aspektem, který je nutný, aby bylo možné použít metodu vířivých proudů, je elektrická vodivost výztuhy kompozitního materiálu. Bez této skutečnosti nelze metodu vířivých proudů použít, jelikož nedojde ve zkoušeném materiálu k naindukování vířivých proudů. Elektrické vlastnosti uhlíkových kompozitních materiálů závisí na typu uhlíkových vláken a jejich objemového podílu v materiálu. Elektrická vodivost v příčném směru se pohybuje mezi 10 až 100 S/m a v podélném směru mezi  $5 \times 10^3$  až  $5 \times 10^4$  S/m [2]. Elektrická vodivost kompozitu je tedy dána vodivostí jednotlivých vláken, pořadím skládání vrstev a objemovým podílem vláken v materiálu [4]. V případě nízkoenergetického nárazu je sice kompozit elasticky deformován, ale nedochází u něj k žádné lokální změně v elektrické vodivosti. Avšak v malé oblasti může dojít k odlepení vláken od matrice z epoxidové pryskyřice. Nízkoenergetické nárazy mohou být v principu detekovány ultrazvukovými metodami, jako je akustická mikroskopie. Ovšem nelze na ně aplikovat elektromagnetické metody. Vysokoenergetické dopady způsobují poškození, jako jsou delaminace, odchylky a/nebo zlomení uhlíkových vláken. V tomto případě dochází k lokální změně v elektrické vodivosti, a tudíž tato poškození lze detekovat nejen ultrazvukovými metodami, ale i metodami elektromagnetickými [2]. Pro elektricky vodivé materiály, konstrukce či podsestavy

je metoda vířivých proudů běžně předepisována jako standardní metoda pro kontrolu při údržbě leteckých konstrukcí. Této anizotropie elektrické vodivosti uhlíkového vlákna lze tedy využít pro základní aspekt k zajištění funkčnosti metody vířivých proudů.

Dalšími aspekty jsou počet vrstev a zejména orientace uhlíkových vláken. Ty mají zásadní vliv na diagnostiku z hlediska velikosti šumu. Kontrola má vysokou přesnost z hlediska rozlišovací schopnosti signálů (poměr signál/šum) tam, kde je signál šumu dobře oddělený od signálu vady. Kde je signál vady shodný se signálem šumu je rozlišovací schopnost velmi malá a danou kontrolu nelze brát za relevantní. Všechny elektrické vodiče obsahují volné elektrony, které jsou ve stálém tepelném nepravidelném pohybu. Může se ale stát, že v jednom nebo druhém směru se bude pohybovat více elektronů a vzniklé napětí, které se libovolně mění, se pak stává zdrojem šumu, rozloženého v celém kmitočtovém pásmu. Velikost tepelného šumu se vyjadřuje výrazem [29]:

$$\bar{u}^2 = 4k\Theta \int_{f_1}^{f_2} R df \quad (\text{Rov. 2})$$

- $\bar{u}$  je efektivní hodnota šumového napětí v kmitočtovém pásmu od  $f_1$  do  $f_2$
- $k$  Boltzmannova konstanta, rovná  $1,374 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$
- $\Theta$  absolutní teplota [ $^\circ\text{K}$ ]
- $R$  činná složka impedance, na níž se pozoruje tepelný šum
- $f$  kmitočet [Hz]

Je-li impedance tvořena činnými a reaktančními složkami, pak je druhá mocnina efektivního šumového napětí úměrná činné složce impedance. Dále je úměrný šířce kmitočtového pásmu a nezávisí na poloze tohoto pásmu v kmitočtovém spektru. Šum při průtoku proudu vrstvou uhlíku je mnohem větší, než šum tvořený tepelným pohybem volných elektronů. Napětí šumu je totiž úměrné proudu a má snahu vzrůstat rychleji než odpor. Výsledná hodnota šumu se pak skládá ze šumu struktury materiálu tedy i tepelného šumu uhlíku, šumu výkonových zesilovačů a předzesilovačů přístroje a dalších elektronických obvodů a šumu samotné sondy. Je tedy nutné, aby byl zajištěn, co největší odstup signál od šumu [29].

## 4.2 Základní charakteristiky

Do systému základních charakteristik pro návrh snímače vířivých proudů patří veličiny závislé a nezávislé proměnné. Nezávislé proměnné veličiny, lze kategorizovat z hlediska:

a) Charakteristiky kompozitu:

- Výztuha kompozitu – jaký objemový podíl bude představovat vodivá složka výztuhy. Tento parametr úzce souvisí s vodivostí materiálu, a tudíž s naindukováním vířivých proudů ve zkoušeném materiálu.

- Matrice kompozitu – účelem matrice je spojovat výztuhu a chránit ji před vlivy okolí. Důležitými parametry pro zkoušení jsou tloušťka a druh použitého materiálu. Předpokladem je, že matrice bude nevodivá.
  - Uspořádání (orientace) vláken – vliv na diagnostiku z hlediska šumu a rozlišovací schopnosti snímače
  - Počet vrstev – vliv na hloubku vniku vířivých proudů. Tento parametr úzce souvisí s použitou frekvencí.
- b) Charakteristiky snímače vířivých proudů:
- Počet závitů – vliv na velikost vlastní indukčnosti cívky
  - Cívka s jádrem/bez jádra – vliv na velikost vlastní indukčnosti cívky
  - Činitel zaplnění – tento parametr má vliv na citlivost snímače. Určuje míru magnetické vazby mezi snímačem a zkoušeným předmětem. Má vliv na velikost a rozložení magnetického pole.
  - Typ snímače – závisí na tvaru zkoušeného předmětu, přístupu ke zkoušenému předmětu, účelu zkoušení a požadavcích na citlivost, rozlišovací schopnosti
  - Typ módu zapojení cívek – volba mezi zapojením absolutním, diferenčním a typu přijímač-vysílač
  - Provedení snímače – jedná se o volbu mezi koncepcí s budící a snímací cívkou nebo provedení snímače pomocí pole vířivých proudů ECA. Dále, zda snímač bude stíněný nebo nestíněný, aby došlo ke koncentraci pole ve zkoušeném materiálu, a tak se zvýšila citlivost.

Závisle proměnné veličiny lze kategorizovat následovně:

- Elektrická vodivost – závisí na materiálu výztuže a matrice. Změnu vodivosti způsobují nespojitosti přítomné ve zkoušeném materiálu nebo změna struktury materiálu.
- Impedance cívky – je funkcí frekvence a indukčnosti, která souvisí s geometrickými parametry cívky. Změnu impedance způsobují magnetická permeabilita a deformace toku vířivých proudů.
- Oddálení cívky (lift-off) – souvisí se zapojením cívek a činitelem zaplnění.
- Pracovní frekvence – závisí na vodivosti (materiál výztuhy a matrice), hloubce vniku vířivých proudů (tloušťka zkoušeného předmětu, počet vrstev), počtu závitů, cívkce s jádrem/bez jádra

### 4.3 Návrh koncepce způsobu řešení

Lze zvolit dva způsoby řešení – přímý a nepřímý.

Při zvolení přímého způsobu, bude návrh snímače vířivých proudů řešen pomocí analyticko-experimentální metody. U experimentální metody je důležitá přítomnost etalonu s umělými vadami, vyrobeného ze zkoušeného materiálu. V tomto experimentálním přístupu je optimalizace elektrických a mechanických parametrů cívky (rozměr cívky či rozsah pracovní kmitočtu) obvykle optimalizován porovnáním detekce citlivosti na uměle nebo přirozeně vytvořených necelistvostí. Tento snímač je pak obvykle laděn přímo na konkrétních vzorcích se známými a neznámými defekty, přičemž výsledky jsou vyhodnoceny a použity pro další úpravu celkové konfigurace snímače vířivých proudů.

Při použití druhého způsobu řešení, nepřímého, lze celé chování snímače vířivých proudů na kompozitních materiálech nasimulovat pomocí numerické metody konečných prvků MKP. Tento princip simulace vzniklého elektromagnetického pole, resp. naindukovaných vířivých proudů, lze pak následně využít pro teoretické a podpůrné účely návrhu. Vzhledem k finanční náročnosti na pořízení softwaru a dlouholetým zkušenostem vyplývající z návrhu snímačů ve společnosti INDETEC ndt, s.r.o. a dispozici celé řady referenčních vzorků obsahující uměle i přirozeně se vyskytující necelistvosti zapůjčených od společností Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. a LATECOERE Czech Republic s.r.o. byl zvolen přímý způsob řešení, tedy analyticko-experimentální a od simulace bylo pro účely návrhu snímače v tuto chvíli upuštěno. Tento způsob řešení se ponechává pro další vývoj.

## 5 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této práce je navrhnout a sestavit snímač vířivých proudů, který bude schopen odhalit necelistvosti (zejména delaminaci, zlomení vlákna, trhlinu) ve vodivých kompozitních materiálech, případně zjistit další vlastnosti materiálu, jako je např. orientace vláken v matrici. Mělo by se jednat o rychlou, spolehlivou a nákladově efektivní techniku zkoušení aplikovatelnou v různých provozních i výrobních podmínkách.

Hlavní cíl práce:

- Navrhnout a sestavit snímač vířivých proudů pro kontrolu vodivých kompozitních materiálů (zejména CFRP)
- Snímač navrhnout v klasické koncepci zkoušení s budicí a snímací cívkou tak, aby byla zajištěna přesnost, rozlišitelnost a opakovatelnost zkoušení

Dílčí cíle práce:

- Optimalizovat elektrické i mechanické parametry navržené cívky
- Ověřit a stanovit vliv stínících prvků na vlastnosti cívky
- Zpracovat a vyhodnotit experimentální měření v závislosti na veličinách vstupujících do základních charakteristik systému
- Zhodnotit na základě experimentů vhodnost využití pole vířivých proudů ECA (zkoušení s elektronicky řízenými cívkami umístěných vedle sebe)

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A TECHNIKA

### 6.1 Návrh vysokofrekvenční sondy vířivých proudů

Každá aplikace z hlediska volby frekvenčního pásma pro zkoušení má svůj rozsah pracovní frekvence, při které lze dosáhnout požadované hloubky vniku vířivých proudů, a tak zajistit maximální schopnost detekce nespojitostí u kovových materiálů. Pro detekci nespojitostí, zejména pak trhlin ve vícevrstvých spojích nebo ve větších tloušťkách kovových materiálů, je nutné zvolit nízké pracovní frekvence stovky Hz až jednotky kHz. Naopak pro povrchové zkoušení se volí vyšší až vysoké pracovní frekvence desítky kHz až jednotky MHz. Tato závislost vychází z hloubky vniku vířivých proudů (viz Kap. 3.1) a účelu použití. Než došlo k samotnému návrhu snímače vířivých proudů pro uhlíkové kompozitní materiály, muselo se v první fázi rozhodnout, jaké frekvenční pásmo se zvolí. Po úplně jednoduchém testu se standardními, na trhu dostupnými nízkofrekvenčními a vysokofrekvenčními sondami (do cca 5 MHz) se standardními konfiguracemi provedení a zapojení cívek bylo zjištěno, že tyto sondy nevyhovují a nejsou schopny zjistit nespojitosti v uhlíkových kompozitních materiálech. Tudíž na základě tohoto poznatku a provedených rešerší na toto téma se došlo k závěru, že se musí jednat o vysokofrekvenční cívku s určitou konfigurací, která bude pracovat ve vyšším rozsahu, než je 5 MHz.

Jednovrstvé cívky představují nejjednodušší formu indukčnosti a používají se právě pro vyšší frekvence. Každá cívka má svojí vlastní indukčnost, jejíž hodnotu lze měnit průměrem cívky, počtem závitů, typem a průměrem drátu vhodného pro vinutí a typem jádra. Nejčastěji se vysokofrekvenční cívky vinou na tělíska s železovým nebo feritovým jádrem závit vedle závitu. Cívky s železovým jádrem nebo feritovým jádrem mají oproti vzduchovým cívkám tu výhodu, že vlivem silnějšího magnetického pole lze dosáhnout zvětšení vlastní indukčnosti při menších rozměrech cívky s menším počtem závitů. Menší počet závitů znamená menší činný odpor, tedy i menší ztráty cívky. Ferity vynikají navíc tím, že mají velký měrný odpor, tudíž při nízké frekvenci mají při velké počáteční permeabilitě, která může dosáhnout zhruba až 2000, malé ztráty vířivými proudy. Ta ovšem klesá se vzrůstající frekvencí. Tohoto jevu se využívá zejména pro konstrukci cívek pro střední kmitočty. Také mají několikanásobně větší permeabilitu oproti železovým materiálům, což při konstrukci umožňuje miniaturizaci vf cívek. Pro návrh vysokofrekvenční cívky se využije silného magnetického pole feritů. Ferity umožňují tedy značné změny v indukčnosti a zamezují saturaci zkoušeného materiálu. Při optimalizaci počtu závitů lze využít například feritového nebo železového jádra ke zvýšení indukčnosti zasouváním do cívky. Naopak pro snížení indukčnosti lze využít mosazného nebo měděného materiálu. Tento způsob je vhodný pro orientaci o počtu závitů. Zda závity ubrat nebo přidat. Vzhledem k tomu, že je zapotřebí z hlediska návrhu dosáhnout, co největší vlastní indukčnosti ve velmi širokém rozsahu, byla zvolena cívka navinuta na vhodně zvoleném feritovém jádře,

jehož elektrické parametry odpovídají jádrům používaných pro odrušení elektronických systémů [27, 28].

Ovšem, abychom dosáhli, co největší indukčnosti, je potřeba zamezit ztrátám. U cívky se projevuje ztrátový odpor cívky  $R$  a vlastní kapacita  $C_0$ . Ztrátový odpor je způsobený odporem vodiče vinutí. Tento odpor je vždy větší než činný odpor vodiče. Nicméně ztráty vznikají navíc vlivem skin efektu, tzv. povrchového jevu. Tento jev nastává vlivem procházejícího střídavého proudu vodičem, který ovšem neprochází celým průřezem vodiče, ale vlivem magnetického pole prochází ve vrstvě při povrchu. Tato vrstva se ztenčuje, čím vyšší je frekvence procházejícího střídavého proudu. Tím v podstatě zůstává větší část průřezu vodiče nevyužita. Tento jev lze eliminovat použitím vysokofrekvenčních kablíků. Rozdíl potenciálů, nacházející se mezi různými částmi cívky, vytváří kolem cívky elektrické pole. Rozložená vlastní kapacita mezi vinutím se chová podobně, jako by k cívce byla připojena malá kapacita. Vlastní kapacita je příčinou vzniku rezonancí, které mění činný odpor i reaktanci cívky. Aby došlo k omezení vzrůstu vlastní kapacity  $C_0$  na minimum je vhodné vinout cívky tzv. divoce. Navíc při zvolení feritového jádra lze zmenšit počet závitů, což se projeví i velmi malou vlastní kapacitou  $C_0$ . Pokud se veškeré ztráty omezí na minimum, lze vytvořit velmi jakostní cívku s dobrým činitelem jakosti  $Q$  [27,28].

Při zkoušení materiálu vířivými proudy hraje také významnou roli činitel zaplnění. Tento činitel zaplnění určuje vzdálenost cívky od zkoušeného materiálu. Čím je cívka blíže k materiálu, tím je citlivější. Ovšem nevýhodou je mechanické opotřebení cívky a v některých případech také vyšší hodnota šumu. Proto je nutné zvolit takovou hodnotu, aby cívka vykazovala dostačující hodnotu citlivosti pro dané zkoušení a zároveň byla zajištěna i dobrá životnost snímače. Optimálně se volí hodnota činitele zaplnění 0,2, tj. tělo snímače je z 80 % zaplněno cívkou.

Existuje celá řada konfigurací cívek. V tomto případě jsou cívky uspořádány a zapojeny do režimu přijímač-vysílač. Tento režim má výhodu v dosažení vyšší citlivosti systému a není závislý na elektronice přístroje. Mechanickým uspořádáním cívek je dosaženo diferenčního průběhu signálu.

Počet závitů je navržen tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší hodnoty pracovní frekvence. Pracovní frekvence vysokofrekvenčních snímačů, označených v tomto experimentu jako COMPROBE 9MHz, COMPROBE 10MHz, COMPROBE 11MHz se pohybuje v rozmezích od 8 MHz až 12 MHz. V případě zkoušení uhlíkových kompozitních materiálů lze říci, že se jedná o vysokofrekvenční úzkopásmový snímač, nicméně v případě zkoušení i dalších materiálů jako je dural, mosaz atd. se jedná o širokopásmový snímač, kterým lze zkoušet i kovové materiály při nižších frekvencích.

Magnetické pole cívek, zvláště pak vysokofrekvenčních zasahuje daleko do prostoru kolem cívky, má tedy velký rozptyl. V některých případech je nutné tento velký rozptyl potlačit zachycením silových čar z cívky, aby nedocházelo k ovlivnění výsledného magnetického pole dalšími kovovými prvky v letecké kompozitní konstrukci, například nýty. K takovému zachycení silových čar je možné

využit různých magnetických i nemagnetických materiálů. Tyto stínící kryty velmi dobře omezí magnetické pole cívek na prostor uvnitř krytu. V podstatě dochází ke zmenšování průřezu, kterým prochází magnetický tok a tím dochází ke snižování indukčnosti. To se projevuje i zvětšením celkových ztrát. Kryt představuje v podstatě závit nakrátko, a čím méně je materiál krytu vodivý, tím více dochází ke zmenšování indukčnosti a ke zhoršení jakosti cívky. Ovšem, pokud je mezi krytem a cívkou mezera, rovna alespoň poloměru cívky, je zmenšení indukčnosti malé. Velmi dobře zabrání průniku siločar, tzv. odstíní například slitina železa, mosaz, měď, hliník, austenitická ocel nebo ferit. Stínění sondy bylo tedy zajištěno kovovými kroužky různých materiálů (viz Obr. 2.1)

Při návrhu snímače byl použit přímý způsob řešení. Což znamená, že elektrické a mechanické parametry snímače byly optimalizovány na konkrétních vzorcích. Navržené sondy jsou zobrazeny na Obr. 6.2.



*Obr. 6.1 Stínící kroužky v pořadí hliník, mosaz, austenitická ocel, slitina železa, ferit*



*Obr. 6.2 Sondy vířivých proudů pro kontrolu kompozitních uhlíkových materiálů*



Výsledné vlastnosti sond vířivých proudů pro zkoušení kompozitních materiálů jsou shrnuty do následující Tab. 6.1.

Veličina	Komentář
Typ a rozměry sondy	Tužková sonda o průměru těla 10 mm a senzoru 6 mm
Rozsah pracovní frekvence	$\geq 5$ MHz
Cívka s jádrem	Feritové jádro – zvětšení vlastní indukčnosti při menších rozměrech cívky s menším počtem závitů, využití silného magnetického pole feritů, menší ztráty
Styl vinutí	Na divoko – omezení vzrůstu vlastní kapacity $C_0$ na minimum, cívka s dobrým činitelem jakosti $Q$
Činitel zaplnění	$k = 0,2$ – nižší mechanické opotřebení cívky a hodnota šumu
Režim zapojení cívky	Vysílač-přijímač – vyšší citlivost systému a nezávislost na elektronice přístroje
Stínění cívek	V podobě nasazovacích kovových kroužků (hliník, mosaz, austenitická ocel, slitina železa, ferit) – lepší fokusace a rozlišitelnost

Tab. 6.1 Výsledné charakteristické vlastnosti navržených sond

## 6.2 Použité kompozitní vzorky

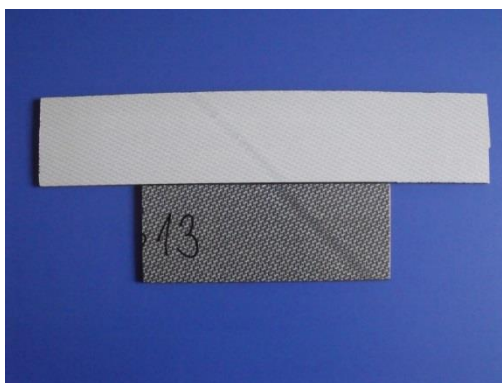
K vývoji snímače byly použity tyto konkrétní vzorky uhlíkových kompozitních materiálů:

- 1. Vzorek uhlíkové tkaniny v epoxidové pryskyřici INDETEC ndt (vzorek 1)** – vzorek obsahuje skutečné vady jako zvlnění tkaniny, překrytí, třepení a umělé vady (viz obrázek níže) jako otvor  $\varnothing 1,5$  mm a drážku o rozměrech 10x1,2x0,5 mm (délka x šířka x hloubka). Tloušťka vzorku se pohybuje v rozmezí 2 až 2,3 mm.



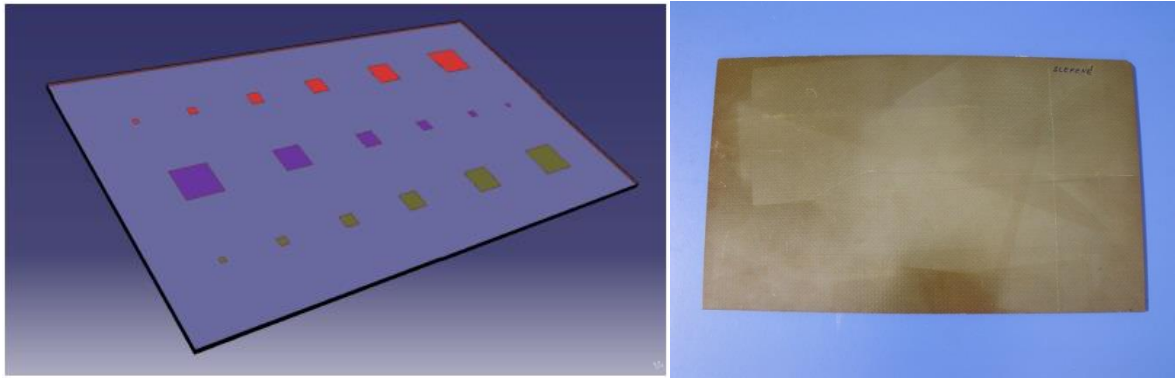
Obr. 6.3 Zvlnění a překrytí tkaniny (vlevo), vývrt a drážka (vpravo)

2. **Vzorek INDETEC ndt (vzorek 2)** – z tohoto materiálu se vyrábí dveře Airbusu. Vzorky obsahují vadu, kterou lze pozorovat na obrázku níže. Jedná se o tmavý cca 1 cm široký pás, který překrývá celou šířku vzorku. Tento pruh vzniká spojováním materiálu při výrobě. Tloušťka světlého vzorku je 4,3 mm. Tloušťka tmavého vzorku je 4,2 mm.

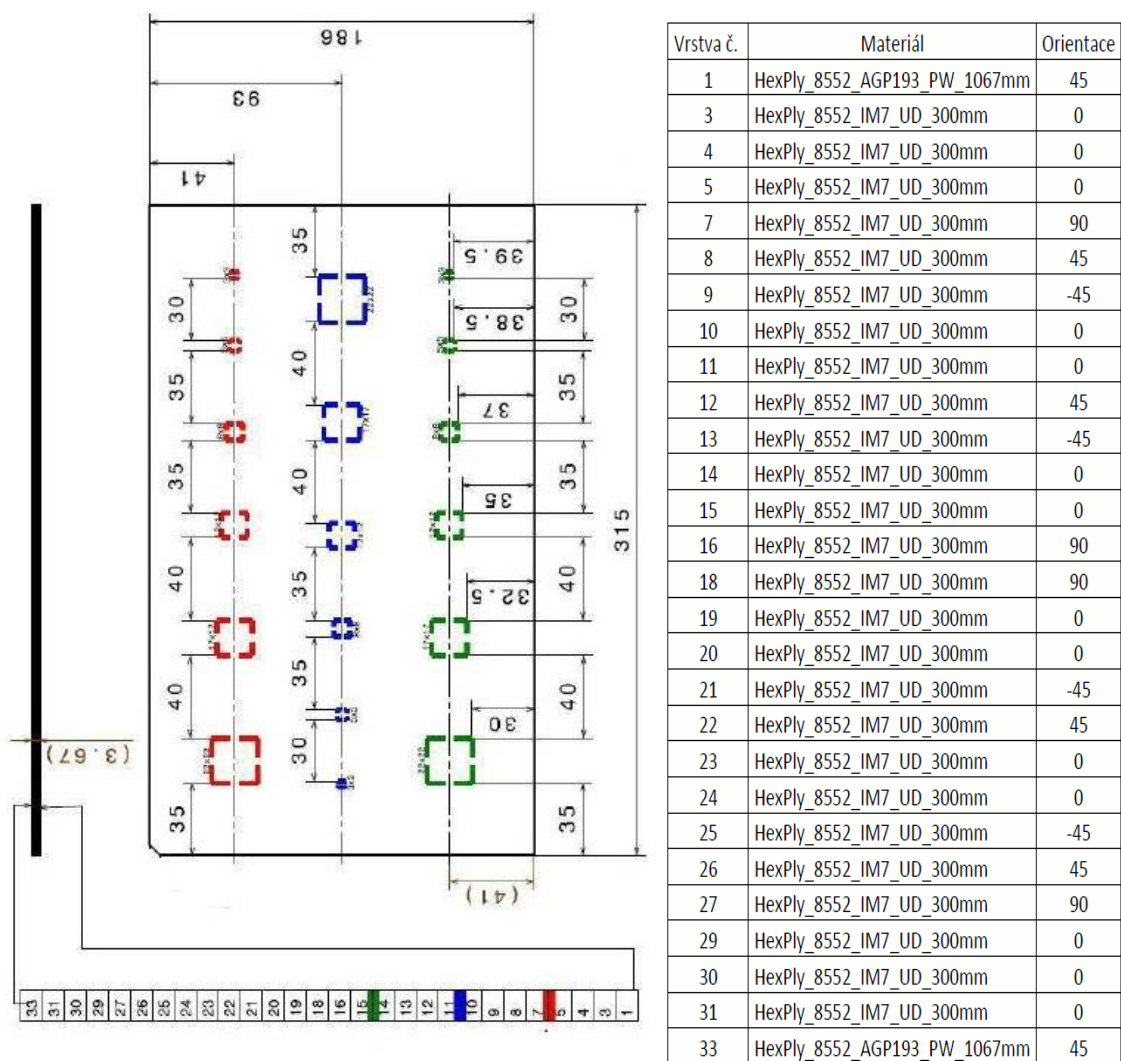


Obr. 6.4 Tmavý pruh u CFRP kompozitů

3. **Kalibrační měrka prepreg uhlíkový jednosměrný 8552/33%/134/IM7(12K) VZLÚ (vzorek 3)** – skladba vzorku obsahuje 33 vrstev, což odpovídá tloušťce cca 3,7 mm. Umělé vady simulují delaminaci, která je vytvořena pomocí inzertů z kaptonové fólie o velikosti 3x3 mm až 22x22 mm a tloušťce cca 0,025 mm. Tyto inzerty jsou vloženy mezi 4. a 5. vrstvou, mezi 8. a 9. vrstvou a mezi 12. a 13. vrstvou.



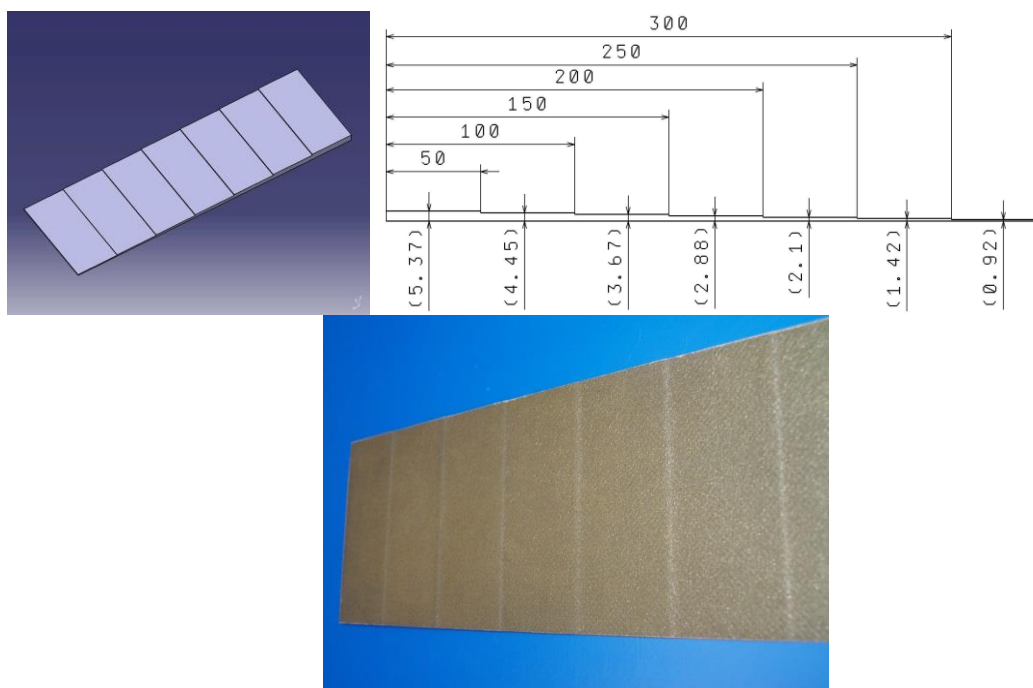
Obr. 6.5 Prepreg uhlíkový jednosměrný – uměle vytvořené delaminace [16]



Obr. 6.6 Nákres vzorku 3 (vlevo), orientace a materiál jednotlivých kladených vrstev (vpravo) [16]

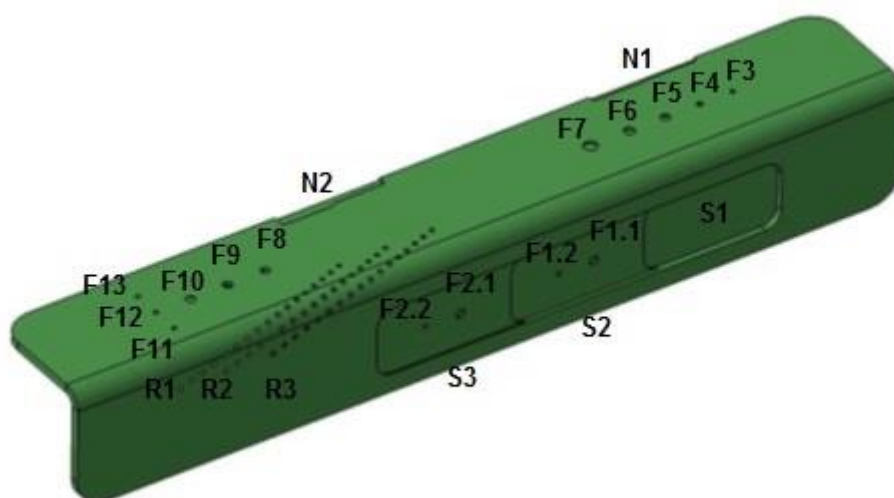
**4. Schodovitá kalibrační měřka prepreg uhlíkový jednosměrný 8552/33%/134/IM7(12K) VZLÚ (vzorek 4)** – jedná se klasickou schodovitou měřku s tloušťkami jednotlivých stupňů cca (0,92, 1,42, 2,1,

2,88, 3,67, 4,45 a 5,37)  $\pm 0,2$  mm. Orientace vláken je stejná jako u vzorku 3 (viz Obr. 6.6).



Obr. 6.7 Schodovitá měrka prepreg uhlíkový jednosměrný [16]

5. **Kalibrační měrka ABS 5045 laminát Latecoare (vzorek 5)** – jedná se o laminát z polyfenylsulfidové pryskyřice (PPS) vyztužený tkaninou z uhlíkových vláken o tloušťce cca 5,6 mm. Tento materiál se využívá pro výrobu leteckých konstrukcí společnosti Airbus. Jednotlivé vady jsou zobrazeny na Obr. 6.8. Rozměry a typy vad jsou popsány v Tab. 6.2. Vzorek obsahuje tři typy umělých vad plošné vývrty (FBH – Flat Bottom Hole), schodovité přechody (Step) a drážky (Notch).





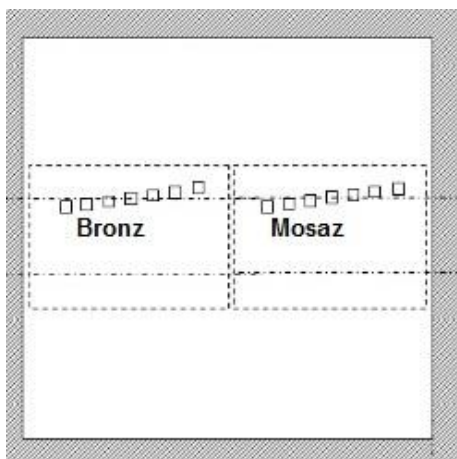
Obr. 6.8 Kalibrační měrka s popisem jednotlivých umělých vad – ABS 5045 laminát (vzorek 5)

Vada	Typ	Rozměry [mm]			Hloubka [mm]	Vzdálenost vady od sondy [mm]
		x	y	Ø		
F1.1	FBH	-	-	6	1,6	1,0
F1.2	FBH	-	-	3	1,6	1,0
F2.1	FBH	-	-	6	1,6	2,4
F2.2	FBH	-	-	3	1,6	2,4
F3	FBH	-	-	3	1,7	3,9
F4	FBH	-	-	4	1,7	3,9
F5	FBH	-	-	6	1,7	3,9
F6	FBH	-	-	7	1,7	3,9
F7	FBH	-	-	9	1,7	3,9
F8	FBH	-	-	6	5,3	0,3
F9	FBH	-	-	6	3,2	2,4
F10	FBH	-	-	6	1,0	4,6
F11	FBH	-	-	3	5,3	0,3
F12	FBH	-	-	3	3,2	2,4
F13	FBH	-	-	3	1,0	4,6
S1	Step	90	44	-	4,5	1,1
S2	Step	90	44	-	3,0	2,6
S3	Step	90	44	-	1,6	4,0
N1	Notch	70	2 (4)	-	2,0	3,6
N2	Notch	70	6 (8)	-	2,0	3,6

Tab. 6.2 Rozměry jednotlivých umělých vad na vzorku 5

6. Vzorek BMS 8-353 laminát Latecoare (vzorek 6) – jedná se o vyztužený termoplastický laminát. Obsahuje 14 vrstev laminátu a 2 vrstvy skla. Umělé

vady se vyskytují mezi 8. a 9. vrstvou. Na levé straně se nachází vady v podobě tkaniny z bronzu a na pravé straně vady v podobě tkaniny z mosazi. Tloušťka vrstvy skla je cca 0,046 mm. Celková tloušťka vzorku je 4,4 mm.



Obr. 6.9 Nákres kalibrační měrky BMS 8-353 laminát (vzorek 6)

<i>Vrstva</i>	<i>Typ vrstvy</i>	<i>Orientace</i>
1	sklo	0
2	RTL	0
3	RTL	45
4	RTL	0
5	RTL	45
6	RTL	0
7	RTL	45
8	RTL	0
9	RTL	0
10	RTL	45
11	RTL	0
12	RTL	45
13	RTL	0
14	RTL	45
15	RTL	0
16	sklo	0

Tab. 6.3 Popis a orientace jednotlivých vrstev ve vzorku 6

## 7 SHRUTÍ PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ

### 7.1 Výsledky zkoušení

Vypracované a vyhodnocené experimenty provedené sondami – COMPROBE 9 MHz, COMPROBE 10 MHz, COMPROBE 11 MHz, vzájemné porovnání jednotlivých sond, použitých přístrojů vířivých proudů a celkové shrnutí všech provedených prací a experimentů jsou obsahem této kapitoly.

#### 7.1.1 Dílčí výsledky zkoušení

Naměřené odezvy vířivých proudů (EC signály) na defekty jednotlivých vzorků jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

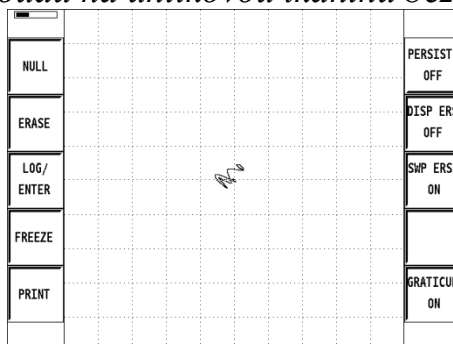
##### Parametry nastavení

Rozsah pracovní frekvence:	5 MHz – 12 MHz
Rozsah zesílení (horizontální/vertikální):	38 dB – 65 dB
Buzení:	Medium, High
Použitý přístroj:	Olympus Nortec 500D (primární) Olympus Nortec 600D (doplňkový)

**Pozn.:** Všechny záznamy jednotlivých EC signálů, pokud není v titulku nebo textu uvedeno jinak, jsou pořizeny pomocí přístroje Nortec 500D.

#### *Vzorek 1 – uhlíková tkanina v epoxidové pryskyřici*

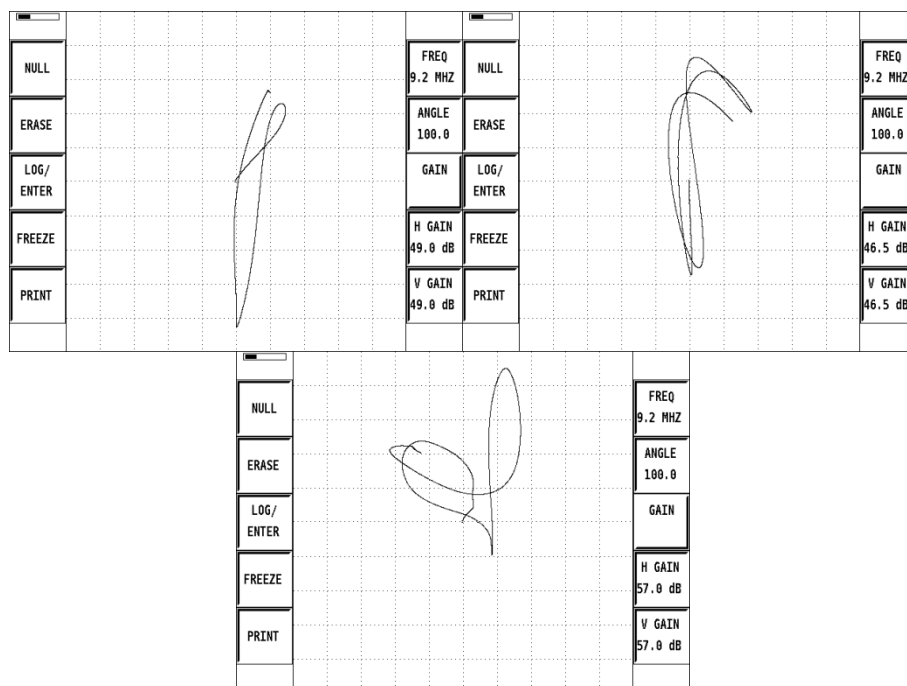
- *Odezva vířivých proudů na uhlíkovou tkaninu bez defektu (viz Obr. 7.1)*



Obr. 7.1 EC signál uhlíkové tkaniny bez defektu

- *Zvlnění tkaniny (viz Obr. 7.2) lze jednoznačně detekovat. Jednotlivé signály s největší pravděpodobností představují odezvu vířivých proudů na tento typ defektu, který lze pozorovat na vzorku i vizuálně. Ze zobrazení signálů v impedanční rovině XY, lze pozorovat přibližně stejný tvar i fázi signálu cca 90°. Pouze v jednom případě se tvar signálu liší, fáze zůstává stejná. Tento jiný tvar lze přisoudit přítomnosti jiného defektu, který může být skrytý pod viditelným zvlněním. Doporučuje se proto provedení*

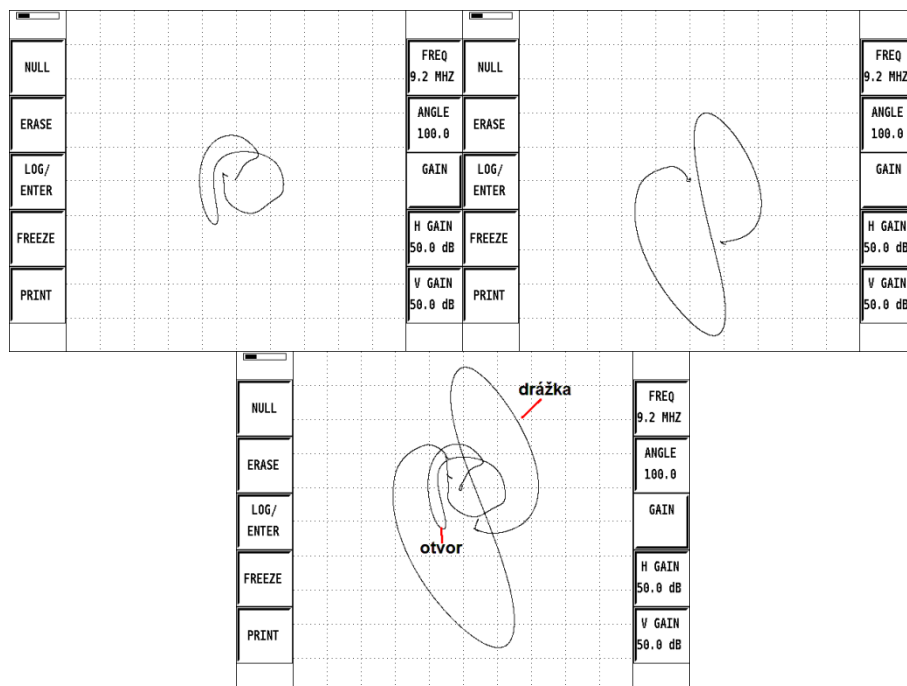
fraktografické analýzy, která by přítomnost jiného defektu potvrdila/vyvrátila. Odstup signálu od šumu (SNR) je minimálně 3:1.



Obr. 7.2 EC signály zvlnění uhlíkové tkaniny v pojivu epoxidové pryskyřice

- Vývrt  $\varnothing 1,5$  mm, drážka  $10 \times 1,2 \times 0,5$  mm (délka x šířka x hloubka) (viz Obr. 7.3) lze jednoznačně detekovat. Odezvy vířivých proudů na vývrt i drážku představují typické zobrazení diferenčního signálu defektu. Signály vývrtu a drážky jsou vůči sobě pootočený o téměř  $90^\circ$ , což je základním úspěchem při rozlišování a identifikaci jednotlivých defektů za provozu. SNR je opět minimálně 3:1.

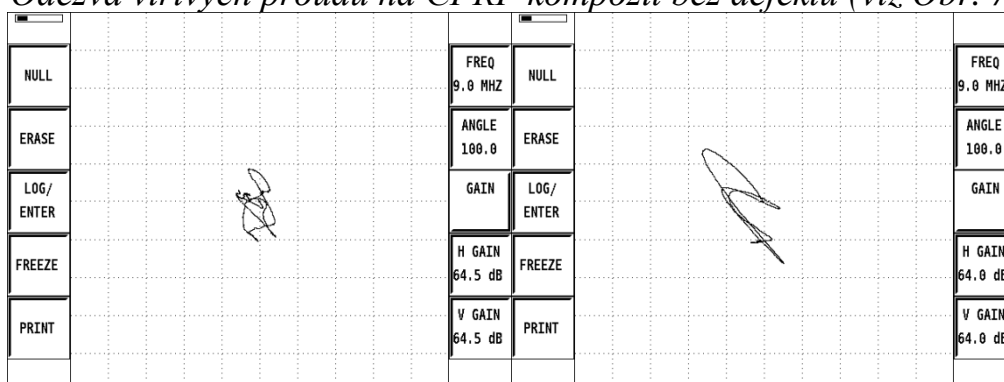




Obr. 7.3 EC signály otvoru a drážky

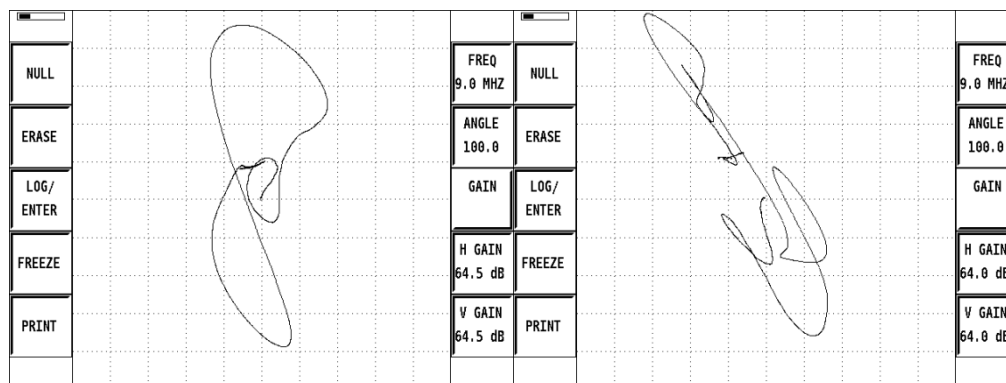
## Vzorek 2 – CFRP kompozity Airbus

- Odezva vířivých proudů na CFRP kompozit bez defektu (viz Obr. 7.4)



Obr. 7.4 EC signál CFRP kompozitu bez defektu – světlý vzorek (vlevo), tmavý vzorek (vpravo)

- Tmavý viditelný pás spoje o šířce 1 cm (viz Obr. 7.5) lze jednoznačně detekovat. V případě světlého vzorku lze opět pozorovat typické zobrazení diferenčního signálu. Fáze signálu je téměř  $90^\circ$ . V případě tmavého vzorku je signál více deformován a fázový úhel je cca  $45^\circ$ . V obou případech je SNR minimálně 3:1. V době vývoje prototypu nebyl znám původ tohoto tmavého pásu a bylo doporučeno provést fraktografickou a metalografickou analýzu, které by z největší pravděpodobnosti objasnily přítomnost tohoto tmavého pásu. V pokročilejší době vývoje již tato potřeba vymizela, jelikož bylo zjištěno, že tento pás vzniká spojením dvou částí již ve výrobě kompozitního materiálu.

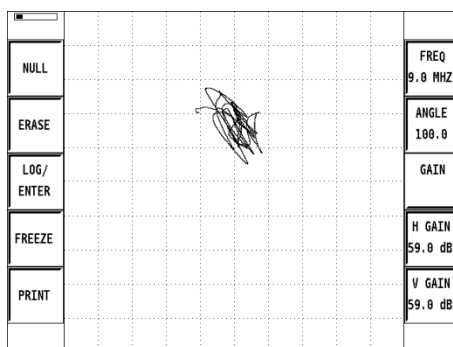


Obr. 7.5 EC signály tmavého viditelného pásu – světlý vzorek (vlevo), tmavý vzorek (vpravo)

### Vzorek 3 – prepreg uhlíkový jednosměrný

#### COMPROBE 9 MHz a COMPROBE 11 MHz




Odezva vířivých proudů na uhlíkový prepreg bez defektu (viz Obr. 7.6)

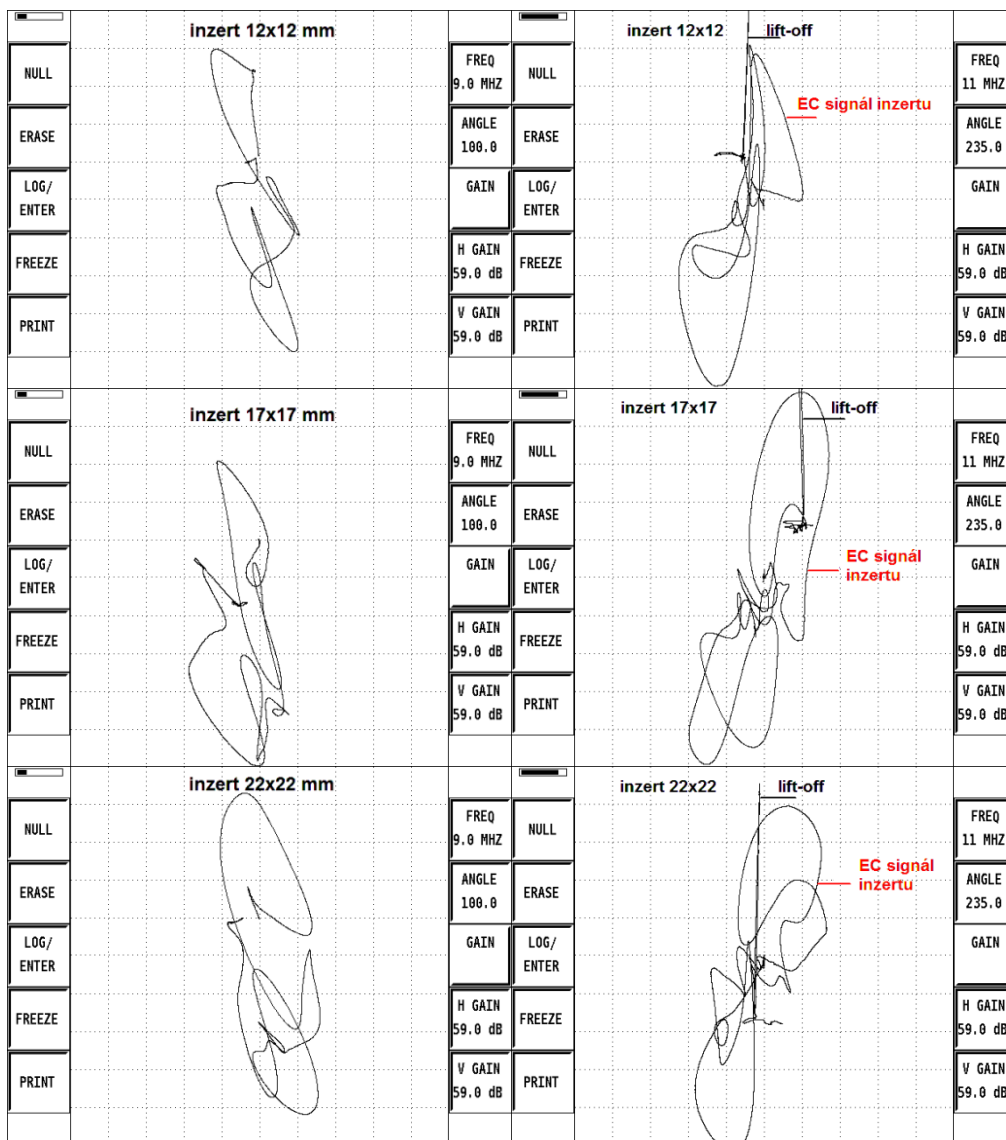


Obr. 7.6 EC signál uhlíkového prepregu bez defektu

Dílčí shrnutí výsledků a porovnání jednotlivých sond:

- *Delaminace mezi 4. a 5. vrstvou (viz Obr. 7.7)*  
**COMPROBE 9 MHz:** lze jednoznačně detekovat. Z naměřených signálů v impedanční rovině XY lze pozorovat zvyšující se amplitudu se zvětšující se velikostí inzertů. Fázový úhel odpovídá téměř  $90^\circ$  a v průběhu zkoušení se příliš nemění. Při zkoušení byla pozorována náhlá odezva vířivých proudů, kterou lze z největší pravděpodobnosti přisuzovat začátku a konci inzertu. SNR minimálně 2:1 lze pozorovat až od velikosti inzertu 5x5 mm.  
**COMPROBE 11 MHz:** lze jednoznačně detekovat. Stejně jako v případě sondy COMPROBE 9 MHz lze pozorovat zvyšující se amplitudu se zvětšující se velikostí inzertů. V případě tohoto typu vady je rozdíl fáze mezi signálem vady a lift-off minimální.

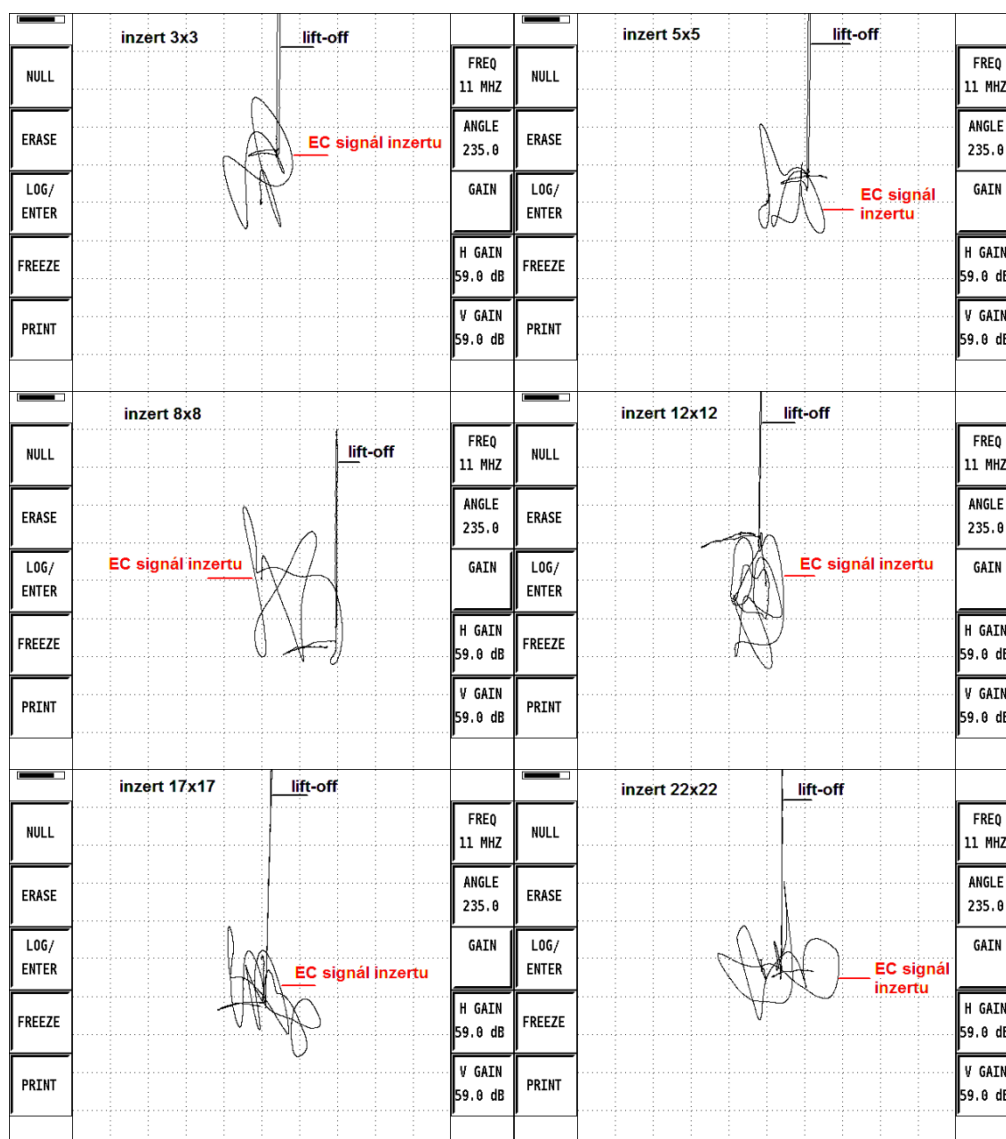
	<b>inert 3x3 mm</b>		<b>inert 3x3</b>	<b>lift-off</b>	
NULL		FREQ 9.0 MHz	NULL		FREQ 11 MHz
ERASE		ANGLE 100.0	ERASE	<b>EC signál inertu</b>	ANGLE 235.0
LOG/ ENTER		GAIN	LOG/ ENTER		GAIN
FREEZE		H GAIN 59.0 dB	FREEZE		H GAIN 59.0 dB
PRINT		V GAIN 59.0 dB	PRINT		V GAIN 59.0 dB
	<b>inert 5x5 mm</b>		<b>inert 5x5</b>		
NULL		FREQ 9.0 MHz	NULL		FREQ 11 MHz
ERASE		ANGLE 100.0	ERASE	<b>EC signál inertu</b>	ANGLE 235.0
LOG/ ENTER		GAIN	LOG/ ENTER		GAIN
FREEZE		H GAIN 59.0 dB	FREEZE		H GAIN 59.0 dB
PRINT		V GAIN 59.0 dB	PRINT		V GAIN 59.0 dB
	<b>inert 8x8 mm</b>		<b>inert 8x8</b>	<b>lift-off</b>	
NULL		FREQ 9.0 MHz	NULL		FREQ 11 MHz
ERASE		ANGLE 100.0	ERASE	<b>EC signál inertu</b>	ANGLE 235.0
LOG/ ENTER		GAIN	LOG/ ENTER		GAIN
FREEZE		H GAIN 59.0 dB	FREEZE		H GAIN 59.0 dB
PRINT		V GAIN 59.0 dB	PRINT		V GAIN 59.0 dB



Obr. 7.7 EC signály inzerťů simulující delaminaci zobrazené v impedanční rovině XY mezi 4. a 5. vrstvou pro pracovní frekvence 9 MHz (vlevo) a 11 MHz (vpravo)

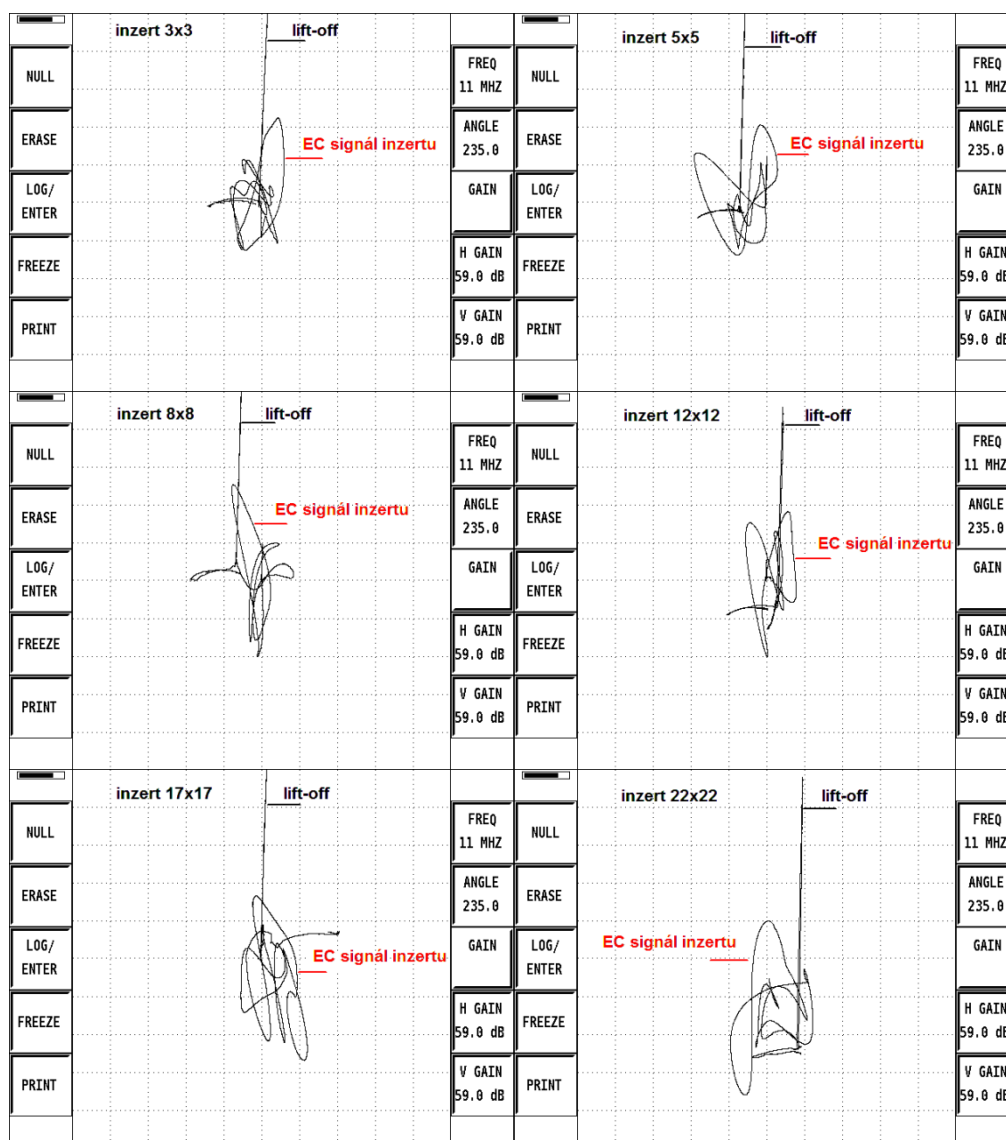
- Delaminace mezi 8. a 9. vrstvou (viz Obr. 7.8)**  
**COMPROBE 9 MHz:** nelze jednoznačně detekovat. Odhalení delaminace mezi těmito vrstvami nebylo úspěšné. Detekovatelné byly pouze inzerťy velkých rozměrů, tedy 17x17 mm a 22x22 mm. Tento neúspěch je přisuzován nízkému frekvenčnímu rozsahu snímače. Předpokládá se, že zvýšením pracovní frekvence snímače by mohla být dosažena detekce ostatních velikostí inzerťů simulující delaminaci.  
**COMPROBE 11 MHz:**  
Předpoklad popsany u COMPROBE 9 MHz se potvrdil. Zvýšením pracovní frekvence se dospělo k úspěšné detekci všech velikostí inzerťů (viz Obr. 7.8). Z naměřených signálů lze pozorovat, že velikost amplitudy se se zvětšující velikostí inzerťů zvyšuje. Ovšem není tak významná jako

v případě inzertů vložených mezi 4. a 5. vrstvou. Fázový rozdíl mezi signály lift-off a nespojitostí je u všech velikostí cca 90°.



Obr. 7.8 EC signály inzertů simulující delaminaci zobrazené v impedanční rovině XY mezi 8. a 9. vrstvou pro pracovní frekvenci 11 MHz

- *Delaminace mezi 12. a 13. vrstvou (viz Obr. 7.9)*  
*COMPROBE 9 MHz:* nelze detekovat. Odhalení delaminace mezi těmito vrstvami nebylo úspěšné. Tento neúspěch je opět přisuzován nízkému frekvenčnímu rozsahu snímače.  
*COMPROBE 11MHz:* Předpoklad popsany u COMPROBE 9 MHz se potvrdil. Zvýšením pracovní frekvence se dospělo k úspěšné detekci všech velikostí inzertů (viz Obr. 7.9). Z naměřených signálů v impedanční rovině XY lze pozorovat zvyšující se amplitudu se zvětšující se velikostí inzertů. Fázový rozdíl mezi lift-off a nespojitostí se pohybuje v rozmezí 45° až 90°.

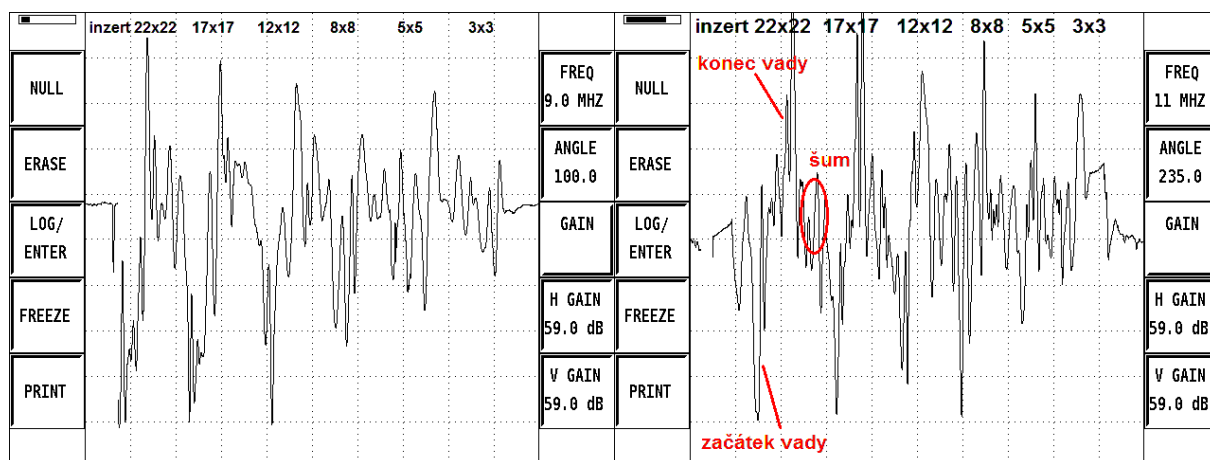


Obr. 7.9 EC signály inzerťů simulující delaminaci zobrazené v impedanční rovině XY mezi 12. a 13. vrstvou pro pracovní frekvenci 11 MHz

Při kontinuálním zkoušení všech delaminací mezi 4. a 5. vrstvou byl zaznamenán průběh v časovém zobrazení Y-t (viz Obr. 7.10) Jednotlivé amplitudy signálu odpovídají velikostem inzerťů. Lze pozorovat snižující se amplitudu se zmenšující se velikostí inzerťu. Na Obr. 7.10 vpravo je zobrazen záznam signálu sondy COMPROBE 9 MHz při pracovní frekvenci 9 MHz a vlevo sondy COMPROBE 11 MHz při pracovní frekvenci 11 MHz. Uspokojivou hodnotu SNR u pracovní frekvence 9 MHz lze pozorovat až od inzerťu 12x12 mm. Menší delaminace se ztrácejí v šumu nebo jejich odstup od šumu je malý. U pracovní frekvence 11 MHz lze uspokojivou hodnotu SNR pozorovat u všech velikostí inzerťů.

Z naměřených dat na vzorku 3 lze jednoznačně konstatovat, že se zvýšením pracovní frekvence z 9 MHz na 11 MHz došlo ke zlepšení detekce jednotlivých umělých nespojitostí simulující delaminaci. Sonda COMPROBE 11 MHz odhalila

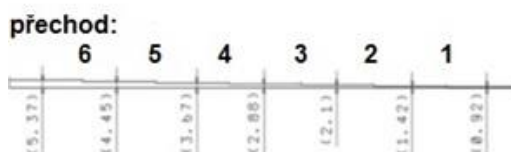
všechny velikosti inzertů vložených mezi 4. a 5. vrstvu, mezi 8. a 9. vrstvu a mezi 12. a 13. vrstvu. Vzorek byl zkoušen z opačné strany, tedy odhadem tyto vrstvy vůči poloze sondy ležely v hloubkách cca 2,4 mm, 2,8 mm a 3,2 mm.



Obr. 7.10 Zobrazení amplitudy signálu inzertů v závislosti na čase mezi 4. a 5. vrstvou při pracovní frekvenci 9 MHz (vlevo), 11 MHz (vpravo)

#### Vzorek 4 – schodovitá měrka prepreg uhlíkový jednosměrný

Na Obr. 7.11 níže jsou číselně označeny jednotlivé přechody tloušťek na schodovité měrce. Tyto přechody jsou řazeny vzestupně od nejmenší tloušťky. Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů jsou zaznamenány pro pracovní frekvence 9 MHz, 10 MHz a 11 MHz. Odezvy vířivých proudů pro vybraný přechod označený číslem 2 jsou pak zaznamenány pro pracovní frekvence v rozsahu od 5 MHz do 12 MHz jednotlivými sondami COMPROBE 9 MHz, 10 MHz a 11 MHz.



Obr. 7.11 Zobrazení číselného označení přechodů tloušťek

#### COMPROBE 9 MHz

- Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 9 MHz (viz Obr. 7.12)

Z jednotlivých záznamů je patrné, že signály vířivých proudů se tvarově a velikostí impedancí liší.

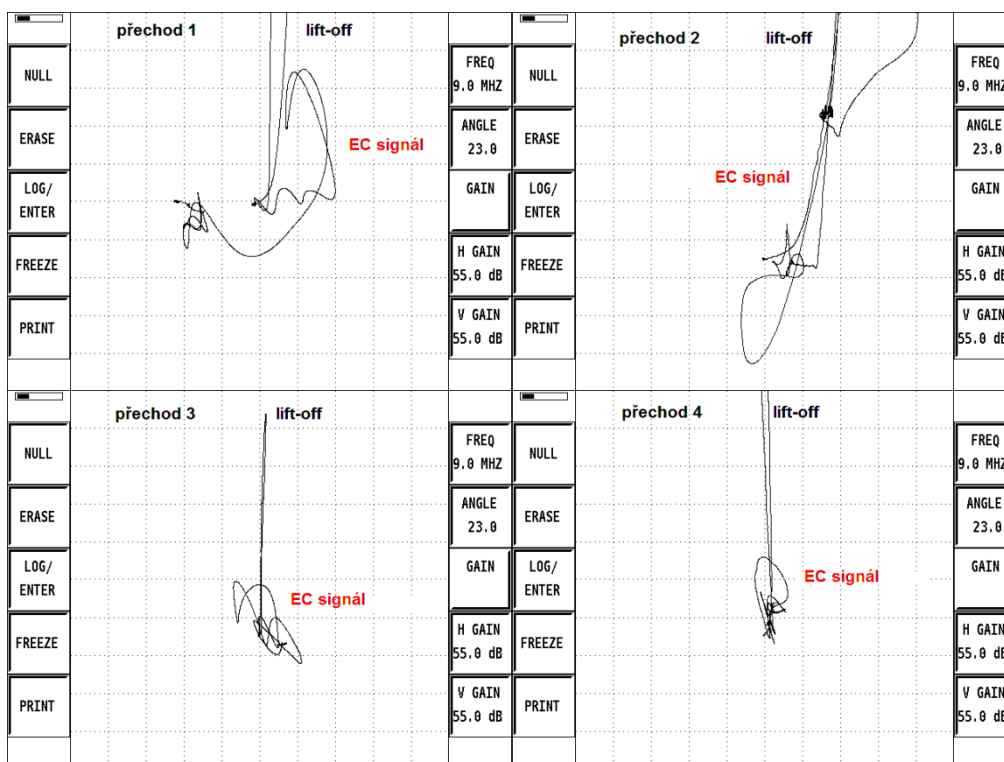
**Přechod 1:** Tvar signálu je dán zejména charakterem daného přechodu. Jedná se o tzv. tvarovou nespojitost. To platí i pro ostatní přechody. Přechod není tak „ostrý“ a „prudký“. Rozdíl mezi přechody je cca 0,5 mm. Dochází zde k rozdílu fáze lift-off a fáze signálu nespojitosti. Poměr

signálu k šumu je minimálně 3:1. Tuto změnu tvaru lze jednoznačně detekovat.

**Přechod 2:** Tvar a tloušťka tohoto přechodu je z hlediska vyhodnocení nejvhodnější. Fáze signálu lift-off a fáze signálu nespojitosti je odlišná, cca 20° (na obrázku není signál lift-off naznačen). Odstup signálu od šumu je minimálně 3:1. I tvar signálu odpovídá diferenčnímu zobrazení nespojitosti (tvar „osmičky“). Tento přechod vykazuje nejlepší podmínky pro detekci.

**Přechod 3 a 4:** Tyto přechody nelze již při pracovní frekvenci 9 MHz jednoznačně detekovat. Velikost amplitudy je příliš malá na rozlišení jednotlivých signálů šumu a nespojitostí. Fáze lift-off a nespojitosti jsou odlišné. Tuto tvarovou nespojitost nelze za provozních podmínek jednoznačně detekovat.

**Přechod 5 a 6:** Nelze detekovat.



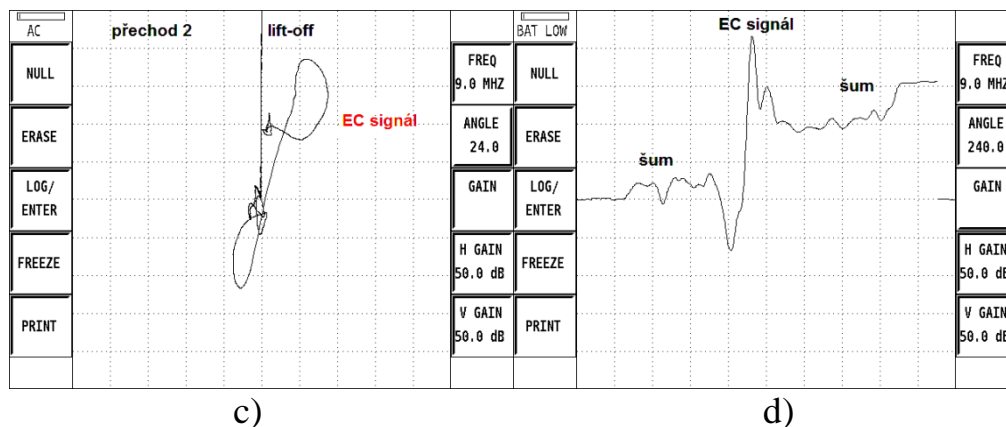
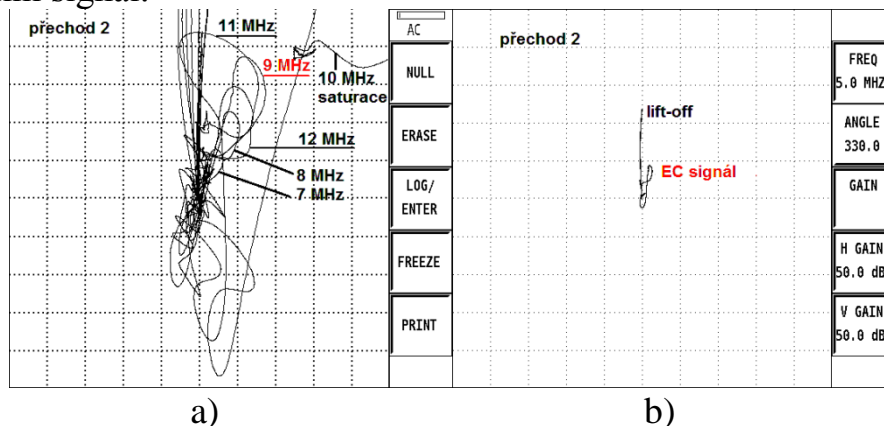
Obr. 7.12 Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 9 MHz

- Odezvy vířivých proudů pro přechod 2 pro pracovní frekvence 5 MHz až 12 MHz (viz Obr. 7.13)

Tloušťka i fyzický charakter přechodu 2 je optimální pro demonstraci elektrických i mechanických parametrů snímače. Ve frekvenčním rozsahu od 5 MHz do 12 MHz v kroku 1 MHz byly zaznamenány jednotlivé odezvy na tvarovou nespojitost. Z jednotlivých EC signálů je patrné, že při nízkých frekvencích 5 MHz až 7 MHz je velikost amplitudy signálu pro danou



nespojitosť veľmi malá. Pri vyšších frekvenciách od 10 MHz sa naopak cívka dostáva do saturácie. Signál dosahuje maximálnej amplitúdy a so zvyšujúcou sa frekvenciou amplitúda signálu klesá. Ako optimálna pre skúšku v prevádzke sa javí pracovná frekvencia 9 MHz. Pri tejto frekvencii sonda vykazuje čistý a stabilný signál.



Obr. 7.13 Odezvy vířivých proudů v XY zobrazení pro přechod 2 pro: pracovní frekvence 7 MHz až 12 MHz (a), pracovní frekvenci 5 MHz (b), optimální pracovní frekvenci 9 MHz (c), EC signál v Yt zobrazení pro optimální pracovní frekvenci 9 MHz (d)

## COMPROBE 10 MHz

- Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 10 MHz (viz Obr. 7.14)

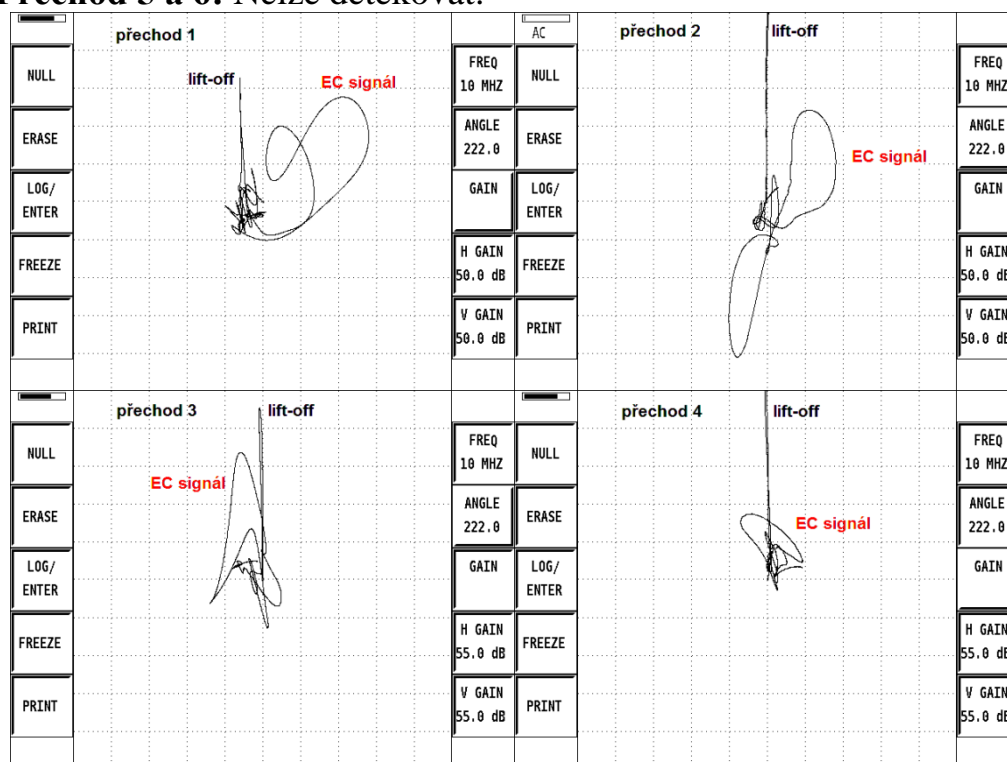
Z jednotlivých záznamů je patrné, že signály vířivých proudů se tvarově i velikostí impedance liší. Tvary jednotlivých signálů odpovídají tvarům EC signálů při pracovní frekvenci 9 MHz, liší se pouze ve velikosti impedance jednotlivých signálů.

**Přechod 1 a přechod 2:** Fáze lift-off je odlišná od fáze signálu nespojitosti. Dle tvaru signálu a velikosti impedance lze tvarovou indikaci jednoznačně identifikovat. Poměr signálu k šumu je minimálně 3:1.

**Přechod 3:** Fáze lift-off je odlišná od fáze signálu nespojitosti. Dle tvaru signálu a velikosti impedance lze tvarovou indikací jednoznačně identifikovat. Poměr signálu k šumu je minimálně 2:1.

**Přechod 4:** Fáze lift-off je odlišná od fáze signálu nespojitosti. Dle tvaru signálu lze tvarovou nespojitost odhalit, nicméně odstup signálu od šumu je malý. Tuto tvarovou nespojitost nelze za provozních podmínek jednoznačně detekovat.

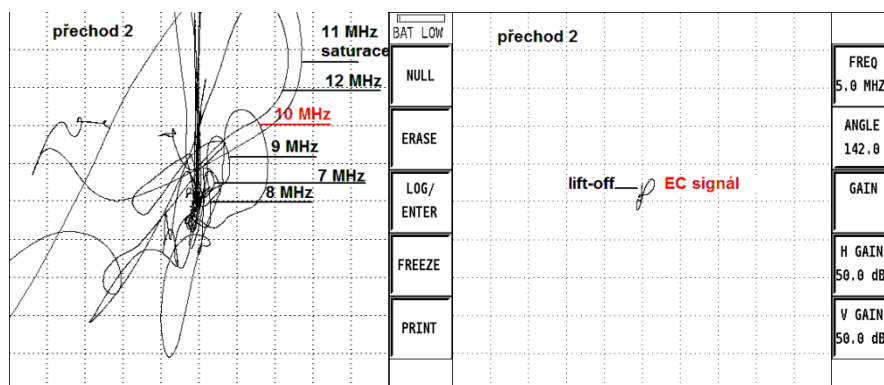
**Přechod 5 a 6:** Nelze detekovat.



Obr. 7.14 Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 10 MHz

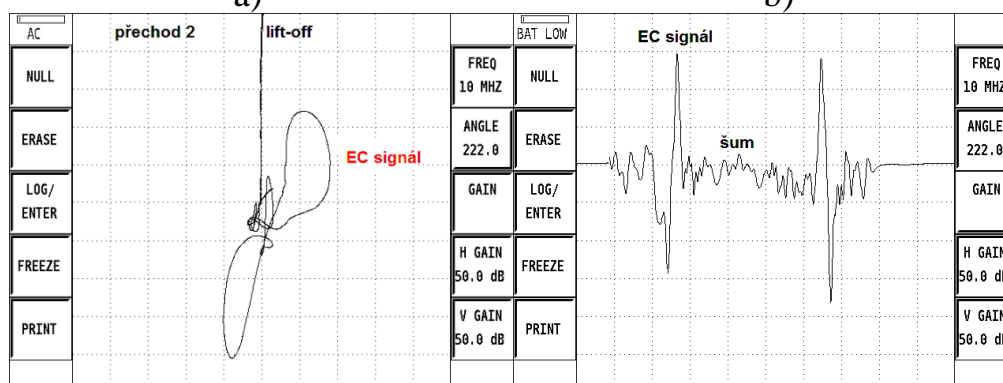
- Odezvy vířivých proudů pro přechod 2 pro pracovní frekvence 5 MHz až 12 MHz (viz Obr. 7.15)

Z jednotlivých EC signálů je patrné, že při nízkých frekvencích 5 MHz až 8 MHz je velikost amplitudy signálu pro danou nespojitost velmi malá. Při vyšších frekvencích od 11 MHz se naopak cívka dostává do saturace. Jako optimální pro zkoušení se jeví pracovní frekvence 10 MHz.



a)

b)



c)

d)

Obr. 7.15 Odezvy vířivých proudů v XY zobrazení pro přechod 2 pro: pracovní frekvence 7 MHz až 12 MHz (a), pracovní frekvenci 5 MHz (b), optimální pracovní frekvenci 10 MHz (c), EC signál v Yt zobrazení pro optimální pracovní frekvenci 10 MHz (d)

## COMPROBE 11 MHz

- Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 11 MHz (viz Obr. 7.16)

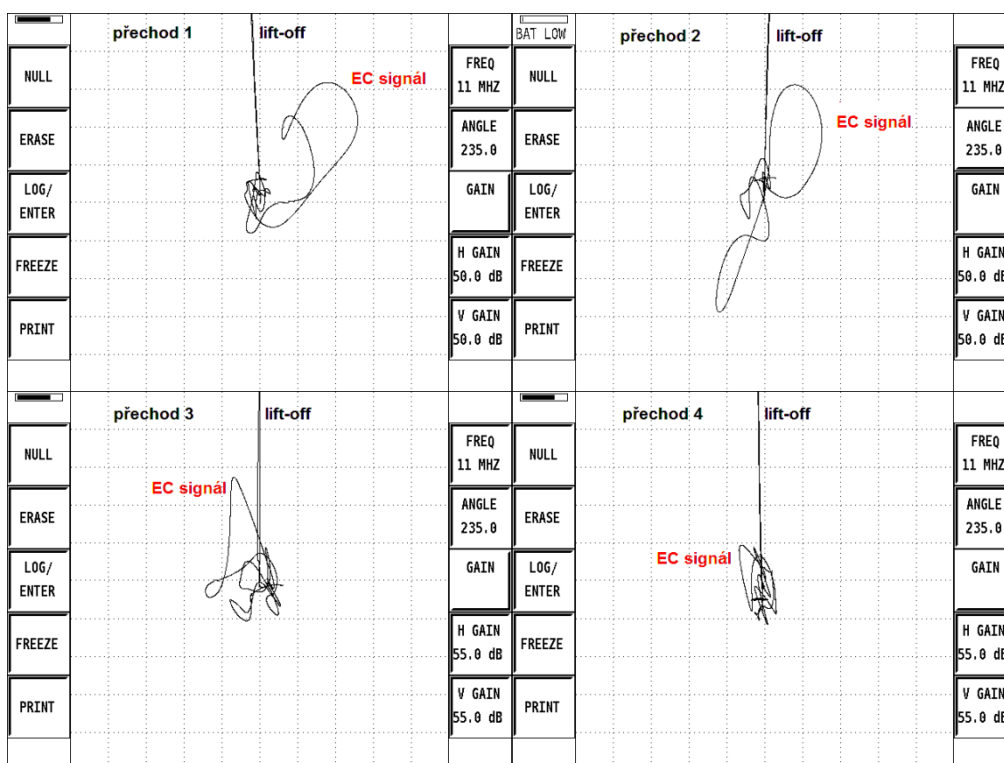
Z jednotlivých záznamů je patrné, že signály vířivých proudů se tvarově i velikostí impedance liší. Tvary jednotlivých signálů odpovídají tvarům EC signálů při pracovní frekvenci 9 MHz a 10 MHz, liší se pouze ve velikosti impedance jednotlivých signálů.

**Přechod 1 a 2:** Fáze lift-off je odlišná od fáze signálu nespojitosti. Dle tvaru signálu a velikosti impedance lze tvarovou indikaci jednoznačně identifikovat. SNR je minimálně 3:1.

**Přechod 3:** Fáze lift-off je odlišná od fáze signálu nespojitosti. Dle tvaru signálu a velikosti impedance lze tvarovou indikaci jednoznačně identifikovat. SNR je minimálně 2:1.

**Přechod 4:** Rozdíl fáze lift-off od fáze signálu nespojitosti je téměř 90°. Dle tvaru signálu lze tvarovou nespojitost odhalit, nicméně odstup signálu od šumu je velmi malý. Tuto tvarovou nespojitost nelze za provozních podmínek jednoznačně detekovat.

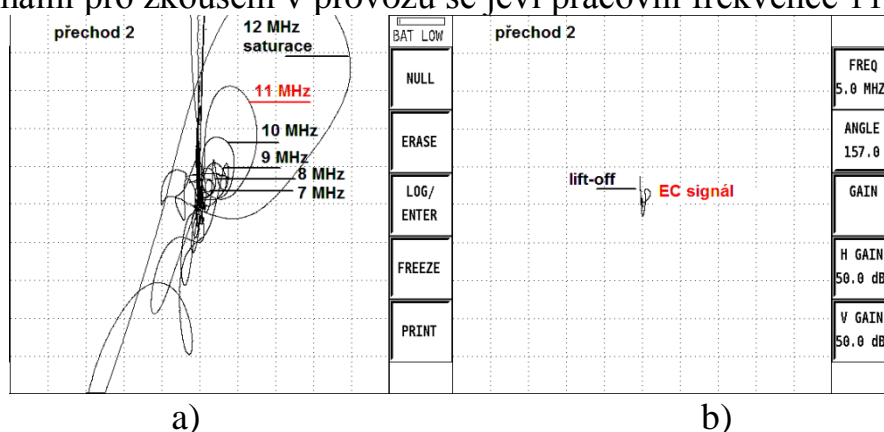
**Přechod 5 a 6:** Nelze detekovat.

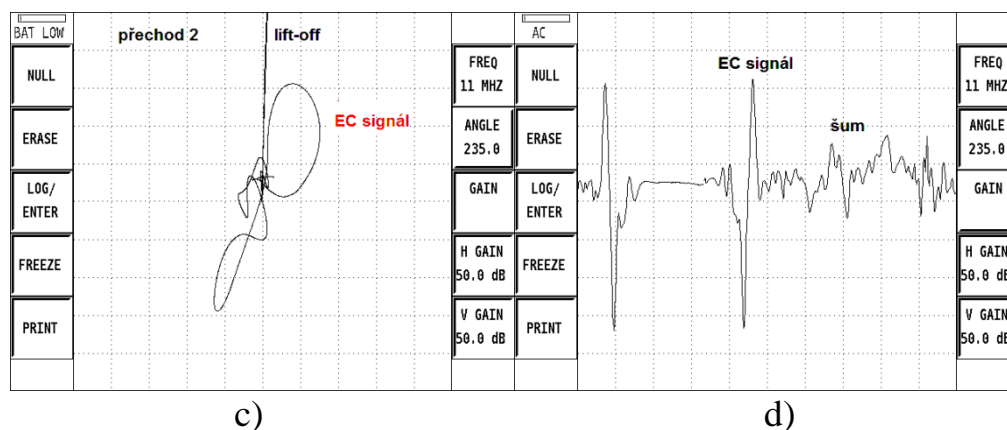


Obr. 7.16 Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 11 MHz

- Odezvy vířivých proudů pro přechod 2 pro pracovní frekvence 5 MHz až 12 MHz (viz Obr. 7.17)

Z jednotlivých EC signálů je patrné, že při nízkých frekvencích 5 MHz až 9 MHz je velikost amplitudy signálu pro danou nespojitost velmi malá. Při vyšších frekvencích od 12 MHz se naopak cívka dostává do saturace. Jako optimální pro zkoušení v provozu se jeví pracovní frekvence 11 MHz.





Obr. 7.17 Odezvy vířivých proudů v XY zobrazení pro přechod 2 pro: pracovní frekvence 7 MHz až 12 MHz (a), pracovní frekvenci 5 MHz (b), optimální pracovní frekvenci 11 MHz (c), EC signál v Yt zobrazení pro optimální pracovní frekvenci 11 MHz (d)

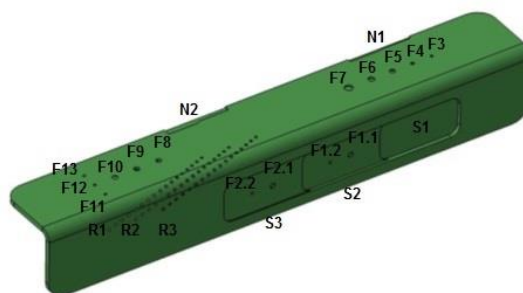
Z naměřených záznamů vyplývá, že se zvýšením pracovní frekvence dojde ke zvýšení citlivosti sondy na danou tvarovou nespojitost. Lze pozorovat rezonanční kmitočty jednotlivých navržených sond. Z hlediska kontroly lze spolehlivě detekovat tvarové indikace do hloubky cca 3 mm (viz Tab. 7.1).

Vada	Tloušťka [mm]	Detekce		
		COMPROBE 9 MHz	COMPROBE 10 MHz	COMPROBE 11 MHz
Přechod 1	0,9/1,4	1	1	1
Přechod 2	1,4/2,1	1	1	1
Přechod 3	2,1/2,9	1	1	1
Přechod 4	2,9/3,7	0	0	0
Přechod 5	3,7/4,5	0	0	0
Přechod 6	4,5/5,4	0	0	0

Tab. 7.1 Souhrn výsledků pro vzorek 4

### Vzorek 5 – kalibrační měrka ABS 5045 laminát

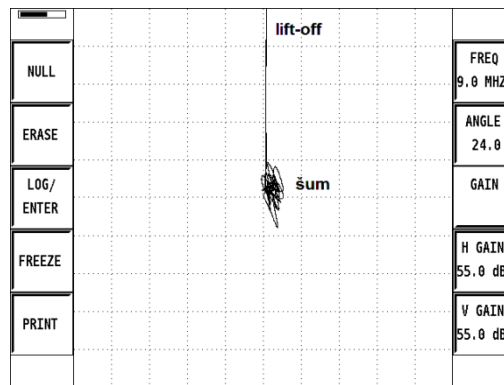
Na Obr. 7.18 je zobrazen náčrvek s přehledem umělých vad na kalibrační měrce ABS 5045 laminát.



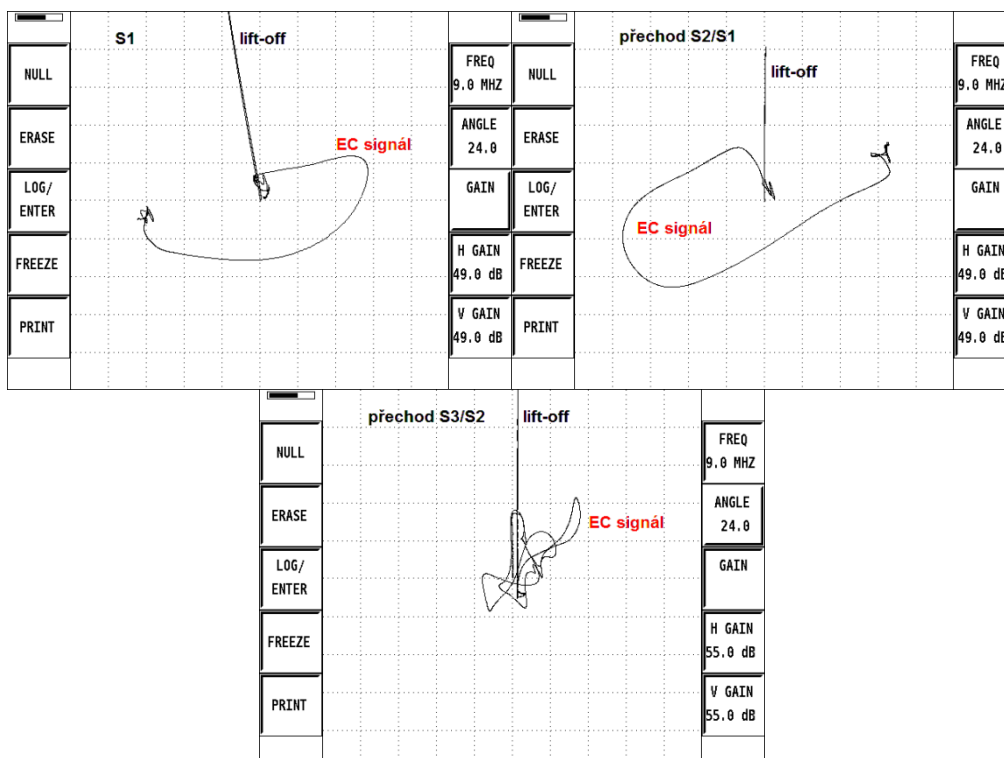
Obr. 7.18 Nákres měřky ABS 5045 laminát s označenými vadami

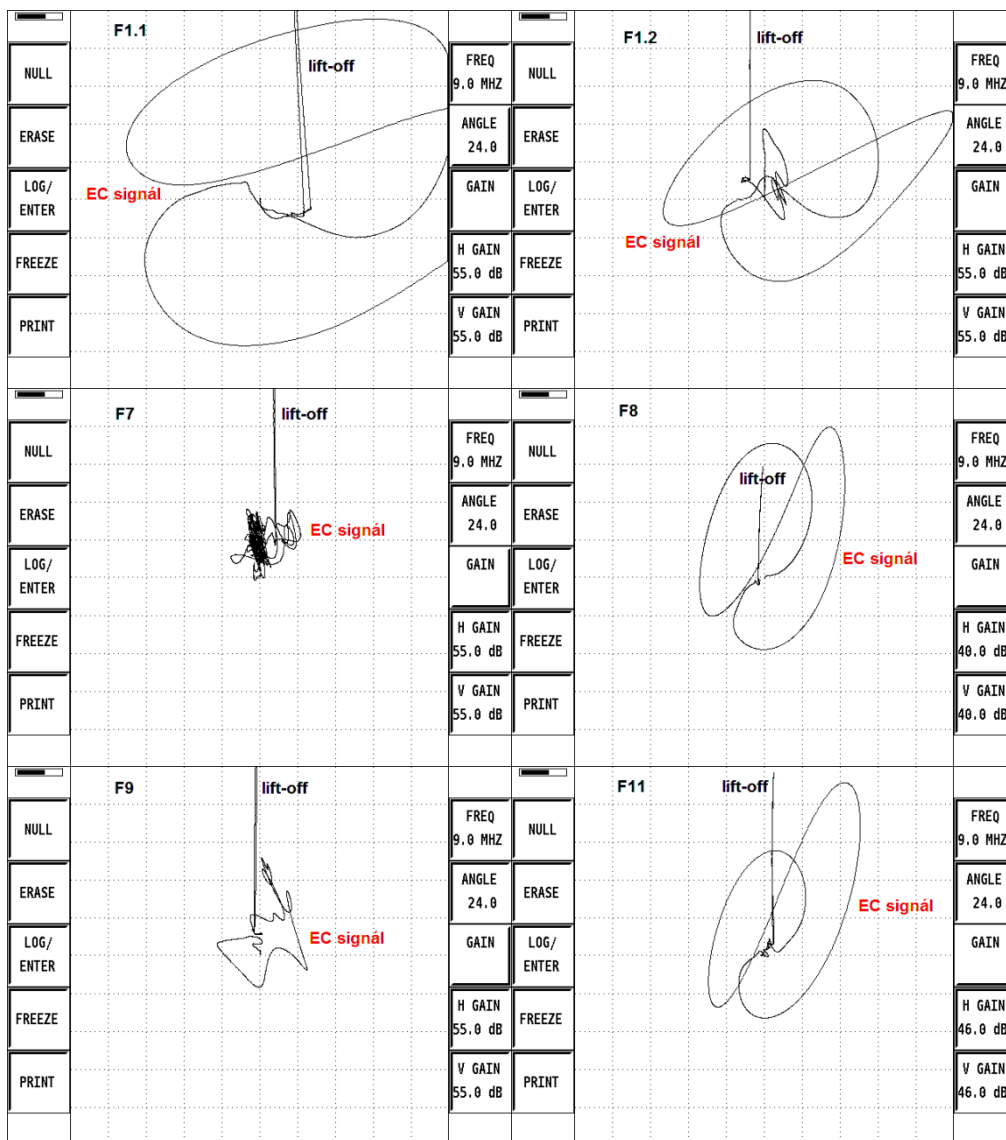
### COMPROBE 9 MHz

Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny EC signály šumu (viz Obr. 7.19) a detekovaných umělých vad na vzorku 5 (viz Obr. 7.20). Všechny odhalené vady, mimo F7 a přechodu S3/S2, mají dobrý odstup signálu od šumu použitelný v provozních podmínkách. Umělá vada F9 nevykazuje standardní očekávaný tvar signálu. Fáze signálu a oddálení nejsou ve fázi, ve většině případů jsou vůči sobě pootočený v rozmezí 45° až 90°. Navíc v některých případech, jako u vady F1.1 a vady F1.2, je signál lift-off velmi potlačený. Dle odhalených umělých vad lze konstatovat, že touto sondou lze detekovat nespojitosti v tomto materiálu do hloubky cca 2,8 mm.



Obr. 7.19 EC signál laminátu bez defektu při pracovní frekvenci 9 MHz

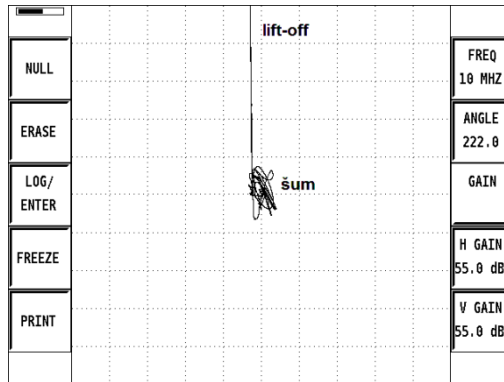




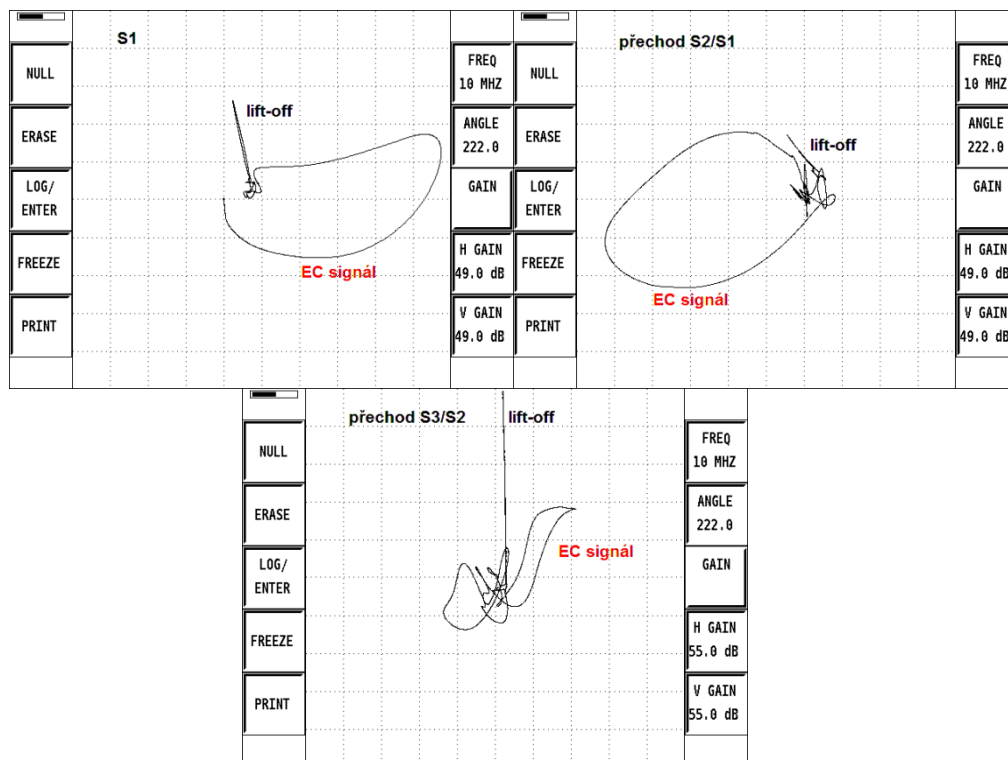
Obr. 7.20 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 9 MHz

### COMPROBE 10 MHz

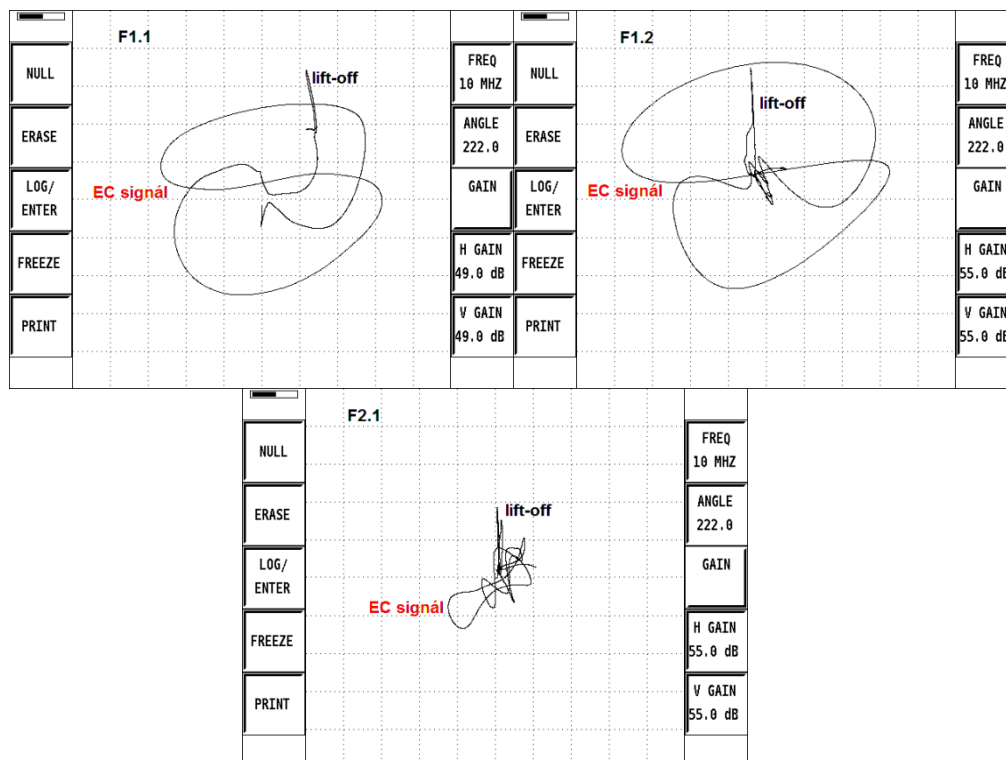
Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny EC signály šumu (viz Obr. 7.21) a detekovaných umělých vad na vzorku 5 (viz Obr. 7.22, Obr. 7.23 a Obr. 7.24). Všechny odhalené vady, kromě nově odhalené F2.1 a F6 vůči COMPROBE 9 MHz, mají dobrý odstup signálu od šumu použitelný v provozních podmínkách. Fázové posuvy signálu a oddálení jsou téměř stejné jako v případě COMPROBE 9 MHz. Dle odhalených umělých vad lze konstatovat, že touto sondou lze detekovat nespojitosti v tomto materiálu do hloubky cca 3,9 mm.



Obr. 7.21 EC signál laminátu bez defektu při pracovní frekvenci 10 MHz



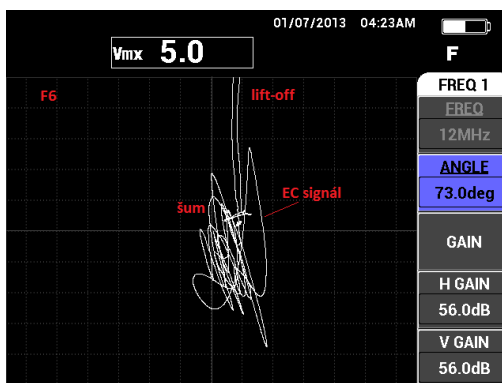




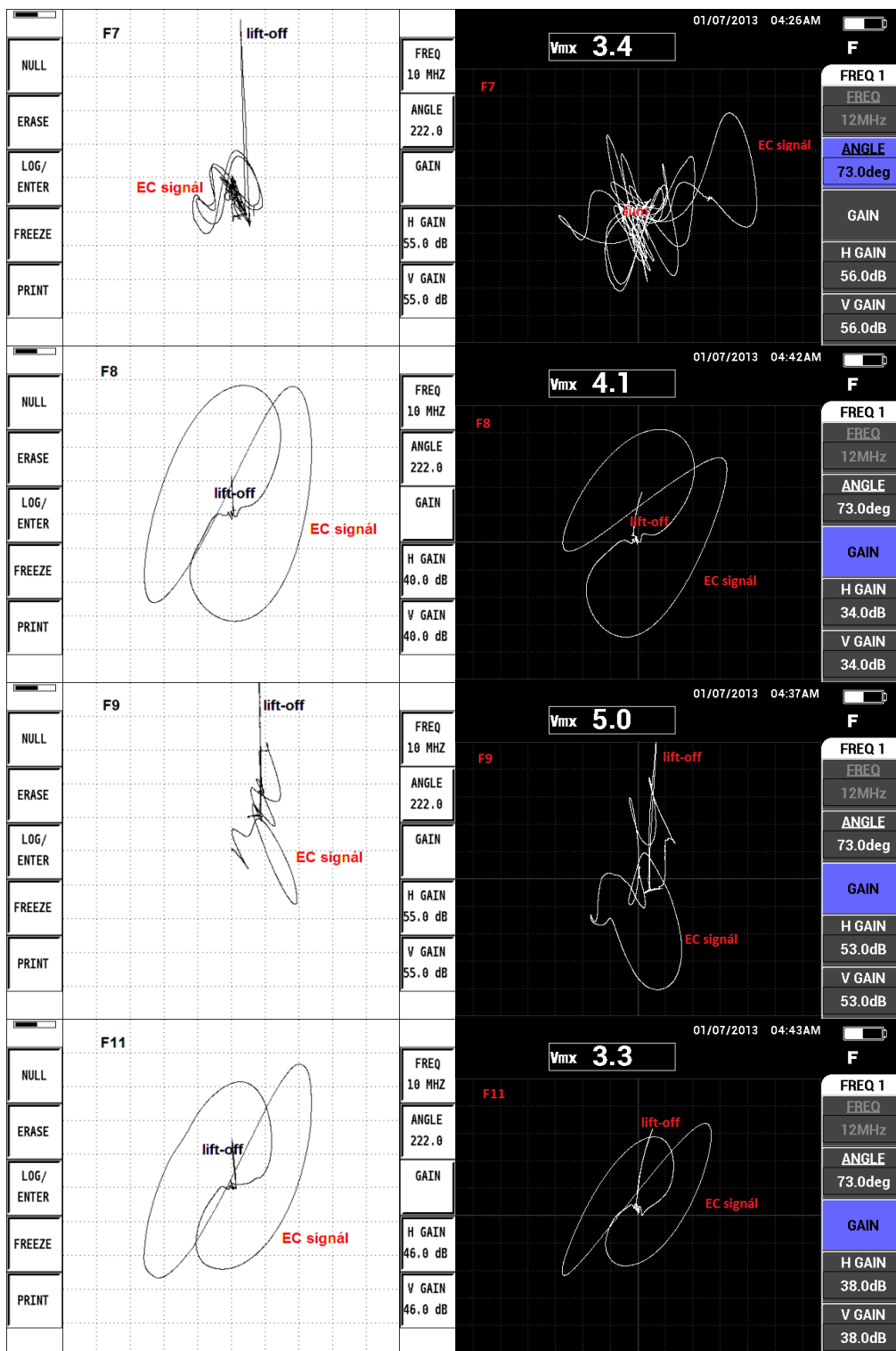
Obr. 7.22 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 10 MHz

Na Obr. 7.23 je zobrazena umělá vada označená jako F6, která při použití optimální pracovní frekvence  $f = 10$  MHz a přístroje Nortec 500D nebyla detekována. S použitím přístroje Nortec 600D, který optimální pracovní frekvenci posouvá na vyšší hodnotu, byla tato vada detekována mezní frekvencí přístroje  $f = 12$  MHz. Ze záznamu je patrný fázový posuv mezi lift-off a užitečným signálem. Hodnota SNR je minimální.

Na Obr. 7.24 jsou zobrazeny EC signály jednotlivých detekovaných umělých nespojitostí pomocí obou přístrojů. Je patrné, že zvýšením frekvence dochází ke zvýšení citlivosti, tedy amplitudy signálů, a to při nižších nebo téměř stejných hodnotách zesílení.



Obr. 7.23 Detekovaná vada F6

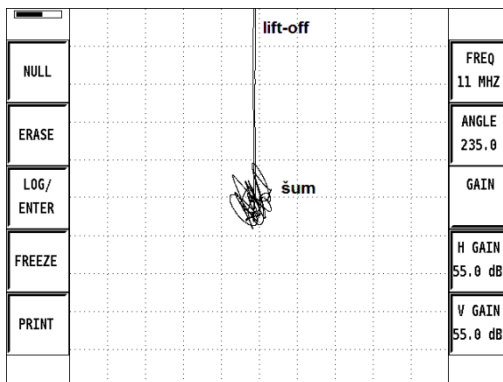


Obr. 7.24 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 10 MHz při použití Nortec 500D (vlevo) a při pracovní frekvenci 12 MHz při použití Nortec 600D (vpravo)

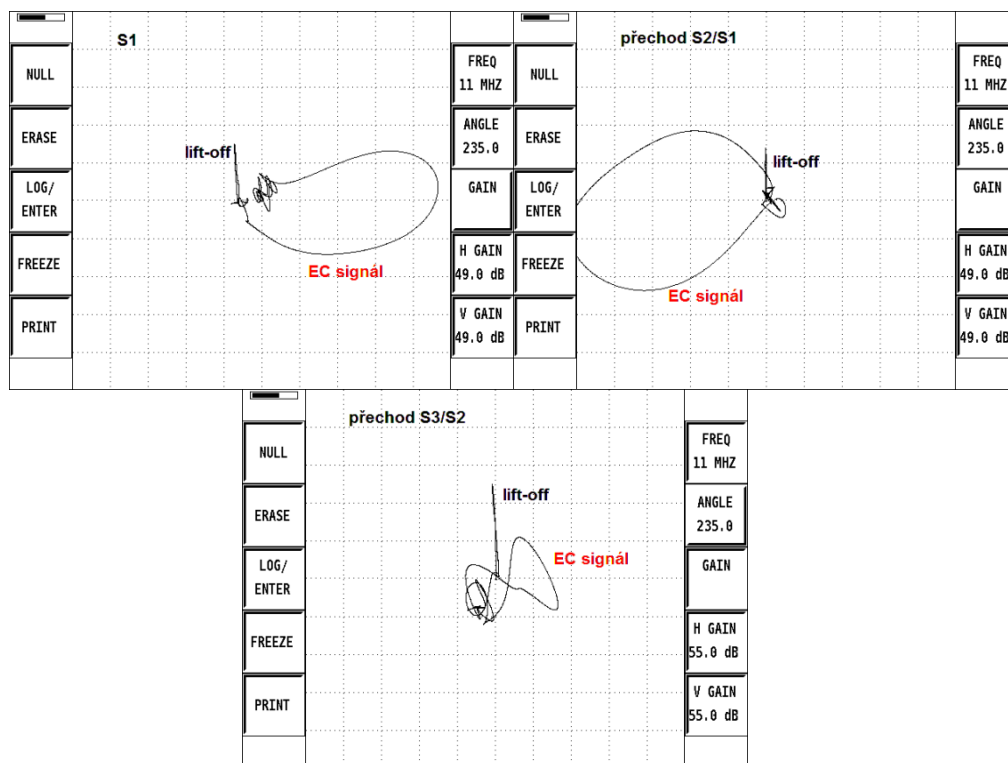
### COMPROBE 11 MHz

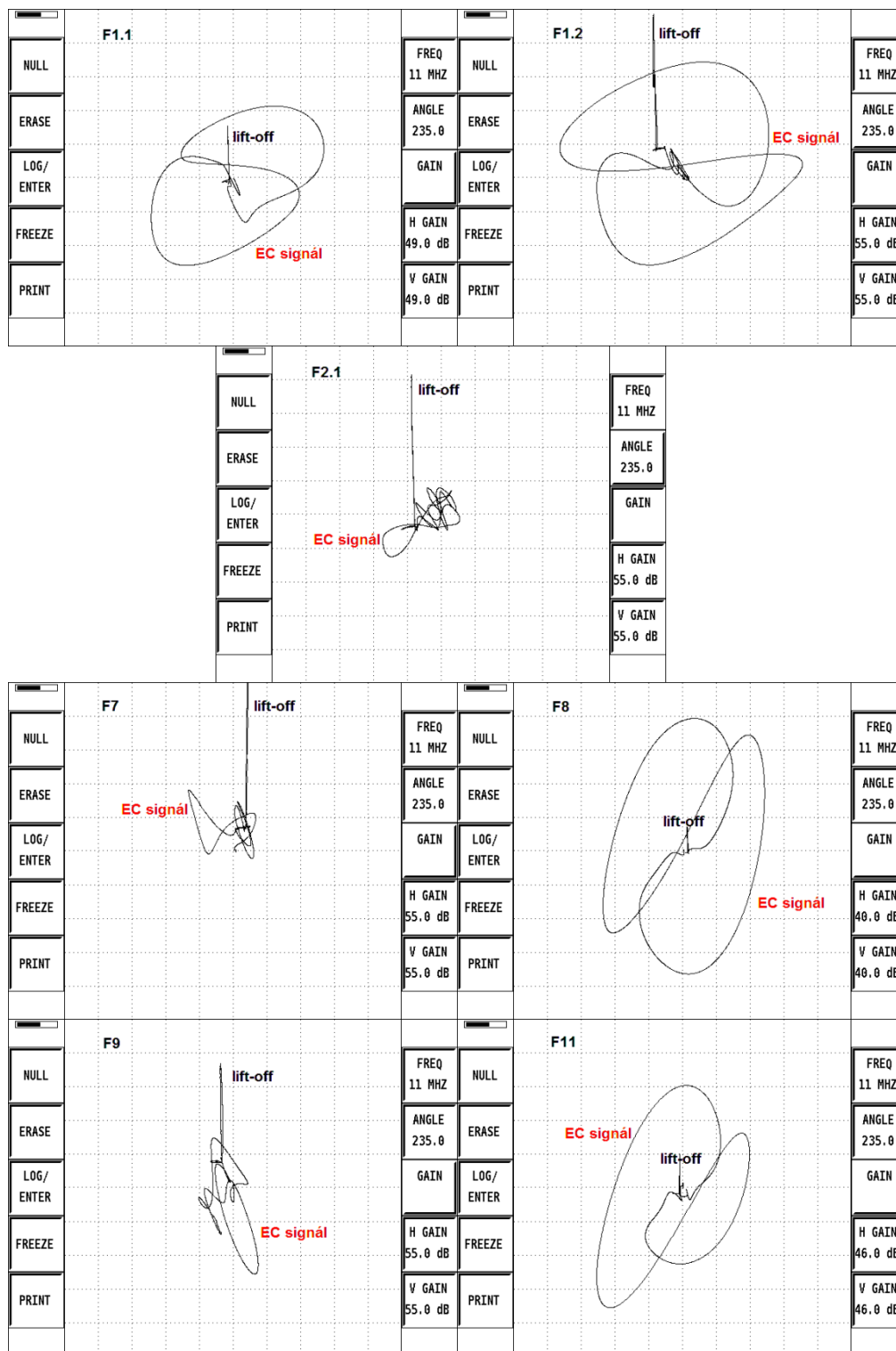
Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny EC signály šumu (viz Obr. 7.25) a detekovaných umělých vad na vzorku 5 (viz Obr. 7.26). Všechny odhalené vady mají, mimo F2.1, dobrý odstup signálu od šumu použitelný v provozních

podmínkách. Fáze signálu a oddálení jsou téměř stejné jako v případě COMPROBE 10 MHz. Dle odhalených umělých vad lze opět konstatovat, že touto sondou lze detekovat nespojitosti v tomto materiálu do hloubky cca 2,8 mm.



Obr. 7.25 EC signál laminátu bez defektu při pracovní frekvenci 11 MHz





Obr. 7.26 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 11 MHz

Souhrn odhalených poškození jednotlivými sondami na vzorku 5 je zobrazen v následující Tab. 7.2.

Vada	Typ	Vzdálenost vady od	Detekce		
			COMPROBE	COMPROBE	COMPROBE

		sondy [mm]	9 MHz	10 MHz	11 MHz
F1.1	FBH	1,0	1	1	1
F1.2	FBH	1,0	1	1	1
F2.1	FBH	2,4	0	1	1
F2.2	FBH	2,4	0	0	0
F3	FBH	3,9	0	0	0
F4	FBH	3,9	0	0	0
F5	FBH	3,9	0	0	0
F6	FBH	3,9	0	0 (1*)	0
F7	FBH	3,9	1	1	1
F8	FBH	0,3	1	1	1
F9	FBH	2,4	1	1	1
F10	FBH	4,6	0	0	0
F11	FBH	0,3	1	1	1
F12	FBH	2,4	0	0	0
F13	FBH	4,6	0	0	0
S1	Step	1,1	1	1	1
S2	Step	2,6	1	1	1
S3	Step	4,0	0	0	0
N1	Notch	3,6	0	0	0
N2	Notch	3,6	0	0	0

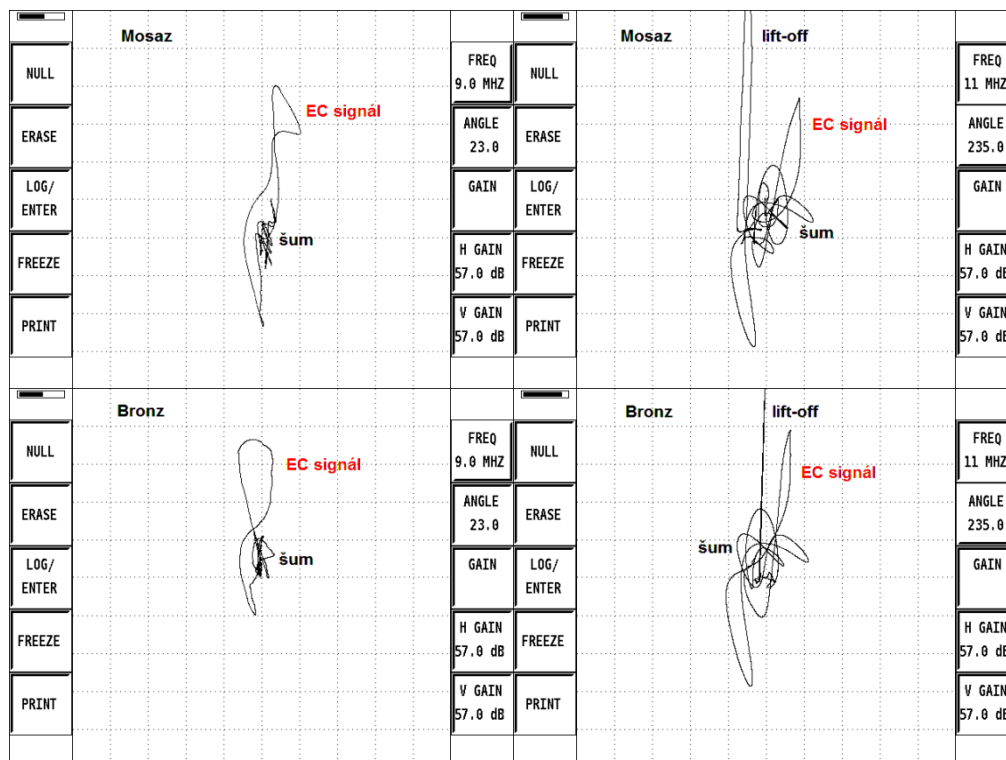
\*) COMPROBE 10 MHz při  $f = 12$  MHz při použití přístroje Nortec 600D

Tab. 7.2 Souhrn výsledků pro vzorek 5

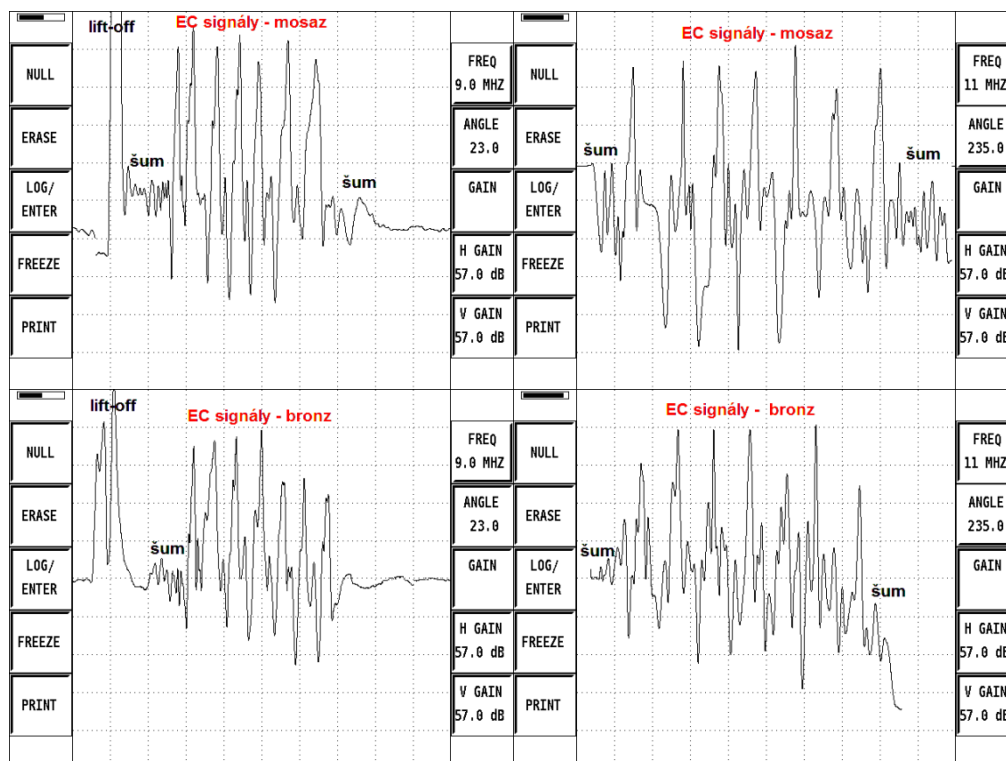
### Vzorek 6 – vzorek BMS 8-353 laminát

Odezvy vířivých proudů na umělé vady v podobě tkanin z mosaze a bronzu byly při použití sond COMPROBE 9 MHz a COMPROBE 11 MHz v obou případech spolehlivě odhaleny (viz Obr. 7.27 a Obr. 7.28). Při porovnání signálu opět dochází se zvyšující frekvencí ke zvýšení citlivosti sondy. Dochází tedy ke zvětšení odezvy vířivých proudů na stejnou vadu při různých optimálních frekvencích pro danou sondu.

Rozdíl fáze signálu a lift-off není příliš velký, nicméně poměr užitečného signálu k šumu je v obou případech dostačující, minimálně 2:1.



Obr. 7.27 EC signály vložených tkanin mosaze a bronzu v XY zobrazení pro pracovní frekvenci 9 MHz (vlevo) a 11 MHz (vpravo)



Obr. 7.28 EC signály vložených tkanin mosaze a bronzu v Yt zobrazení pro pracovní frekvenci 9 MHz (vlevo) a 11 MHz (vpravo)

### 7.1.2 Stínící kryty a jejich vliv na výslednou odezvu vířivých proudů

Problematika stínících krytů je podrobně popsána v Kap. 6.1. Při experimentálním zkoušení byly na jednotlivé sondy nasazeny stínící kryty ve formě kroužků (viz Obr. 7.29) z různých materiálů (hliník, mosaz, austenitická ocel, slitina železa, ferit).



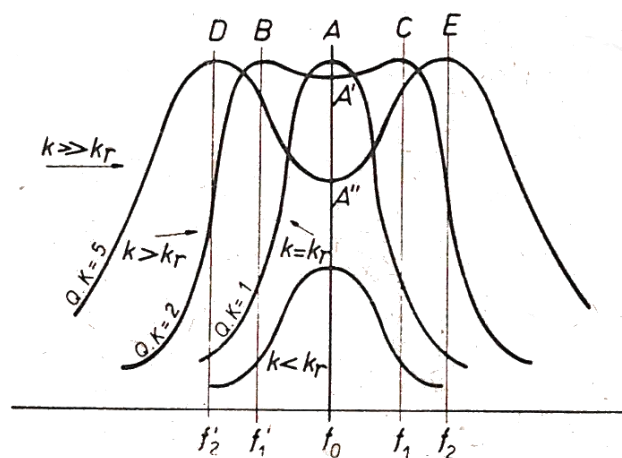
Obr. 7.29 Stínící kryty na jednotlivých sondách (ferit, mosaz, slitina železa)

Při zkoušení pomocí přístroje nižší řady Nortec 500D byly na vzorku 4 na tvarové nespojitosti, nazývané jako přechod 2, naměřeny tyto následující odezvy viz Obr. 7.31. Při použití sondy označené jako COMPROBE 9 MHz byla zjištěno, že při této pracovní frekvenci 9 MHz se sonda s použitím feritového kroužku dostává do rezonance a dochází ke zvětšení amplitudy, tedy vlastní indukčnosti cívky. Tento stav by se mohl zdát žádoucí, ovšem tomu tak není. U dvou vázaných rezonančních obvodů, naladěných na stejnou frekvenci, závisí chování takové soustavy značně na činiteli vazby, značeným  $k$ . Teoreticky může dosáhnout hodnoty 1, což ovšem není v praxi možné, jelikož by se přenos energie z jedné cívky do druhé uskutečnil bez ztrát. Činitel vazby je dle [30] definován vztahem:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} [-]$$

a vyjadřuje poměr vzájemné indukčnosti  $M$  ke střední indukčnosti obou cívek  $L_1$  a  $L_2$ . Stupeň induktivní vazby se řídí vzájemnou vzdáleností cívek. U vysokofrekvenčních obvodů dochází k přenosu energie i při malém stupni vazby. Při tzv. kritickém činiteli vazby, označovaného jako  $k_r$  dochází k maximálnímu stupni přenosu energie. Tvar rezonanční křivky je zobrazen na Obr. 7.30. Při  $k < k_r$  je vazba mezi cívkami volná. Při  $k = k_r$  je přenos energie na základní frekvenci  $f_0$  největší. Dalším zvyšováním vazby mezi cívkami  $k > k_r$  již nedochází ke vzrůstu napětí, ale dochází k rozšíření rezonančního vrcholu na frekvenci  $f_0$  na další dva vrcholy B a C na frekvencích  $f_1$  a  $f_1'$ . Dochází zde k mírně nadkritické vazbě, při níž dochází k mírnému poklesu rezonančního napětí na hodnotu  $A'$ . Dochází-li k dalšímu zvyšování vazby, rozšiřuje se vzdálenost mezi rezonančními vrcholy a také se snižuje rezonanční napětí na základní frekvenci  $f_0$  a křivka klesá do bodu  $A''$ . Při

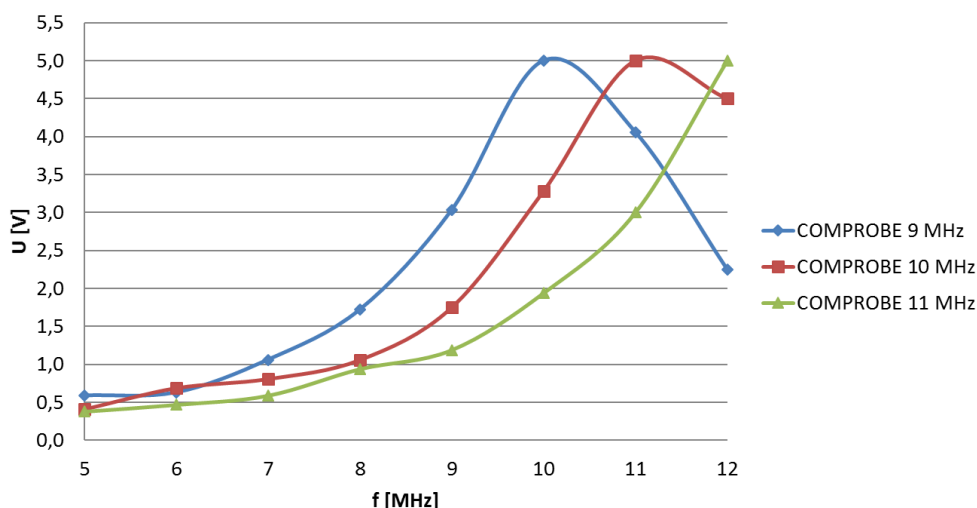
dalším zvyšování vazby se rezonanční vrcholy posouvají do vrcholů D a E na frekvencích  $f_2$  a  $f_2'$ .



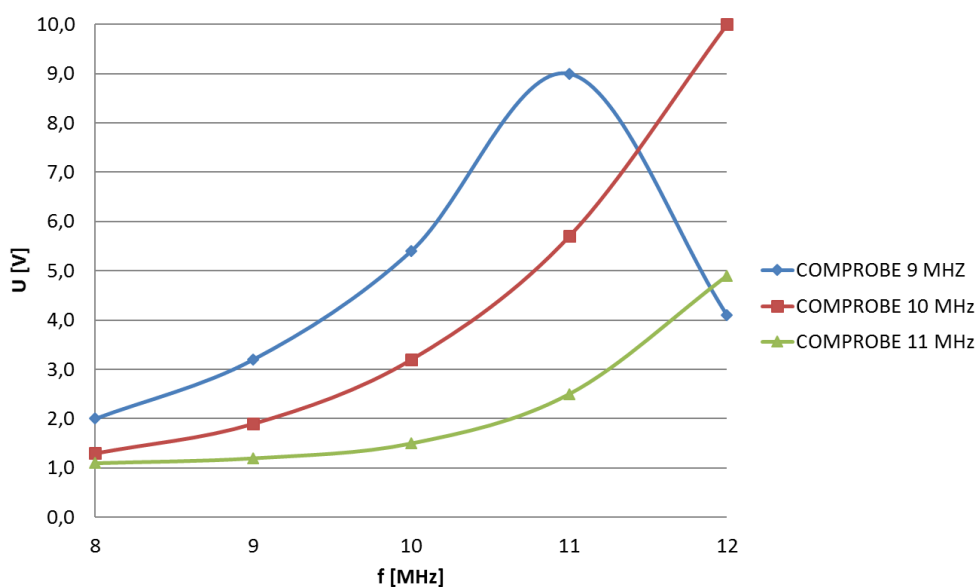
Obr. 7.30 Tvar rezonanční křivky pro různé stupně vazby [30]

Při kritické vazbě dosahuje napětí na základní frekvenci maximální amplitudy (viz Obr. 7.13a, Obr. 7.15a a Obr. 7.17a). Na těchto záznamech je patrné, kdy se sonda bez stínících krytů dostává do rezonance. U každé navržené sondy se rezonanční frekvence liší v závislosti na odlišných počtech závitů a také použitých přístrojů vířivých proudů (viz Graf 7.1 a Graf 7.2). Z jednotlivých grafů lze tuto závislost projevu rezonance na výše zmíněných faktorech pozorovat. Frekvenční rozsah přístrojů se nachází v rozmezí 50 Hz (Nortec 500D)/10 Hz (Nortec 600D) až 12 MHz. Je patrné, že jednotlivé sondy se při použití různých přístrojů dostávají do oblasti nasycení při odlišných pracovních frekvencích. V případě sondy COMPROBE 9 MHz se sonda dostává do saturace při  $f = 10$  MHz (Nortec 500D) a při  $f = 11$  MHz (Nortec 600D). Tento rozdíl lze přiřadit k faktům, že jednotlivé přístroje obsahují odlišné elektronické obvody a po diagnostické stránce se zkoušení provádí na mezních pracovních frekvencích přístroje, kde nemusí být úplně zaručena stabilita signálů, přenositelnost a opakovatelnost dat. Nicméně z grafů rezonančních křivek je patrné, že nedochází k využití celého frekvenčního rozsahu sond COMPROBE 10 MHz a COMPROBE 11 MHz.





Graf 7.1 Rezonanční křivky jednotlivých sond při použití přístroje Nortec 500D

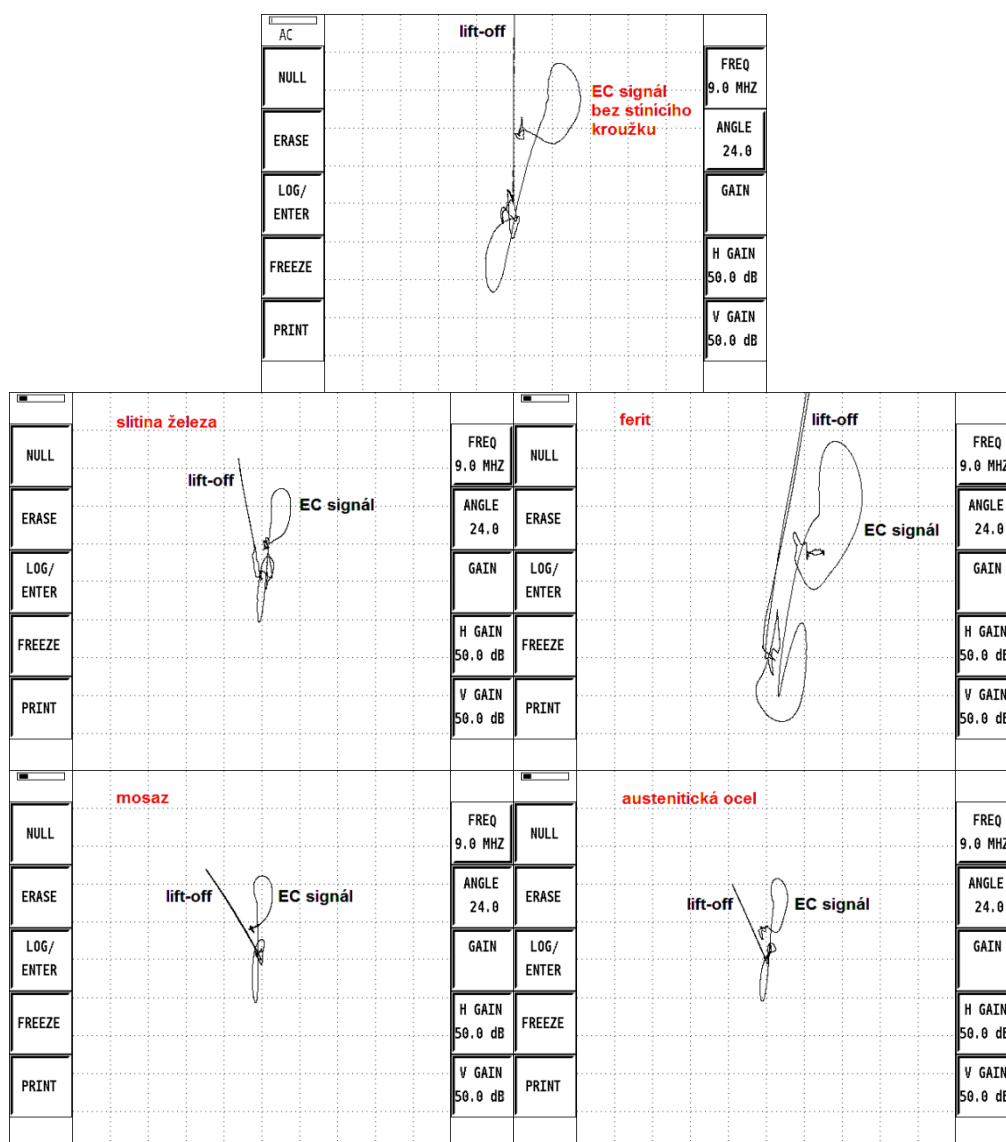


Graf 7.2 Rezonanční křivky jednotlivých sond při použití přístroje Nortec 600D

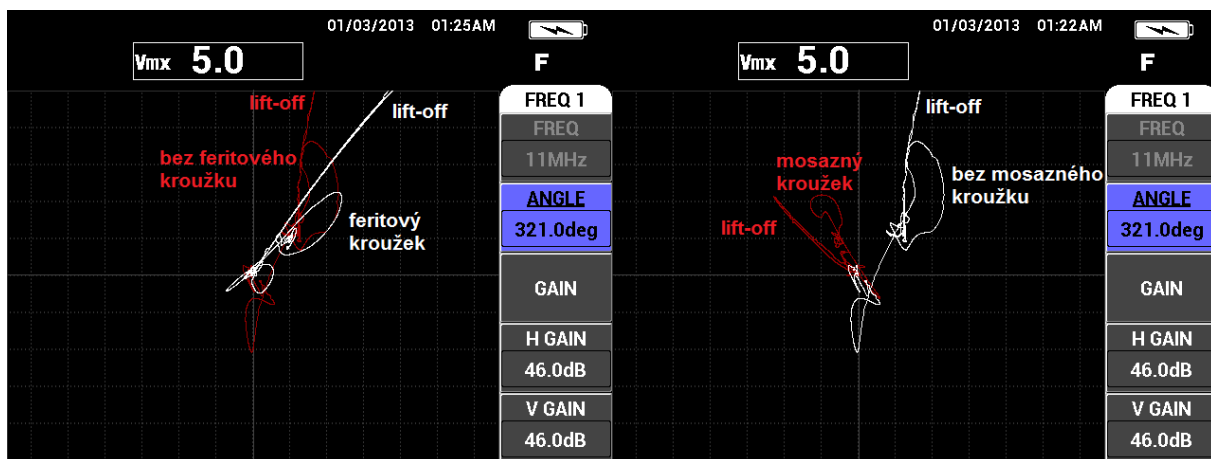
Projevy rezonance lze využít pro korektní nastavení pracovní frekvence a zamezit tak nestabilnímu zkoušení na mezních parametrech přístroje. Jak se ukázalo, tak důležitou roli v oblasti zkoušení a rezonance hrají také stínící kroužky. Na Obr. 7.31 lze pozorovat nejen změnu amplitudy signálu při použití stínících kroužků různých materiálů, ale také změnu fáze lift-off. Neferomagnetické materiály sice zmenšují citlivost sondy, ale na rozdíl od feromagnetických velice výrazně zvětšují rozdíl fáze mezi signálem vířivých proudů nespojitosti a signálem lift-off (oddálení). Tento projev lze velmi dobře využít v provozních podmínkách zkoušení, jelikož posuv fáze poskytuje informaci o hloubce (poloze) nespojitosti. Amplituda signálu poskytuje informaci o velikosti nespojitosti. Na Obr. 7.31 je ukázán jev, který dokazuje, že přesto, že sonda COMPROBE 9 MHz (při použití Nortec 500D) se bez

použití stínícího kroužku dostává do rezonance až při frekvenci 10 MHz, tak při použití feritového kroužku se sonda dostane do oblasti nasycení mnohem dříve. Je to dáno tím, že feromagnetický materiál mění vlastní indukčnost cívky, tudíž je to jako by došlo ke zvýšení počtu závitů. Navíc se v podstatě zkoušení pohybuje „těsně“ před rezonancí a je nutné takovéto fyzikální projevy uvážit před nastavením zkušebních parametrů.

Při použití Nortec 600D se tento projev rezonance u feritového stínícího krytu neuskutečnil. Použitím feritového kroužku nedošlo k úplnému nasycení, došlo korektně ke zmenšení amplitudy a minimálnímu rozdílu fáze signálu a lift-off (viz Obr. 7.32). Lze tedy pozorovat korektní odezvu použitelnou pro zkoušení. Při použití mosazného stínícího krytu dochází opět ke zmenšení amplitudy a rozevření fázového úhlu mezi signálem nespojitosti a signálem oddálení.



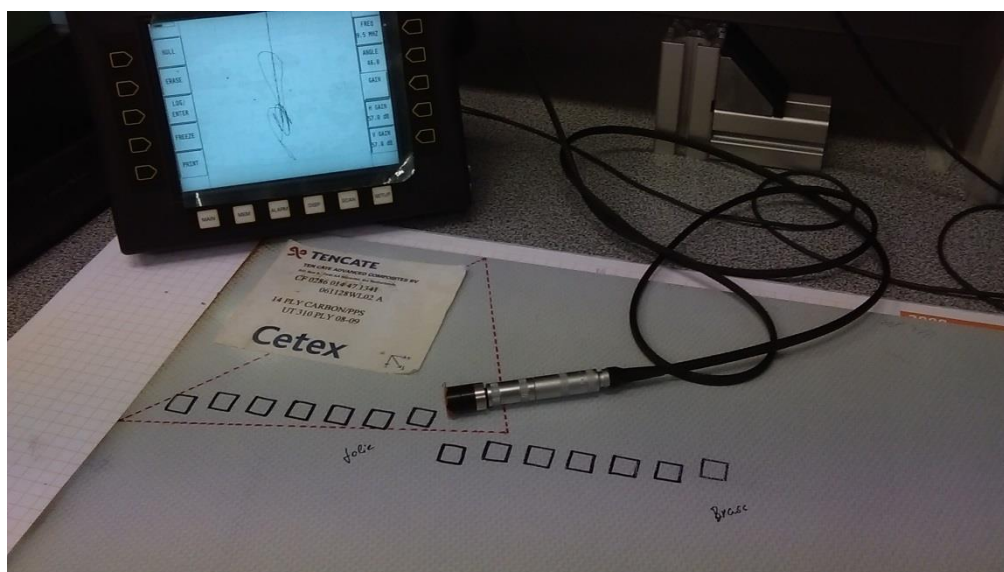
Obr. 7.31 EC signály jednotlivých stínících kroužků u sondy COMPROBE 9 MHz (přístroj Nortec 500D)



Obr. 7.32 EC signály jednotlivých stínících kroužků u sondy COMPROBE 9 MHz (přístroj Nortec 600D)

## 7.2 Finální sonda pro kontrolu uhlíkových kompozitních materiálů

Z jednotlivých experimentů a naměřených dat bylo zjištěno, že sonda označená jako COMPROBE 10 MHz vykazuje nejpříjemnější výsledky detekce nespojitostí na všech dostupných vzorcích (INDETEC ndt, VZLU, Latecoere Czech Republic) a při použití starší a nové řady přístroje Olympus Nortec. Celý zkušební systém je zobrazen na Obr. 7.33.



Obr. 7.33 Zkušební systém

Tato sonda dle experimentálních dat vykazuje velmi dobrý odstup užitečného signálu od šumu na vybraných umělých nespojitostích, čistý a stabilní signál. Parametry sondy INDETEC COMPROBE 10 MHz jsou následující:

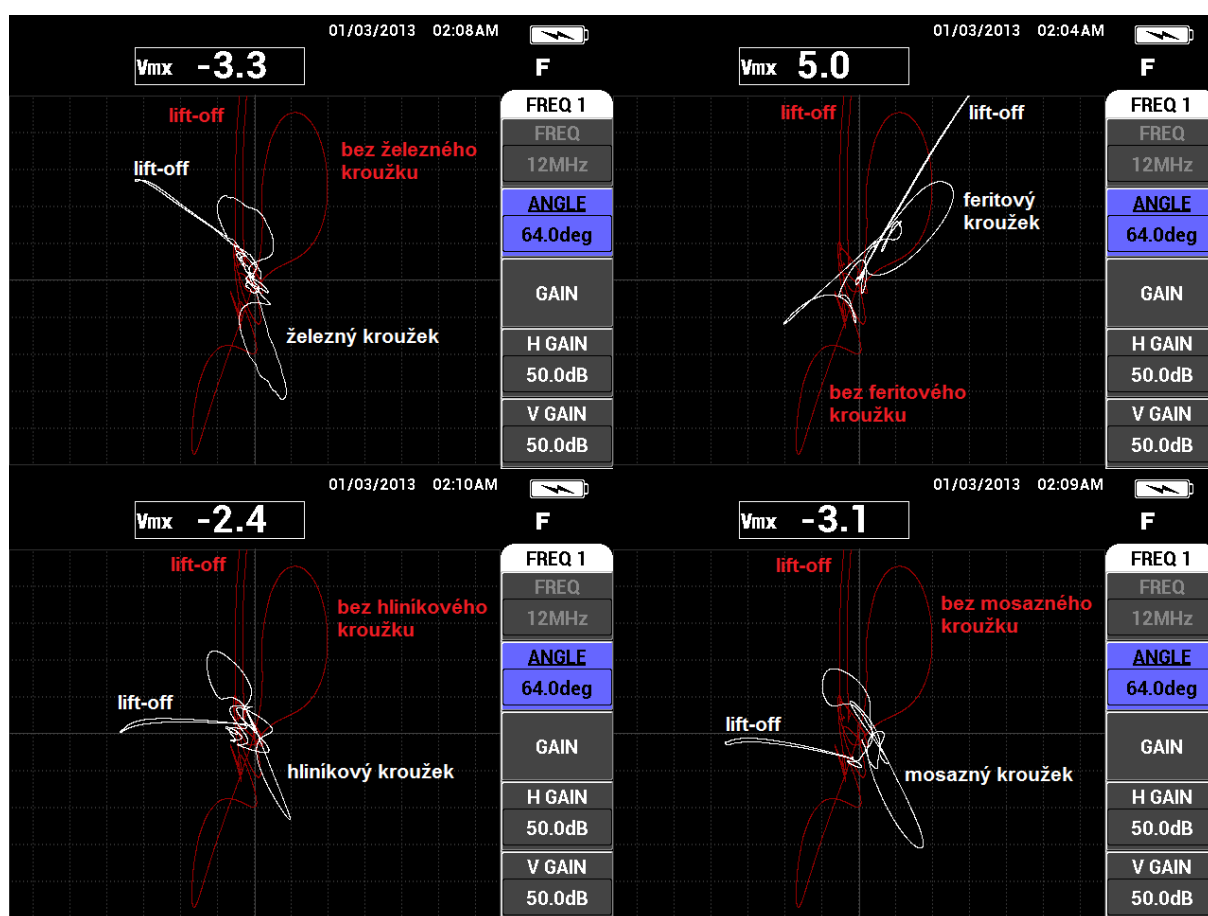
- Cívka s jádrem/bez jádra – s feritovým jádrem
- Činitel zaplnění – 80 %
- Typ snímače – příložný

- Typ režimu zapojení cívek – přijímač-vysílač.
- Provedení snímače – koncepce s budicí a snímací cívkou, stíněný/nestíněný dle použití stínícího krytu (viz Obr. 7.34)
- Pracovní frekvence –  $f = 10$  MHz (Nortec 500D)  
 $f = 12$  MHz (Nortec 600D)

Tuto sondu COMPROBE 10 MHz lze použít pro kontrolu materiálů, které jsou charakterizovány následovně:

- Výztuha kompozitu – uhlíková vlákna, uhlíková tkanina
- Matrice kompozitu – pryskyřice, polymery (FRP)
- Uspořádání (orientace) vláken – jednosměrný, jednosměrně vyztužený vůči sobě pootočený
- Tloušťka materiálu (počet vrstev) – lze nalézt nespojitosti do tloušťky materiálu 3,9 mm.

Na Obr. 7.34 jsou záznamy EC signálů tvarové nespojitosti při zkoušení pomocí přístroje nové řady Nortec 600D. Z těchto záznamů je patrný značný vliv použití stínícího krytu z různých materiálů. Při zkoušení v provozu lze pro zajištění většího fázového rozdílu mezi signálem vady a signálem oddálení použít nemagnetické materiály jako mosaz, austenitickou ocel či hliník.





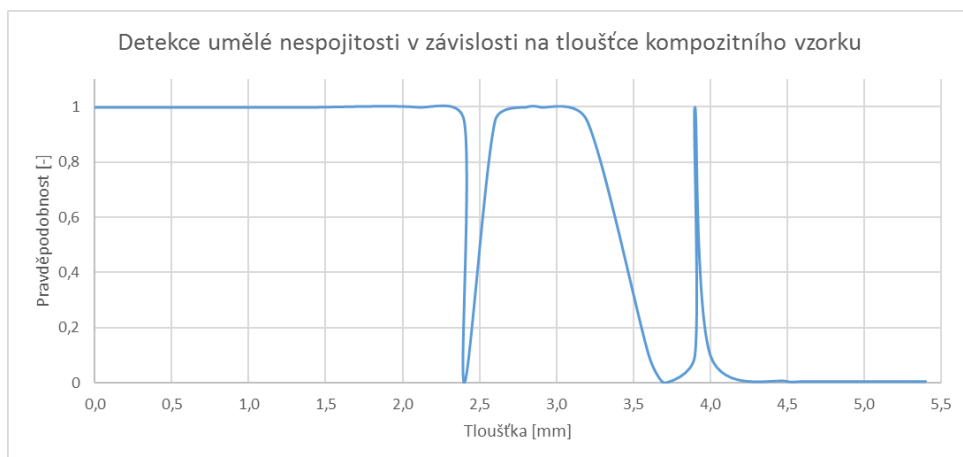
Obr. 7.34 EC signály jednotlivých stínících kroužků u sondy COMPROBE 10 MHz (přístroj Nortec 600D)

### 7.2.1 Detekce nespojitosti v závislosti na tloušťce materiálu

Detekcí nespojitostí, v letectví zejména únavových trhlin, se zabývá tzv. pravděpodobnost detekce (Probability of Detection, POD). Tato detekce poškození je nedílnou součástí nedestruktivní kontroly. Celkové nedestruktivní hodnocení musí zahrnovat veškeré faktory, které by mohly ovlivnit výslednou POD křivku. Těmito faktory jsou lidský faktor a s ním související kvalifikace personálu, přístup k oblasti určené ke kontrole, metodika kontroly, přístrojové vybavení, opakovatelnost měření, pravděpodobnost 90 % s 95 % úspěšností nalezení poškození, poměr signál šum a referenční vzorky. Pro vyhodnocování naměřených dat a modelování POD křivky se využívá dvou hlavních přístupů. První přístup analyzuje vztah mezi amplitudou signálu  $\hat{a}$  a velikostí poškození  $a$ . Druhý přístup porovnává pozitivní odezvu na přítomnost vady (Hit) vůči nenalezené, ale přítomné vadě. (Miss). Tento přístup je znám jako Hit/Miss analýza. Těmito přístupy se zabývá příručka MIL-HDBK-1823A. Výpočet lze provést pomocí softwaru mh1823 POD.

K dispozici bylo celkem 6 vzorků s uměle vytvořenými vadami ve formě inzertů z kaptonové fólie, mosazné a bronzové tkaniny, vývrtů a drážek, spojů a tvarových indikací typu změny tloušťky materiálu.

Jelikož v tuto chvíli nejsou dostatečné podmínky pro stanovení této POD křivky (nízký počet vzorků, nemožnost ověření parametrů fraktografickou analýzou, neznámé proměnné v oblasti diagnostiky) byla stanovena pouze velice jednoduchá křivka zobrazující nalezené nespojitosti v závislosti na hloubce, ve které se umělá nespojitost nachází (viz Graf 7.3). V žádném případě nejde o klasickou koncepci s minimální detekovatelnou délkou trhliny, jelikož nelze stanovit klasickou POD křivku. Z grafu je patrné, že byly odhaleny umělé nespojitosti, nacházející se nejen na povrchu, ale také pod povrchem až do hloubky cca 3,9 mm. Nenalezení umělé nespojitosti v hloubce 2,4 mm a naopak nalezení umělé nespojitosti v hloubce 3,9 mm souvisí s rozlišovací schopností sondy z hlediska minimální velikosti vady.



*Graf 7.3 Křivka nalezení umělé nespojitosti sondy COMPROBE 10 MHz v závislosti na tloušťce materiálu*

## 8 DISKUZE NOVÝCH POZNATKŮ VYCHÁZEJÍCÍ Z NÁVRHU SONDY VÍŘIVÝCH PROUDŮ

Na počátku zrodu námětu této disertační práce nebylo jisté, zda se opravdu podaří vyvinout sondu vířivých proudů, která bude schopna spolehlivě detekovat výrobní, provozní či únavové poškození.

Jako první parametr, který bylo nutné specifikovat, byl frekvenční rozsah, popř. pracovní frekvence. Specifikace frekvenčního rozsahu sondy vycházel z poznatků jiných experimentů, ve kterých se uváděl rozsah pracovní frekvence řádově MHz. Tudíž byl navržen snímač, který je schopen pracovat na vysokých frekvencích, okolo hodnoty frekvence 10 MHz. A z jakého důvodu? Fyzikální podstata je taková, že uhlíkové vlákno patří mezi látky s nízkou vodivostí, pokud se nehovoří o monovrstvě grafenu, která je silně vodivá. Uhlíkové vlákno se chová v podstatě jako obvod složený z odporů a kondenzátorů, kde zcela jistě dochází k určitým ztrátám. Abychom dosáhli vytvoření sekundárního magnetického pole v uhlíkovém vlákne, je zapotřebí vysoké budící frekvence primárního budícího magnetického pole. Tím se dosáhne větší citlivosti na potenciální nespojitost. Každá cívka má svojí vlastní indukčnost, jejíž hodnotu lze měnit průměrem cívky, počtem závitů, typem a průměrem drátu vhodného pro vinutí a typem jádra.

Právě typ jádra poskytuje vysokou variabilitu v elektrických parametrech. U všech experimentů byla vysokofrekvenční cívka navinuta na tělísko s feritovým jádrem závit vedle závitu. Použití feritového jádra oproti vzduchovým cívkám má tu výhodu, že vlivem silnějšího magnetického pole lze dosáhnout zvětšení vlastní indukčnosti při menších rozměrech cívky s menším počtem závitů. Aby tedy bylo dosaženo ještě většího účinku elektromagnetického pole, je cívka navinuta právě na feritové jádro. Ani v tomto, a ani v jednom z případů jiných experimentů, nebylo použito tělísko s železovým jádrem. Důvodem je, že dochází k saturaci cívky na vyšších kmitočtech vlivem nekolinárně nižší permeability železových materiálů oproti feritovým.

Stejně jako u ostatních experimentů i navržený snímač je zapojen v režimu přijímač-vysílač. Tento režim zapojení je nezávislý na elektronice přístroje a zvyšuje citlivost celého systému.

Otázka stínění snímače nebyla v jiných experimentech zmíněna. Buď nebylo žádné stínění použité, nebo jej autoři jiných navržených snímačů nezmínili. U tohoto návrhu snímače byl experimentálně ověřen vliv na rozptyl výsledného elektromagnetického pole. Při použití došlo k výrazné změně vlastní indukčnosti cívky. Na jednotlivé sondy byly nasazeny stínící kryty ve formě kroužků z různých materiálů (hliník, mosaz, austenitická ocel, slitina železa, ferit). Bylo zjištěno, že neferomagnetické materiály stejně jako feromagnetické zmenšují citlivost sondy, ale u neferomagnetických materiálů navíc dochází k výraznému zvětšení fázového rozdílu mezi signálem vířivých proudů nespojitosti a signálem lift-off (oddálení). Tento poznatek lze uplatnit zejména při rozlišitelnosti jednotlivých druhů nespojitostí.

Celý vývoj byl omezen frekvenčním rozsahem použitých přístrojů Nortec 500D a Nortec 600D. Mezní hodnota frekvence přístrojů 12 MHz zabránila zkoušení na vyšších kmitočtech a zamezila tak dalšímu sběru dat a cenných informací. Elektrické parametry sond optimalizovány na vyšší frekvence 10 MHz a 11 MHz nemohly být plně prověřeny, jelikož nedošlo k využití celého frekvenčního rozsahu sond. Nicméně při použití stejné sondy, ale rozdílného přístroje a při použití vyšší pracovní frekvence bylo experimentálně prokázáno, že sonda je schopná odhalit umělou vadu, kterou před tím nedetekovala. Tento jev lze jednoznačně spojit i se zvýšením hloubky vniku vířivých proudů. Což vede k zamyšlení se nad fyzikální podstatou standardní hloubky vniku u uhlíkových kompozitních materiálů. Z provedených experimentů jednoznačně vyplývá, že se zvyšující se frekvencí dochází ke zvětšení hloubky vniku vířivých proudů do uhlíkových kompozitních konstrukcí. Tato definice je ovšem omezena zejména orientací uhlíkových vláken a použitým materiálem. Ty mají zásadní vliv na diagnostiku z hlediska velikosti šumu a získání užitečného signálu. Nicméně pouze jeden experiment zmínil hloubku vniku vířivých proudů. Na Obr. 3.27 je zobrazen snímek kontrolovaného schodovitěho vzorku různých tloušťek. Vzorek byl kontrolován pomocí počítačové tomografie a pomocí vířivých proudů. Ovšem vzorek pro kontrolu vířivými proudy je kontrolován z druhé strany vzorku než v případě počítačové tomografie. Z výsledků tedy není jasné, v jaké hloubce se nespojitosti nacházejí. V tomto případě se podařilo nalézt rozsáhlou plošnou nespojitost až v hloubce 3,9 mm v laminátu PPS vyztuženého uhlíkovými vlákny. Tuto hodnotu nelze porovnat s jinými, jelikož ji žádný dostupný experiment neuvádí.

Naopak čím se dostupné experimenty zabývají je rozlišovací schopnost. Kontrola má vysokou přesnost z hlediska rozlišovací schopnosti signálů (SNR) tam, kde je signál šumu dobře oddělený od signálu vady. Pokud je rozlišovací schopnost nízká nebo žádná, pak nelze NDI brát za relevantní. Požadavek na rozlišovací schopnost jednotlivých typů nespojitostí dle fázového posuvu i amplitudy byl stanoven a ověřen.



## 9 ZÁVĚR

Hlavním cílem této disertační práce bylo navrhnout snímač vířivých proudů pro kontrolu uhlíkových kompozitních materiálů, zejména CFRP. Při návrhu prototypu snímače se vycházelo ze zkušeností, provedených experimentů a poznatků ostatních provedených experimentů.

Ze zkušeností získaných v oblasti návrhu snímačů neexistují žádné přesné analytické metody, které by zaručily, že snímač bude navržen správně. Při postupu návrhu se často jednalo o metodu „pokus/omyl“, tudíž bylo nezbytné potřebné kroky v návrhu opakovat, dokud nebylo dosaženo optimálního návrhu. Pro optimalizaci všech elektrických a mechanických parametrů cívky byly k dispozici kompozitní vzorky obsahující umělé nespojitosti simulující různé typy poškození. Vzhledem k plošnému tvaru a přístupu ke zkoušené součásti bylo zvoleno tužkové provedení sondy o průměru těla sondy cca 10 mm a senzoru 6 mm.

Vzhledem k tomu, že se zkoušení pohybuje na mezních kmitočtech přístrojů nelze plně zaručit opakovatelnost měření. Porovnáním experimentálních dat z obou přístrojů Nortec 500D a Nortec 600D bylo zjištěno, že přenositelnost dat není bez nastavení zkušebních parametrů pro dosažení požadované citlivosti možná i přesto, že se jedná o stejného výrobce.

Na základě experimentálního měření, které bylo provedeno na vzorcích využívaných v letectví, byly získány nové poznatky, které rozšířily oblast vývoje o následující:

- ✓ Byly navrženy tři sondy, ze kterých nejlépe vykazuje optimální parametry pro zkoušení sonda označená jako INDETEC COMPROBE 10 MHz v klasické koncepci s vysílací a přijímací cívkou, fungující na vysokých kmitočtech se standardní dostupnou měřicí technikou.
- ✓ Byl stanoven vliv stínících krytů různých materiálů na fázový posuv mezi užitečným signálem a signálem oddálení, kdy neferomagnetické materiály sice zmenšují citlivost sondy, ale na rozdíl od feromagnetických velice výrazně zvětšují rozdíl fáze mezi signálem vířivých proudů nespojitosti a signálem lift-off (oddálení). Bylo zjištěno, že stínící kryty zásadně zlepšují rozlišitelnost jednotlivých EC signálů.
- ✓ Byl posouzen vliv použití různých přístrojů vířivých proudů na přenositelnost a opakovatelnost dat.
- ✓ Byly ověřeny dostupné informace ohledně využití vířivých proudů pro kontrolu kompozitních materiálů CFRP.
- ✓ Experimentálně bylo zjištěno, že se zvyšující pracovní frekvencí se zvyšuje citlivost sondy na nespojitosti a zvyšuje se hloubka vniku vířivých proudů, což se liší od fyzikální definice standardní hloubky vířivých proudů u kovů.

Jedním z úkolů bylo také posoudit na základě experimentů vhodnost využití pole vířivých proudů ECA. Z hlediska plošné kontroly rozlehlých oblastí draku letadla i

z hlediska interpretace dat by použití této techniky bylo přínosné. Výzkum nebyl zaměřen na nýtové a vícevrstvé uhlíkové kompozitní konstrukce, které se draku letadla vyskytují. Proto techniku ECA, vývoj sondy pro kontrolu nýtových spojů a sestavení jednotky vířivých proudů, která bude schopna generovat vyšší hodnoty budící frekvence, než je 12 MHz a konečně simulaci vzájemné interakce mezi sondou a uhlíkovým kompozitem lze zařadit do námětů pro budoucí výzkum a vývoj v oblasti využití vířivých proudů pro kompozitní uhlíkové materiály.

Sonda byla navržena zejména pro kontroly leteckých konstrukcí a lze ji využít:

- ✓ pro kontrolu plošných částí
- ✓ pro detekci povrchových i podpovrchových nespojitostí v materiálech tloušťky cca 4 mm ve výrobě pro zaručení jakosti výrobku, v provozu při údržbě letadla a při vývoji nových leteckých konstrukcí
- ✓ jako primární nebo doplňkovou metodu zkoušení (například k ultrazvukové a vizuální metodě)
- ✓ pro ruční i automatizované zkoušení.

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Zastoupení jednotlivých kompozitních materiálů na raketoplánu [19] .....	8
Obr. 2.2 Zastoupení materiálů u letounu F-18 [20].....	9
Obr. 2.3 Zastoupení kompozitních materiálů u dopravního letounu B-767 [5].....	9
Obr. 2.4 Ukázka jednotlivých forem uhlíku a) grafit b) diamant c) fullerén [17] .....	10
Obr. 2.5 Ukázka uspořádání atomů uhlíku v monovrstvě grafenu [17].....	10
Obr. 2.6 Skladba vrstveného kompozitu Arall [24] .....	13
Obr. 2.7 Skladba vrstveného kompozitu Glare [25].....	13
Obr. 2.8 Skladba sendvičového panelu s voštinovým jádrem [23].....	13
Obr. 2.9 Ukázka skladby vrstvených kompozitního materiálu jednosměrného (vlevo), vrstveného pod různými úhly (vpravo) [26] .....	14
Obr. 2.10 Ukázka dutiny u kompozitního materiálu [16] .....	15
Obr. 2.11 Rozdíl mezi interlaminární a intralaminární poruchou [16] .....	15
Obr. 2.12 Ukázka trhlin vzniklé za provozu [16].....	16
Obr. 2.13 Ukázka nespojitostí v lepeném spoji [16] .....	16
Obr. 3.1 Standardní hloubka vniku vířivých proudů [14].....	18
Obr. 3.2 Princip metody vířivých proudů [13].....	19
Obr. 3.3 Impedanční trajektorie cívky dle [7].....	19
Obr. 3.4 Kalibrační vzorek pro povrchové zkoušení (vlevo), odezva vířivých proudů na vyjiskřené drážky (vpravo) .....	21
Obr. 3.5 Trhliny v potahovém plechu iniciované od otvorů nýtových spojů (a), odezva vířivých proudů na přítomnost nýtu bez trhliny (b), odezva vířivých proudů na přítomnost nýtu s trhlinou (c) [7] .....	22
Obr. 3.6 Odezva vířivých proudů na cizorodé částice v těsně podpovrchové vrstvě (vlevo), snímek metalografické analýzy (vpravo).....	22
Obr. 3.7 Typické aplikace nízkofrekvenční kontroly metodou vířivých proudů [7]	23
Obr. 3.8 Trhliny ve druhé vrstvě iniciované od otvorů spojů [7] .....	23
Obr. 3.9 Detekce trhlin ve druhé vrstvě: (a) směr zkoušení; (b) odezva vířivých proudů bez trhliny; (c) odezva vířivých proudů na přítomnost trhliny [7].	23
Obr. 3.10 Drážky po nástroji vzniklé při výrobě otvorů a vzniklá únavová trhlina .	24
Obr. 3.11 Odezva vířivých proudů na trhlínu: (a) absolutní sonda; (b) diferenciální sonda [7].....	24
Obr. 3.12 Kalibrační vzorek pro kontrolu rotačními sondami [7] .....	25
Obr. 3.13 Odezva vířivých proudů: bez přítomnosti drážky v otvoru (vlevo); na drážku v otvoru (vpravo) .....	25
Obr. 3.14 Typické průběhy indikací různých poškození u hliníkové slitiny [7] .....	25
Obr. 3.15 Vliv kovových přísad na vodivost hliníku [7] .....	26
Obr. 3.16 Graf pro určení použitelnosti metody vířivých proudů a zkušební frekvence pro různé vodivé a feromagnetické materiály [7].....	30
Obr. 3.17 Vliv tloušťky povlaku na průběh posunu koncového bodu v impedanční rovině [7].....	31
Obr. 3.18 Rozsahy vodivosti tvářených hliníkových slitin [7] .....	32

Obr. 3.19 Snímač vířivých proudů (1-feritové jádro, 2-přijímací cívka, 3- vysílací cívka) (vlevo), skutečná podoba (vpravo) [10].....	35
Obr. 3.20 Odezva snímače: vlákno orientované +45° (vlevo), vlákno orientované 0° (vpravo) [10] .....	36
Obr. 3.21 Zobrazení rotační sondy k detekci směru vláken [11] .....	36
Obr. 3.22 Výsledky měření vodivosti [11].....	37
Obr. 3.23 Typické nespojitosti v RFC a CFRP kompozitních materiálech [12] .....	37
Obr. 3.24 Ukázka anizotropního senzoru (vlevo), 16 párového senzoru (vpravo) [12] .....	38
Obr. 3.25 Ukázka zobrazení jednotlivých poškození pomocí zobrazení C-sken [12] .....	39
Obr. 3.26 Ukázka zvlnění ve 3. vrstvě (vlevo), delaminace (vpravo) [12].....	39
Obr. 3.27 Charakterizace hloubky vniku vířivých proudů [12] .....	39
Obr. 3.28 Senzor pole vířivých proudů 5x5 (vpravo), přijímací cívky (vpravo) [2]	40
Obr. 6.1 Stínící kroužky v pořadí hliník, mosaz, austenitická ocel, slitina železa, ferit .....	48
Obr. 6.2 Sondy vířivých proudů pro kontrolu kompozitních uhlíkových materiálů.	48
Obr. 6.3 Zvlnění a překrytí tkaniny (vlevo), vývrt a drážka (vpravo) .....	50
Obr. 6.4 Tmavý pruh u CFRP kompozitů .....	50
Obr. 6.5 Prepreg uhlíkový jednosměrný – uměle vytvořené delaminace [16].....	51
Obr. 6.6 Nákres vzorku 3 (vlevo), orientace a materiál jednotlivých kladených vrstev (vpravo) [16] .....	51
Obr. 6.7 Schodovitá měrka prepreg uhlíkový jednosměrný [16].....	52
Obr. 6.8 Kalibrační měrka s popisem jednotlivých umělých vad – ABS 5045 laminát (vzorek 5).....	53
Obr. 6.9 Nákres kalibrační měrky BMS 8-353 laminát (vzorek 6).....	54
Obr. 7.1 EC signál uhlíkové tkaniny bez defektu.....	55
Obr. 7.2 EC signály zvlnění uhlíkové tkaniny v pojivu epoxidové pryskyřice .....	56
Obr. 7.3 EC signály otvoru a drážky .....	57
Obr. 7.4 EC signál CFRP kompozitu bez defektu – světlý vzorek (vlevo), tmavý vzorek (vpravo).....	57
Obr. 7.5 EC signály tmavého viditelného pásu – světlý vzorek (vlevo), tmavý vzorek (vpravo).....	58
Obr. 7.6 EC signál uhlíkového prepregu bez defektu .....	58
Obr. 7.7 EC signály inzertů simulující delaminaci zobrazené v impedanční rovině XY mezi 4. a 5. vrstvou pro pracovní frekvence 9 MHz (vlevo) a 11 MHz (vpravo).....	60
Obr. 7.8 EC signály inzertů simulující delaminaci zobrazené v impedanční rovině XY mezi 8. a 9. vrstvou pro pracovní frekvenci 11 MHz .....	61
Obr. 7.9 EC signály inzertů simulující delaminaci zobrazené v impedanční rovině XY mezi 12. a 13. vrstvou pro pracovní frekvenci 11 MHz .....	62
Obr. 7.10 Zobrazení amplitudy signálu inzertů v závislosti na čase mezi 4. a 5. vrstvou při pracovní frekvenci 9 MHz (vlevo), 11 MHz (vpravo).....	63

Obr. 7.11 Zobrazení číselného označení přechodů tlouštěk.....	63
Obr. 7.12 Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 9 MHz .....	64
Obr. 7.13 Odezvy vířivých proudů v XY zobrazení pro přechod 2 pro: pracovní frekvence 7 MHz až 12 MHz (a), pracovní frekvenci 5 MHz (b), optimální pracovní frekvenci 9 MHz (c), EC signál v Yt zobrazení pro optimální pracovní frekvenci 9 MHz (d) .....	65
Obr. 7.14 Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 10 MHz .....	66
Obr. 7.15 Odezvy vířivých proudů v XY zobrazení pro přechod 2 pro: pracovní frekvence 7 MHz až 12 MHz (a), pracovní frekvenci 5 MHz (b), optimální pracovní frekvenci 10 MHz (c), EC signál v Yt zobrazení pro optimální pracovní frekvenci 10 MHz (d) .....	67
Obr. 7.16 Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 11 MHz .....	68
Obr. 7.17 Odezvy vířivých proudů v XY zobrazení pro přechod 2 pro: pracovní frekvence 7 MHz až 12 MHz (a), pracovní frekvenci 5 MHz (b), optimální pracovní frekvenci 11 MHz (c), EC signál v Yt zobrazení pro optimální pracovní frekvenci 11 MHz (d) .....	69
Obr. 7.18 Nákres měřky ABS 5045 laminát s označenými vadami.....	70
Obr. 7.19 EC signál laminátu bez defektu při pracovní frekvenci 9 MHz.....	70
Obr. 7.20 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 9 MHz .....	71
Obr. 7.21 EC signál laminátu bez defektu při pracovní frekvenci 10 MHz.....	72
Obr. 7.22 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 10 MHz .....	73
Obr. 7.23 Detekovaná vada F6.....	73
Obr. 7.24 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 10 MHz při použití Nortec 500D (vlevo) a při pracovní frekvenci 12 MHz při použití Nortec 600D (vpravo) .....	74
Obr. 7.25 EC signál laminátu bez defektu při pracovní frekvenci 11 MHz.....	75
Obr. 7.26 EC signály jednotlivých detekovaných nespojitostí při pracovní frekvenci 11 MHz .....	76
Obr. 7.27 EC signály vložených tkanin mosaze a bronzu v XY zobrazení pro pracovní frekvenci 9 MHz (vlevo) a 11 MHz (vpravo).....	78
Obr. 7.28 EC signály vložených tkanin mosaze a bronzu v Yt zobrazení pro pracovní frekvenci 9 MHz (vlevo) a 11 MHz (vpravo).....	78
Obr. 7.29 Stínící kryty na jednotlivých sondách (ferit, mosaz, slitina železa) .....	79
Obr. 7.30 Tvar rezonanční křivky pro různé stupně vazby [30] .....	80
Obr. 7.31 EC signály jednotlivých stínících kroužků u sondy COMPROBE 9 MHz (přístroj Nortec 500D).....	82
Obr. 7.32 EC signály jednotlivých stínících kroužků u sondy COMPROBE 9 MHz (přístroj Nortec 600D).....	83

Obr. 7.33 Zkušební systém.....	83
Obr. 7.34 EC signály jednotlivých stínících kroužků u sondy COMPROBE 10 MHz (přístroj Nortec 600D).....	85

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1	Mechanické a fyzikální vlastnosti CFRP kompozitních materiálů [8] .....	12
Tab. 3.1	Přehled hodnot elektrické vodivosti nejběžnějších hliníkových slitin používaných v leteckém průmyslu [7].....	27
Tab. 3.2	Typické rozsahy hodnot vodivosti a tvrdosti pro různé hliníkové slitiny [7] .....	33
Tab. 3.3	Všeobecný přehled metody vířivých proudů [4].....	34
Tab. 6.1	Výsledné charakteristické vlastnosti navržených sond.....	49
Tab. 6.2	Rozměry jednotlivých umělých vad na vzorku 5.....	53
Tab. 6.3	Popis a orientace jednotlivých vrstev ve vzorku 6.....	54
Tab. 7.1	Souhrn výsledků pro vzorek 4.....	69
Tab. 7.2	Souhrn výsledků pro vzorek 5.....	77

## **12 SEZNAM GRAFŮ**

Graf 7.1 Rezonanční křivky jednotlivých sond při použití přístroje Nortec 500D...	81
Graf 7.2 Rezonanční křivky jednotlivých sond při použití přístroje Nortec 600D...	81
Graf 7.3 Křivka nalezení umělé nespojitosti sondy COMPROBE 10 MHz v závislosti na tloušťce materiálu .....	86



### 13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CFRP	kompozity s epoxidovou matricí vyztuženou uhlíkovými vlákny ( <i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i> )
EC	vířivé proudy ( <i>Eddy Current</i> )
ECA	pole vířivých proudů ( <i>Eddy Current Array</i> )
ECT	zkoušení vířivými proudy ( <i>Eddy Current Testing</i> )
MKP	numerická metoda konečných prvků
NDT	nedestruktivní zkoušení ( <i>Non-Destructive Testing</i> )
RCF	Raw Carbon Fiber
SNR	odstup signálu od šumu ( <i>Signal-to-Noise Ratio</i> )
$C_0$	vlastní kapacita
$k$	činitel vazby
$Q$	činitel jakosti cívky
$R$	odpor cívky
$\bar{u}$	efektivní hodnota šumového napětí

## 14 LITERATURA

- [1] TSAMASPHYROS, G., KANDERAKIS, G., VOUTHOUNIS, P., PRASSIANAKIS, I. Application of the eddy current method and bragg grating optical sensors for the non- destructive testing of bonded composite repairs. NDT for safety. 2007. Dostupné z: [http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde\\_for\\_safety/appendix.pdf](http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/appendix.pdf)
- [2] SAVIN, A., STEIGMANN, R., IFTIMIE, N., BRUMA, A., GRIMBERG, R. Eddy current sensor array. Application to nondestructive evaluation of carbon-epoxy composites. NDT for Safety. 2007. Dostupné z: [http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde\\_for\\_safety/26.pdf](http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/26.pdf)
- [3] DAĐOUREK, K. Kompozitní materiály: definice a rozdělení. Technická univerzita v Liberci, 2008, 35 s.
- [4] *Aerospace nondestructive testing*. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, Incorporated, 2014. ISBN 9781571173416.
- [5] The "Apollo" of aeronautics: The Apollo of aeronautics:Nasa's aircraft energy efficiency program, 1973-1987. [online]. [cit. 2014-06-11]. Dostupné z:[http://visualmotives.com/ApolloAero/ACEE\\_CD\\_Companion/support/acee\\_Image\\_Table.html](http://visualmotives.com/ApolloAero/ACEE_CD_Companion/support/acee_Image_Table.html)
- [6] SHULL, P.J. Nondestructive Evaluation. New York, Marcel Dekker,Inc. 2002. 841s. ISBN 0 – 8247 – 8872 – 9.
- [7] MCMASTER, R., McIntire, P., Mester, M.L. Nondestructive Testing Handbook. 2. vyd. U.S.A. 1986. 677s. ISBN 0 – 931403 – 01 - 4
- [8] IŽDINSKÁ, Z. MatNet Slovakia: Výskumno-vývojová a inovačná sieť pre oblasť materiálov a technológií. [online]. [cit. 2014-06-11]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=1115>
- [9] BOHÁČOVÁ, M. Optimalizace průchozího snímače vířivých proudů ve výměňkových trubkách. Brno, 2006. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [10] GRIMBERG, R., SAVIN, A., STEIGMANN, R., BRUMA, A. Eddy current examination of carbon fibres in carbon-epoxy composites and kevlar. In: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering. Slovenia, 2005, s. 5. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2005/PAPERS/26-NDTP05-19.pdf>
- [11] LI, Xin, W YIN, Ze LIU, Philip J. WITHERS and A J PEYTON. Characterization of Carbon Fibre Reinforced Composite by Means of Non-Destructive Eddy Current Testing and FEM Modeling. In: 17th World Conference on Nondestructive Testing. 2008. vyd. Shanghai, China. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/toc.htm>
- [12] HEUER, H., SCHULZE, M. H., MEYENDORF, N. High Resolution Inspection of Carbon Fiber Materials by Eddy Current Techniques. In: 2nd

- International Symposium on NDT in Aerospace 2010. Germany, 2010. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/aero2010/papers/mo2a3.pdf>
- [13] AC 43.13-1B. Acceptable Methods, Techniques, and Practices – Aircraft Inspection and Repair. U.S. Department of Transportation. 1998.
- [14] BOHÁČOVÁ, M. Rešerše NDT metod používaných v letectví. NDT Welding Bulletin, 2011, vol. 21, no. 3, p. 11-18. ISSN: 1213- 3825.
- [15] STAFF. Composites world: Why CFRP?. *Composites technology* [online]. 11/30/2010 [cit. 2014-06-11]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/why-cfrp>
- [16] BĚLSKÝ, P., HÁSEK, J., ŠTEFL, M. *Výrobní předpis kvality kompozitové řídicí plochy*. Praha, 2013. Zpráva. VZLU.
- [17] HAVRÁNEK, M. Zajímavé vlastnosti uhlíku. *Aldebaran bulletin* [online]. číslo 8. Praha: AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, 2008 [cit. 2014-06-18]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008\\_08\\_mat.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_08_mat.php)
- [18] DANIŠ, S. Nobelova cena za fyziku - výzkum grafenu. *FyzWeb* [online]. 2010 [cit. 2014-06-18]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=155>
- [19] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010, 38 s. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf)
- [20] SLAVÍK, S. *Letecké materiály*. Praha: ČVUT, 2006, 6 s. Dostupné z: <http://aerospace.fsik.cvut.cz/letadla1/Leteck%C3%A9%20materi%C3%A1ly.pdf>
- [21] SEDLÁČEK, J. Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010. 104 s, 7 příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.
- [22] KOŘÍNEK, Z. Vlákna. *Mujweb.cz/zkorinek: Kompozity* [online]. [cit. 2014-06-18]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [23] Sandwich composite and core material. *Fibre reinforced plastic: The Fibre Reinforced Plastic & Composite Technology Resource Centre* [online]. December 2010 [cit. 2014-06-18]. Dostupné z: [http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010\\_12\\_01\\_archive.html](http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010_12_01_archive.html)
- [24] BOTELHO, Edson C., SILVA, Luiz C. PARDINI a Mirabel C. REZENDE. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures [online]. *Materials Research* [online]. 2006-09-01, vol. 9, issue 3, s. - [cit. 2014-06-18]. DOI: 10.1590/S1516-14392006000300002. Dostupné z: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext)
- [25] STORK FOKKER. *Glare and bonded repairs*. 2007, 22 s.

- [26] Composites 101. *Quartus Engineering, Inc.* [online]. 2011 [cit. 2014-06-18]. Dostupné z: <http://www.quartus.com/resources/white-papers/composites-101/>
- [27] DONÁT, Kamil. *Příručka pro konstruktéry radioamatéry: určeno radioamatérům, konstruktérům a laborantům v průmyslu a vývoji*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Řada elektrotechnické literatury.
- [28] NOVÁK, Karel a Josef KOZLER. *Amatérské součástky a stavba tranzistorových přijímačů: určeno pro radioamatéry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Populární radiotechnika.
- [29] SMIRENIN, B. A. *Radiotechnická příručka*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
- [30] DONÁT, Kamil. *Fyzikální základy radiotechniky*. Praha: Naše vojsko, 1964. Knižnice Svazarmu (Naše vojsko).