



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

**Analýza vhodného defektoskopického
zkoušení kompozitních materiálů**

Bakalářská práce

Autor: Anna Kopecká

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Holub Ph.D., IWE

Studijní program: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kopecká** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **491243**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analyza vhodného defektoskopického zkoušení kompozitních materiálů.

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of suitable defectoscopic testing of composite materials.

Pokyny pro vypracování:

Rozdělení kompozitních materiálů a jejich oblasti využití. Popis stávajících technologií výroby kompozitních materiálů. Návrh experimentu - porovnání výsledků vzorků komp. materiálů s aplikováním různých vad vně jednotlivých vrstev, analýza vhodného defektoskopického zkoušení kompozitních materiálů. Vyhodnocení výsledků a závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Bareš, R., Kompozitní materiály : SNTL Praha., 1988
- [2] Krebs, S. Bryksí-Stunová, B., Kolařík, L.: Podklady k výuce předmětu Technologie zpracování plastů a kompozitů, FS ČVUT v Praze, 2019
- [3] Motýčka, M., Technologie výroby kompozitních materiálů, ZČU v Plzni, 2007
- [4] Brent Strong, A., Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, Society of Manufacturing Engineers, Michigan 2008, USA

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Holub, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

Ing. Lukáš Holub, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky



Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Holuba Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora



Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Lukáši Holubovi Ph.D. za rady a ochotu věnovat se vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych chtěla poděkovat společnosti ATG s.r.o. a panu Ing. Janu Šimotovi za asistenci a odborné připomínky při provádění experimentální části.



Anotace

- Název diplomové práce:** Analýza vhodného defektoskopického zkoušení kompozitních materiálů.
- Autor práce:** Anna Kopecká
- Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Holub Ph.D., IWE
- Konzultant:** Ing. Jan Šimota, Společnost ATG s.r.o.
- Akademický rok:** 2021/2022
- Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní
- Ústav:** 12133 – Ústav strojírenské technologie
- Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
- Rozsah práce:** 77 stran, 4 tabulky, 67 obrázků
- Klíčová slova:** Kompozitní materiály, technologie kompozitních materiálů, vady kompozitních materiálů, nedestruktivní zkoušení.
- Abstrakt:** Bakalářská práce se zaměřuje na rozdělení kompozitních materiálů, technologii výroby kompozitních materiálů s polymerní matricí a vady, které u kompozitních materiálů s polymerní matricí vznikají se zaměřením na vady vzniklé v procesu výroby. Práce zároveň řeší problematiku nedestruktivních metod testování pro výrobky z těchto materiálů a porovnává vybrané metody nedestruktivního testování: vizuální metodu, ultrazvukovou metodu a metodu počítačové tomografie na vzorku s uměle implementovanými vadami.



Annotation

Title of the final thesis:	Analysis of suitable defectoscopic testing of composite materials.
Author:	Anna Kopecká
Supervisor:	Ing. Lukáš Holub Ph.D., IWE
Consultant:	Ing. Jan Šimota, Společnost ATG s.r.o.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	77 pages, 4 tables, 67 pictures
Keywords:	Composite materials, technology of composite materials, defects of composite materials, non-destructive testing.
Abstract:	The bachelor thesis is focused on classification of composite materials, technology of composites with polymer matrix and defects which can occur during the life cycle of the products from composite materials. Attention is paid especially to the defects occurring during the manufacturing process. The thesis also deals with nondestructive testing and compares visual testing, ultrasound testing and computer tomography. Methods were applied on a sample with implemented defects.



Obsah

Úvod	11
Teoretická část	12
1 Kompozitní materiály	12
1.1 Výztuž	12
1.1.1 Skleněná vlákna	14
1.1.2 Aramidová vlákna	14
1.1.3 Uhlíková vlákna	14
1.2 Matrice	14
1.2.1 Termosetické matrice	15
1.2.2 Termoplastové matrice	16
1.3 Využití kompozitních materiálů	17
2 Technologie a zpracování kompozitních materiálů	18
2.1 Výroba polotovarů	18
2.1.1 Výroba prepregů	18
2.2 Technologie výroby součástí z kompozitních materiálů	19
2.2.1 Ruční kladení	19
2.2.2 Stříkání	20
2.2.3 Lisování za studena	21
2.2.4 Lisování pomocí vakua	21
2.2.5 Lisování v autoklávu	22
3 Defekty kompozitních materiálů, jejich příčiny a následky	23
3.1 Vady materiálu	25
3.2 Technologické vady	26
3.3 Provozní vady	28
4 Defektoskopické metody zkoušení kompozitních materiálů	30



4.1	Volba metody nedestruktivního testování	30
4.2	Vizuální metoda	31
4.2.1	Charakteristika vizuální metody a faktory ji ovlivňující	31
4.2.2	Mezioperační kontrola	34
4.2.3	Posouzení stavu před další NDT kontrolou	34
4.2.4	Vizuální kontrola jako samostatná nedestruktivní zkouška	35
4.2.5	Přístroje používané pro vizuální metodu	36
4.3	Ultrazvukové zkoušení	36
4.3.1	Charakteristika ultrazvukového zkoušení a faktory jej ovlivňující	36
4.3.2	Přístroje a zařízení pro ultrazvukovou metodu	38
4.3.3	Průchodová metoda	39
4.3.4	Pulzní metoda	40
4.3.5	Další UT metody	40
4.3.6	Imersní metody	40
4.4	Termografie	41
4.4.1	Charakteristika zkoušení termografií	41
4.4.2	Přístroje a zařízení pro termografii	42
4.4.3	Pulsní termografie	43
4.4.4	Další metody termografie	44
4.5	Radiografická metoda	44
4.5.1	Přístroje a zařízení pro radiografickou metodu	45
4.5.2	Digitální radiografie	46
4.5.3	Počítačová tomografie	46
4.6	Metoda vířivých proudů	47
4.6.1	Charakteristika zkoušení vířivými proudy a faktory jej ovlivňující	47
	Praktická část	49



5	Výroba vzorků	49
5.1	Obecný popis výroby vzorků	49
5.2	Implementace vad do vzorků	53
6	Nedestruktivní zkoušení	56
6.1	Vizuální kontrola	56
6.2	Ultrazvuková imersní odrazová metoda	57
6.3	Ultrazvuková imersní průchodová metoda	63
6.4	Počítačová tomografie	67
	Závěr	71
	Bibliografie	74
	Seznam obrázků	78
	Seznam tabulek	81
	Seznam rovnic	82



Seznam použitých zkratek a symbolů

A	[m]	Amplituda
a	[-]	Koeficient tlumení
AF	-	Aramidové vlákno (<i>Aramid Fiber</i>)
c	[m · s ⁻¹]	Rychlost
CF	-	Uhlíkové vlákno (<i>Carbon Fiber</i>)
CT	-	Počítačová tomografie (<i>Computer tomography</i>)
Ď	[Gy · s ⁻¹]	Dávkový příkon
E	-	Intenzita osvětlení
EP-R	-	Epoxidové prykyřice (<i>Epoxide resin</i>)
ET	-	Metoda vířivých proudů (<i>Eddy current testing</i>)
<i>f</i>	[Hz]	Frekvence světla
<i>f_R</i>	[-]	Faktor reflexe světla
<i>f_A</i>	[-]	Faktor absorpce světla
<i>f_T</i>	[-]	Faktor propustnosti světla
GF	-	Skleněné vlákno (<i>Glass Fiber</i>)
I	[Cd]	Svítivost
I	[W · m ⁻²]	Intenzita záření
IRT	-	Termografická metoda (<i>Infrared testing</i>)
K _p	[-]	Předmětný kontrast
L	[Cd · m ⁻²]	Jas



m	[kg]	Hmotnost
NDT	-	Nedestruktivní metody testování (<i>Nondestructive testing</i>)
PAN	-	Polyakrylonitril
\dot{q}	[W · m ⁻²]	Hustota tepelného toku
RTG	-	Rentgenové
RT	-	Radiografická metoda (<i>Radiographic testing</i>)
T	[K]	Teplota
t	[s]	Čas
UP-R	-	Nenasycené polyesterové pryskyřice (<i>Unsaturated polymer resin</i>)
UT	-	Ultrazvuková metoda (<i>Ultrasound testing</i>)
VE-R	-	Vinylesterové pryskyřice (<i>Vinylepoxyde resin</i>)
VT	-	Vizuální metoda (<i>Visual testing</i>)
x	[m]	Vzdálenost
α	[°]	Úhel
λ	[m]	Vlnová délka
λ	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti
μ	[m ⁻¹]	Lineární součinitel zeslabení
ρ	[g · cm ⁻³]	Hustota
Φ	[lm]	Světelný tok
Ω	[sr]	Prostorový úhel



Úvod

Výroba součástí z kompozitních materiálů s polymerní matricí patří v současnosti mezi intenzivně se rozvíjející průmyslové odvětví. Své místo na trhu si tyto materiály získaly především díky vynikajícím pevnostním vlastnostem při zachování nízké hmotnosti. Rozšířily se z původně vojenského a leteckého průmyslu do dalších průmyslových odvětví. V hojně míře se s nimi lze setkat např. ve spotřebním průmyslu při výrobě sportovních potřeb.

Jako u každé součásti dochází i v případě součástí z kompozitních materiálů ke vzniku vad, které se mohou vyskytnout v různých obdobích životního cyklu součásti. Efektivní odhalení těchto defektů nabízejí defektoskopické metody. Tento způsob zkoušení zachová zkoušenou součást, aniž by došlo k jejímu poškození nebo ztrátě určené funkce. Tyto metody proto nacházejí uplatnění při kontrole výrobků určených pro běžné využití a při revizích. Při těchto metodách se hledají především vady součástí či materiálu. Zpravidla se nevyužívají ke zjišťování vlastností materiálu, jako je tomu u destruktivních metod.

Cílem této práce je seznámení s kompozitními materiály, zejména s materiály s polymerní matricí a vláknovou výztuží. Dále si práce klade za cíl přiblížit čtenáři technologie výroby součástí z těchto materiálů a typy vad, které mohou zejména při výrobním procesu vzniknout. Nedílnou součástí je i provedení rešerše defektoskopických metod pro zkoušení kompozitních materiálů s polymerní matricí.

Praktická část si klade za cíl implementaci různých vad, které mohou vzniknout v technologickém procesu a vyhodnocení jejich odhalitelnosti vybranými defektoskopickými metodami. Vizualní metoda si klade za cíl odhalit povrchové vady, ultrazvuková metoda a metoda počítačové tomografie potom vady vnitřní.



Teoretická část

1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiál je materiál, který obsahuje alespoň dvě složky, někdy nazývané fáze – matrici a výztuž. Tyto složky musejí být promíchány a vzájemně se liší rozdílnými chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Složky s lepšími pevnostními charakteristikami neboli výztuž musejí tvořit alespoň pětiprocentní podíl v materiálu. [1, 2]

Z hlediska rozměrového se kompozitní materiály dělí na:

- **makrokompozity**, s rozměry výztuže v rozsahu 10^0 až 10^2 mm a mají zastoupení především ve stavebnictví (př.: železobeton, polymerbeton).
- **mikrokompozity** s rozměry výztuže 10^0 až 10^2 μm . Podrobnostem o této skupině kompozitních materiálů se věnuje dále tato práce.
- **nanokompozity** o rozměrech výztuže v řádech nm. [1]

1.1 Výztuž

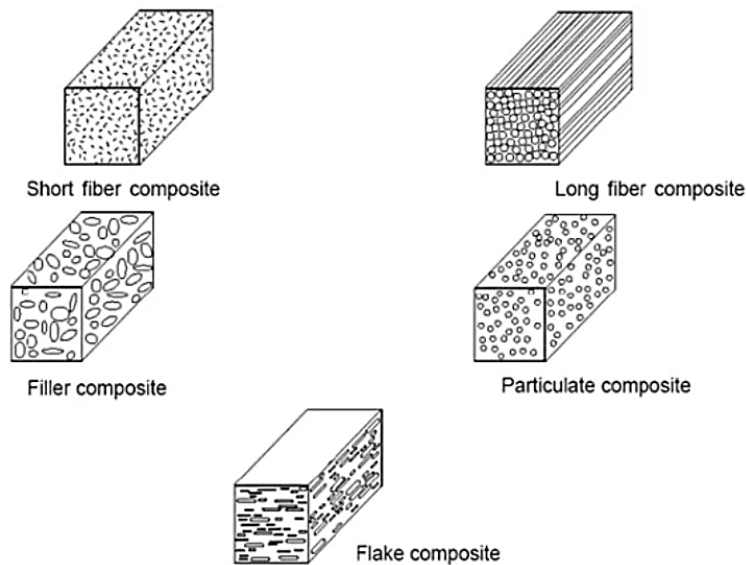
Úkolem výztuže je přenos namáhání zavedeného do kompozitu. Výztuž lze rozdělit podle materiálu, ze kterého je vyrobená, na:

- **polymerní výztuž**
- **skleněnou výztuž**
- **uhlíkovou výztuž**
- **keramickou výztuž**
- **kovovou výztuž**
- **výztuž z jiných materiálů** (např. bor) [1]

Výztuž může mít tvar:

- **částic**, jež mohou mít izometrický tvar (např. kuličky) nebo anizometrický (např. whiskery či lupínky).
- **vláken**, která mohou mít různou délku. [2, 3]

Druhy výztuží dle tvaru ukazuje Obrázek 1.



Obrázek 1: Druhy výztuže kompozitních materiálů [2]

Vláknové výztuže se vyrábějí v širokém sortimentu polotovarů. Může se jednat o vlákna sružená do větších svazků (příze, rovingy) či o složitější celky s pravidelně či nepravidelně geometricky uloženými vlákny. Významnou skupinou jsou rohože a tkaniny. Především tkaniny daly základ polotovarům častým u uhlíkových kompozitů – prepregům. [1, 3]

Důležitým aspektem u vláknových kompozitů je způsob uložení vláken v kompozitu a počet vrstev. Stěna výrobku kompozitního materiálu se skládá ve většině případů z více elementárních, tzv. orthothropních vrstev, které dohromady vytvoří laminát. Vlákna každé elementární vrstvy jsou v této vrstvě uložena pouze v jednom směru nebo v případě tkanin jsou vlákna v elementární vrstvě propletena a směřují do více směrů. Elementární vrstvy se následně sdužují umístěním na sebe do větších celků – laminátů (viz Obrázek 2). Výhodou takového celku je, že elementární vrstvy mohou mít různé orientace vláken, čímž lze docílit vylepšení vlastností kompozitního materiálu ve více směrech. Nejčastější úhly natočení vláken jsou 0° , 45° , 90° a -45° . [1, 3]



Obrázek 2: Laminát z tkanin (vlevo) a z vrstev s jednosměrným uložením vláken pod úhly $45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ$ (vpravo) [4]



1.1.1 Skleněná vlákna

Materiálem skleněných vláken je především oxid křemičitý (SiO_2). Obsahují i další složky, např. oxid hlinitý (Al_2O_3), boritý (B_2O_3), hořečnatý (MgO) nebo vápenatý (CaO). Vlastnosti skleněných vláken nezávisí na směru zatěžování – jsou izotropní, což je jejich předností v porovnání s uhlíkovými nebo aramidovými vlákny, která jsou anizotropní. Velmi dobré vlastnosti vykazují při tepelném namáhání, kdy dokážou dlouhodobě odolávat teplotám přes 250 °C. Mají velmi nízké součinitele teplotní roztažnosti, tudíž se vyznačují i rozměrovou stálostí při vyšších teplotách. Skleněná vlákna jsou nehořlavá. [1, 3]

1.1.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF) jsou nejlehčí vyztužující vlákna. Jedná se o polymerní vlákna, která velmi dobře odolávají vysokým teplotám, o čemž vypovídá jejich využití při výrobě protipožárních obleků nebo přepážek. Rovněž mají vysokou odolnost proti abrazi. Vykazují velmi příznivé vlastnosti při zatížení tahem a tlumení v případě dynamického zatížení. Naopak nejsou vhodným řešením pro aplikace s tlakovým a ohybovým namáháním. Nejsou příliš odolná vůči chemicky agresivnímu prostředí a pohlcují výrazně vodu, což se negativně projevuje na jejich pevnostních charakteristikách. Proto je nutné je před použitím v technologických procesech důkladně vysušit. Zároveň jsou obtížně obrobitelná. Mezi známé zástupce patří vlákna Kevlar. [1, 3]

1.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF) se nejčastěji vyrábí z polyakrylonitrilu (PAN). Vlákna procházejí procesem tzv. dloužení, následně se zbavují vodíku a za vysokých teplot karbonizují. Vlákna se vyrábějí s různými hodnotami pevnosti. Obecně však platí, že uhlíková vlákna mají nejvyšší pevnost mezi vyztužujícími vlákny. Vlákna se vyznačují velmi dobrou odolností vůči chemikáliím a pomalým hořením. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena. [1, 3]

1.2 Matrice

Matrice má za úkol chránit vlákna před vlivy okolí. Rovněž se přes ni zavádí namáhání do kompozitu, dále přenáší namáhání mezi jednotlivými vlákny. V případě porušení prvních vláken je úkolem matrice zajistit kompaktnost materiálu, proto musí být poměrné prodloužení při porušení u matrice vyšší, než u vláken. V neposlední řadě má matrice za úkol zajistit požadované umístění vláken v kompozitu a zajistit tvar součásti. [1, 3]



Matrice pro kompozitní materiály lze dělit na:

- **polymerní matrice**
- **kovové matrice**
- **sklokeramické matrice**
- **keramické matrice** [1, 2]

Pro zajištění požadovaných pevnostních a funkčních vlastností kompozitního materiálu je potřeba, aby mez pevnosti vláken v tahu byla vyšší než mez pevnosti matrice. Stejně tak musí být vyšší i modul pružnosti vláken. Proto je nutné pečlivě volit kombinaci materiálu výztuže a matrice. Pro kompozitní materiály s uhlíkovou, polymerní nebo skleněnou výztuží jsou nejčastěji používané polymerní matrice. [3, 5]

Kromě hlavního polymeru, který určuje charakter matrice, jsou v matrici obsaženy další látky. Může se jednat o látky nezbytné pro zpracování kompozitního materiálu, jako jsou katalyzátory urychlující chemickou reakci, inhibitory zahajující chemickou reakci, případně látky snižující viskozitu, tedy podporující prosycování. Případně se může jednat o plniva, jež mají za úkol ovlivnit např. mechanické, fyzikální nebo chemické vlastnosti matrice. [3]

V závislosti na způsobu zpracování rozlišujeme polymerní matrice na:

- **termosetické matrice**
- **termoplastické matrice** [3]

1.2.1 Termosetické matrice

U termosetických matic dochází k vytvrzení, které je nevratné. Výhodami termosetických matic jsou příznivé zpracovatelské podmínky. Termosety velmi dobře prosycují výztuž – v nevytvrzeném stavu se vyznačují vysokou tekutostí. K vytvrzení je potřeba dalších chemických činidel, jakými jsou katalyzátory nebo iniciátory chemické reakce. Vytvrzení se provádí často za zvýšené teploty nebo za přítomnosti záření. Oproti termoplastovým maticím jsou však teploty při zpracování nižší. Lze u nich dobře uplatňovat lepené spoje a lze je dobře opravovat. Nevýhodou při zpracování je, že termosetické matrice nelze příliš tvarovat. Po vytvrzení je změna tvaru již v podstatě nemožná. Termosetické matrice podléhají v nezpracovaném stavu stárnutí, jelikož probíhá samovolné vytvrzování. Doba jejich skladování je proto omezená. [1, 3]



Z termosetických matric se používají např. nenasyčené polyesterové pryskyřice, vinylesterové pryskyřice a velmi často také epoxidové pryskyřice. [3]

Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice (EP-R) jsou velmi rozšířené materiály matric. Přestože se jedná o reaktoplastickou matici, hovoří pro jejich použití velmi dobrá houževnatost, dále teplotní, únavová či chemická odolnost. Rovněž jejich technologické vlastnosti přispívají k použití v široké škále aplikací od kosmonautiky přes energetiku po elektrotechniku. Lze totiž velmi dobře pomocí dalších látek modifikovat jejich mechanické nebo technologické vlastnosti. Zároveň se vyznačují velmi dobrými adhezními schopnostmi. Můžeme je nalézt např. jako matrice rotorových listů větrných elektráren nebo jako desky tištěných spojů pro elektroniku. Jsou častými maticemi kompozitů s uhlíkovou výztuží. [1, 3]

Nenasycené polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R) jsou jedny z nejčastějších materiálů používaných pro matrice. Z technologických vlastností lze ocenit možnost měnit obsah složek v širokém rozsahu. Příkladem může být obsah styrenu, jímž lze ovlivňovat viskozitu matrice. Styren se zároveň používá jako rozpouštědlo v těchto maticích. Práce se styrenem však představuje zdravotní rizika pro obsluhu, podobně jako karcinogenní kobalt, který se při výrobě UP-R využívá k urychlení chemické reakce. Mezi nevýhody použití těchto matric tedy patří zvýšené nároky na odvětrávání zpracovatelských prostor. Další nevýhodou UP-R je vysoká smrštitivost při zpracování, která se pohybuje v intervalu 6 až 9 %. Mezi ekonomické přednosti UP-R patří především nízká cena. [1, 3]

Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice (VE-R) se zpracováním podobají nenasyčeným polyesterovým pryskyřicím. Oproti nenasyčeným polyesterovým pryskyřicím mají vyšší chemickou odolnost, jsou odolnější za vyšších teplot a mají vyšší pevnost. Uplatnění proto nacházejí v silně korozních prostředích. Používají se např. pro potrubí v odsířovacích zařízeních nebo pro stavbu lodí. [1, 3]

1.2.2 Termoplastové matrice

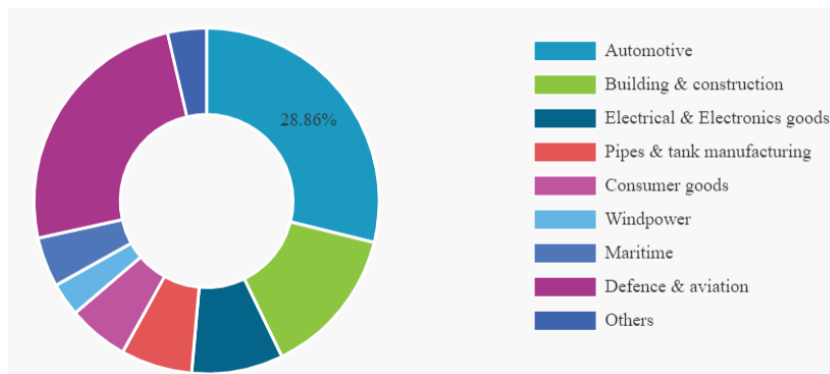
Termoplasty jsou polymery, které jsou za běžných teplot pevné látky a při dosažení teploty tání se z nich stává tavenina. Tou se potom prosycuje výztuž a následně probíhá opětovné ochlazení.



Tavenina má vyšší viskozitu, než je tomu při prosycování termosetů. S tím je spojena nutnost použití vyšších lisovacích tlaků, které mohou být až šestinásobné oproti termosetům. Ve srovnání s termosety nejsou pro tyto materiály vhodné lepené spoje. Naopak mezi pozitivní technologické vlastnosti patří možnost tvarování dílů, čehož se využívá především u velkých sérií. Lze je také svařovat. Vzhledem k tomu, že u nich neprobíhá žádná vytvrzovací reakce, není u nich tak velký problém se skladováním. Podléhají však přirozenému stárnutí projevujícím se např. ve zkřehnutí materiálu. Termoplasty se vyznačují houževnatostí, jejich vlastnosti ale závisí na teplotě více, než u termosetů. Při vysoké teplotě u nich hrozí změknutí. [1, 3]

1.3 Využití kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jako konstrukční materiály zasahují do stále více průmyslových odvětví. Kromě dnes již tradiční aplikace těchto materiálů v leteckém průmyslu, kde se používají pro konstrukci základních prvků (např. potahů a přepážek) se dostávají do energetiky (chladicí věže nebo potrubí z VE-R), do automobilového průmyslu či do sportovního průmyslu (helmy, brusle, hokejové a golfové hole, rámy jízdních kol). Například automobilový průmysl tvořil v roce 2019 téměř třetinový podíl na celkové produkci kompozitových aplikací (viz Obrázek 3). [1, 3, 6]



Obrázek 3: Podíl zastoupení jednotlivých odvětví v celkové produkci kompozitních materiálů v roce 2019 [6]



2 Technologie a zpracování kompozitních materiálů

Neustále se zvyšující poptávka trhu po kompozitních materiálech měla vliv i na zlepšení a rozšíření technologií pro výrobu součástí z kompozitních materiálů. Výrobu kompozitních materiálů a s ní související technologie lze rozdělit do několika částí:

- výroba dílčích fází (výroba vláken a výroba polymeru pro matrici)
- výroba polotovarů
- výroba samotné součásti [3]

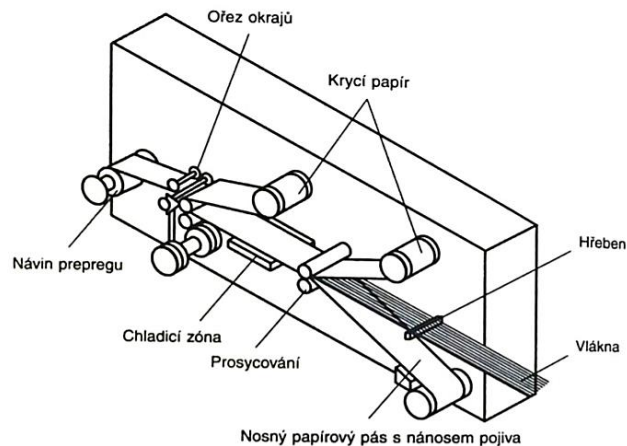
2.1 Výroba polotovarů

Výroba polotovarů z kompozitních materiálů spočívá v prosycení produktů z vláken pojivem dříve, než při výrobě samotné součásti. Polotovar je tak z části vytvrzen, avšak pouze do té míry, aby zůstala zachována jeho schopnost přizpůsobit se následnému tvaru formy součásti. [3]

Polotovarem však může být také neprosycená tkanina. Vlákna mají v takovém případě předem danou orientaci, nemusíme je proto při výrobě hotové součásti skládat ručně. [3]

2.1.1 Výroba prepregů

Prepreg, neboli předimpregnovaná výztuž (*preimpregnated fibres*) je lehce lepidelný polotovar s termosetickou matricí, kde vlákna jsou uložena jednosměrně nebo v podobě tkaniny. V případě jednosměrně orientovaného prepregu je na tzv. papírový nosič nanášeno pojivo. Na tento nosič se pokládají pramence rovnoběžně vedené z cívek. Nosič s pryskyřicí a vlákny vede do kalandru, do nějž zároveň vede krycí papírová vrstva. Průchodem mezi dvěma válci kalandru, kde jeden je vyhříván, dojde k prosycení. Následně je prepreg ochlazen za účelem zastavení vytvrzovací reakce a oříznut na požadovanou délku. Výrobu jednosměrně orientovaného prepregu znázorňuje Obrázek 4. Prepreg se následně skladuje za nízkých teplot ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), i tak má ale omezenou životnost, protože dochází k přirozenému vytvrzování pryskyřice v čase. Životnost prepregů dosahuje v závislosti na druhu pojiva maximálně 6 měsíců. Při rozmrazování prepregů trvajícím asi 6 hodin, je vhodné omezit přístup vzduchu k prepregu, neboť se na něm sráží vzdušná vlhkost, která se následně dostává do matrice a způsobuje různé vady v materiálu. Ve prospěch používání prepregů hovoří zejména jejich reprodukovatelná a ekonomická výroba. Prepregy se využívají v lisovacích a autoklávových technologiích. [1, 3]



Obrázek 4: Výroba jednosměrného prepregu [3]

2.2 Technologie výroby součástí z kompozitních materiálů

Jedná se o technologie zpracovávající produkty z výchozích materiálů a polotvary v konečný tvar součástí. Technologie jsou založeny většinou na působení tlaku, v případě termosetických matric mnohdy za zvýšených teplot podporujících vytvrzení, v případě termoplastických je zvýšená teplota nezbytnou podmínkou pro uvedení pryskyřice do tekutého stavu. Technologie se vyznačují různým stupněm automatizace, a to od ručních, přes částečně automatizované a mechanizované až po plně automatizované technologie. [3]

2.2.1 Ruční kladení

Ruční kladení je původní technologie, při které se nejprve nanese separační prostředek zajišťující dobré vyjmutí. Následuje vrstva gelcoatu, který má vytvořit hladký povrch a zároveň ochránit další vrstvy kompozitního materiálu před vlivy vnějšího prostředí. Poté se klade výztuž v podobě rohoží či tkanin prosycovaná pryskyřicí, která se nanáší válečkem nebo štětcem. Jako poslední krok před vytvrzením je nutné vytlačit vzduchové bubliny a přebytečnou pryskyřici. Vytvrzení probíhá většinou při normálních teplotách, někdy je nutné teplotu postupně zvyšovat, aby se zvýšila teplotní odolnost. Někdy se zvyšuje přítlak pomocí vakua, především pro sendvičové materiály, jinak probíhá vytvrzování za běžného atmosférického tlaku. Princip ručního kladení zobrazuje Obrázek 5. [3, 7, 5]

Výztuž je ze skleněných, aramidových či uhlíkových vláken. Pro matrici se využívají termosetické pryskyřice (polyesterové a epoxidové), které se mísí s iniciátorem zajišťujícím zahájení chemické reakce. [3, 7]



Technologie ručního kladení nalézá uplatnění při kusových, nízkosériových a středně sériových výroбах pro výrobky všech velikostí a složitostí. Často se touto technologií vyrábějí prototypy. Pozitivem je rovněž nenáročnost požadavků na zařízení a nástroje. Naopak nevýhodné jsou vysoké náklady na zaměstnance a závislost kvality výrobku na jejich zkušenostech. Kromě zaměstnanců klade technologie požadavek i na zdravotně nezávadné prostředí výroby z důvodu zpracování pryskyřic pro matrice. Nezávadné prostředí se zajišťuje odvětrávacími systémy. [3, 7]

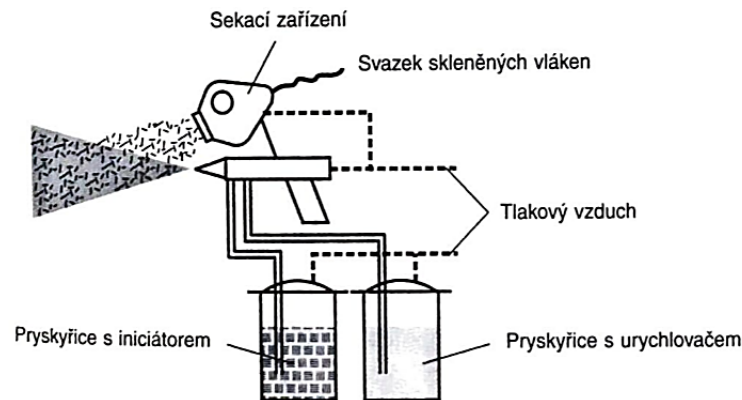


Obrázek 5: Technologie ručního kladení [7]

2.2.2 Stříkání

Stejně jako v případě ručního kladení musí být nejprve aplikován gelcoat, následuje stříkání pomocí pneumatické pistole, do které se přivádí svazek pramenců výztuže (viz Obrázek 6), zpravidla ze skleněných vláken. Ten se seká v sekacím zařízení. Zároveň obsahuje pistole dvě nádrže, kde jedna obsahuje pryskyřici s iniciátorem a druhá pryskyřici s katalyzátorem. Pryskyřice může být případně přivedena i z externího zdroje pomocí hadic. Po nanesení vrstvy se provádí zhutňování rýhovanými či štětinovými válečky. [3, 7]

Zpracovávají se především polyesterové pryskyřice, proto je i zde třeba při pořizování myslet na odvětrávání styrenových par. Stříkací zařízení vyžaduje poměrně velké počáteční náklady. Vzhledem k vyššímu obsahu matrice nejsou ani mechanické vlastnosti tak vysoké, jako u jiných metod umožňujících větší obsah výztuže. Naopak mezi pozitiva této technologie patří efektivita a rychlost při aplikaci velkého množství materiálu. Používá se zejména pro malosériovou výrobu. Výrobky zpravidla nejsou příliš složité, jejich rozměry jsou střední až velké. Formy se příliš neliší od těch používaných pro ruční kladení. Technologie stříkání se řadí mezi částečně automatizované a mechanizované technologie. [3, 7]



Obrázek 6: Technologie stříkání [3]

2.2.3 Lisování za studena

Lisování za studena je technologie, u níž je tlak většinou vyvozen sevřením dvoudílné formy prostřednictvím svěrek či hydraulických válců, případně se používají etážové hydraulické lisy. Tlak se pohybuje v rozmezí 0,3 až 10 bar. Název lisování za studena napovídá, že vytvrzování probíhá za normální teploty. [3, 7]

Zpracovávaným materiálem jsou nejčastěji tkaniny ze skleněných vláken, případně mohou být použité jiné druhy vláken. Pryskyřice pro matrici, zpravidla epoxidové nebo polyesterové, musejí být voleny takové, které lze vytvrzovat vzhledem k povaze technologie za normálních teplot. [3, 7]

Výhodami technologie jsou výrobky s oboustranně hladkým povrchem. Z hlediska investice není tato technologie příliš náročná. Výrobní metoda nachází uplatnění při počtu od 100 do 5000 ks. [3, 7]

2.2.4 Lisování pomocí vakua

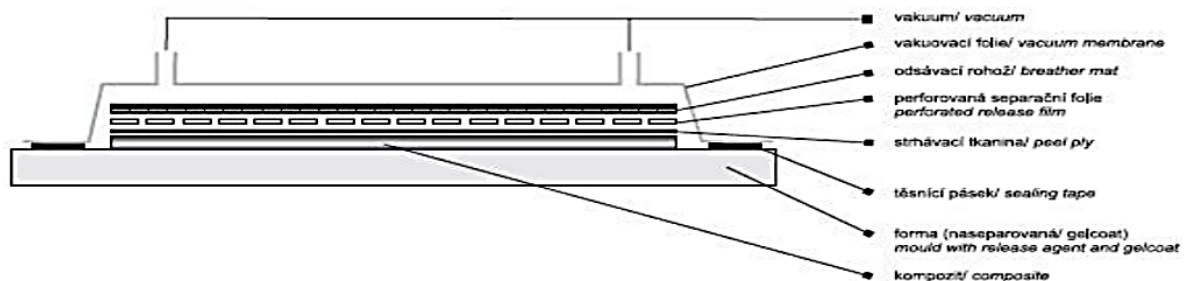
Ukládání materiálu do formy je shodné s technologií ručního kladení. Na poslední položenou vrstvu se pokládá strhávací tkanina. Tato tkanina usnadňuje snazší provedení případných následných operací jako je laminace, lepení a povrchové úpravy, jelikož chrání povrch před znečištěním či povrchovým poškozením a zároveň zdrsňuje povrch. Odpadají tak operace odmaštění, broušení či zdrsnění povrchu. Na strhávací tkaninu se pokládá separační fólie, která je perforovaná, a odsávací rohož, jejímž úkolem je nasát přebytečnou matrici a umožnit odsátí vzduchu. Jako poslední se přikryje celá tato soustava pružnou vakuovací fólií a utěsní. Podtlak je v rozsahu 0,3 až 0,9 bar a lisování probíhá většinou za studena. Při použití prepregů se formy



při vytvrzování ohřívají ve vyhřívaných tunelech nebo vytápěných komorách. Princip technologie zobrazuje Obrázek 7. [7, 5]

Kromě výše zmíněných prepregů se používají skleněná, uhlíková a syntetická vlákna či jejich kombinace v podobě tkanin nebo pásků, prosycovaných polyesterovými a epoxidovými pryskyřicemi. [7]

Přednostmi lisování pomocí vakua je zvýšení obsahu výztuže, a tím i mechanických vlastností. Formy se podobají formám pro ruční kladení. Dvoudílná forma zajišťuje oboustranně hladký povrch součástí. Až na vakuovou pumpu jsou náklady na tuto technologii poměrně nízké, což ji společně s jejím charakterem dělá vhodnou pro nízké a střední série. [7]



Obrázek 7: Lisování pomocí vakua [7]

2.2.5 Lisování v autoklávu

Lisování v autoklávu kombinuje poslední dvě výše zmíněné technologie – lisování za pomoci tlaku a lisování za pomoci vakua. Součást se připraví shodně jako při lisování pomocí vakua. Kladení vrstev se provádí ručně, nebo u velkoplošných dílů může být automatizováno. Tlaku se dosahuje umístěním formy do autoklávu, kde probíhá i ohřev. Hodnoty evakuačního podtlaku jsou přibližně 0,8 bar, lisovací tlak je 2 až 25 bar. Technologie umožňuje vytvrzovací teploty do zhruba 120 až 200 °C. [5, 7]

Používá se výhradně uhlíkových, skleněných, aramidových a pro speciální aplikace borových či siliciumkarbidových prepregů, které jsou většinou prosyceny epoxidovou matricí. [7]

Problémem této technologie je vysoká investice do použitých zařízení, zejména do autoklávu. Jelikož jsou výrobní podmínky díky použití automatizovaného autoklávu reprodukovatelné, lze tak vyrábět náročné a velkorozměrové výrobky. U náročných aplikací v leteckém průmyslu, dále např. obkladů u dopravních prostředků a speciálních aplikací jako je výroba závodních vozů, je však vysoká investice cenou za požadovanou kvalitu. [3, 7]



3 Defekty kompozitních materiálů, jejich příčiny a následky

U kompozitních materiálů může vzniknout řada vad. Ty mohou vznikat jako důsledek vnějších faktorů, jakými je např. náraz nebo jako důsledek vad předchozích. Je-li např. přestárlý prepreg, potom může být důsledkem špatné přilnutí vrstev. [8]

Dle velikosti rozlišujeme vady na:

- **mikroskopické**
- **minivady**
- **makroskopické** [9]

Vady lze z hlediska velikosti dělit různým způsobem. Některé zdroje rozlišují pouze vady mikroskopické a makroskopické bez rozdílu doby životního cyklu součásti, ve kterém vznikly. Příklad rozdělení vad ukazuje Obrázek 8. [8, 9]

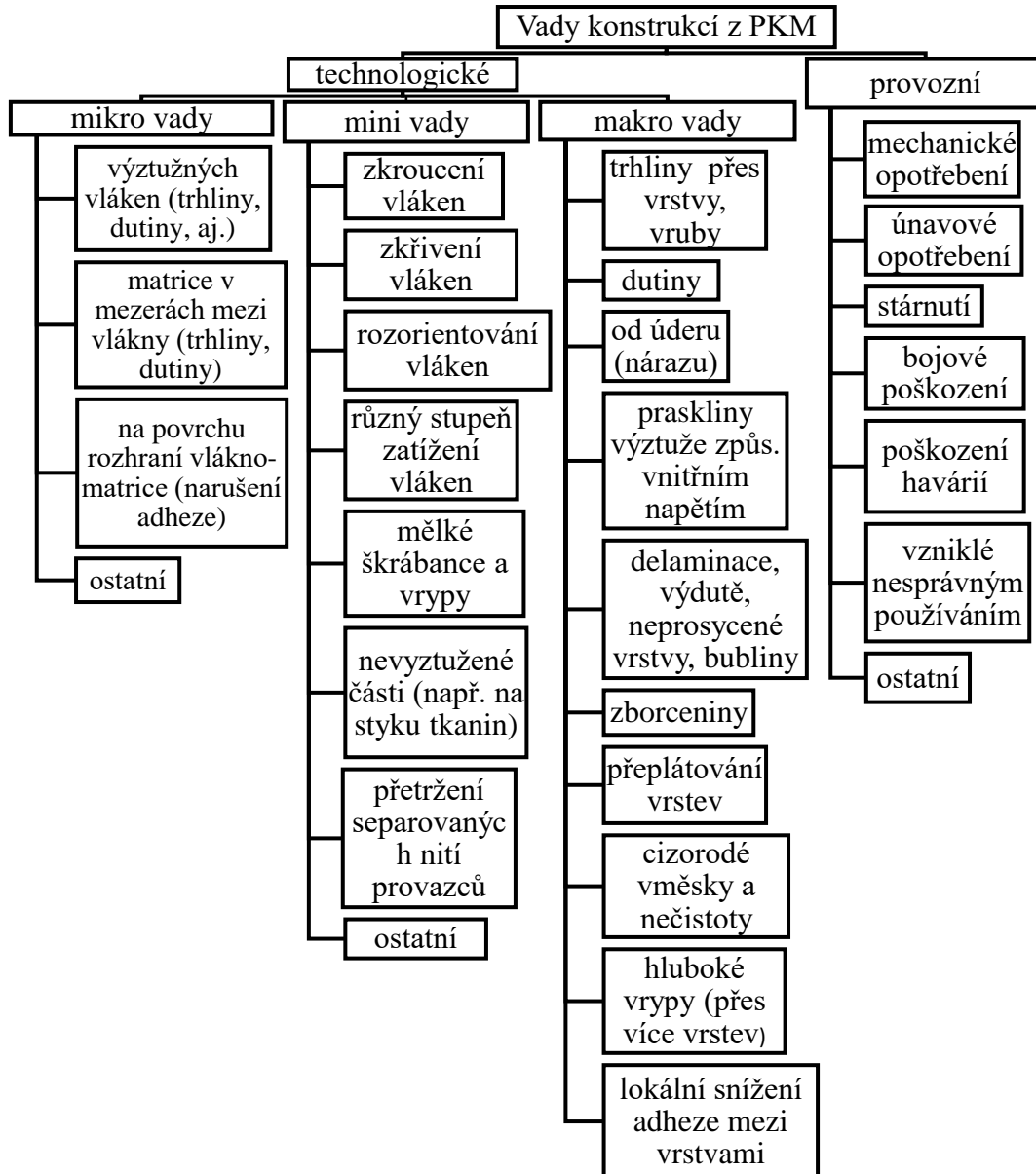
Dle části životního cyklu součásti lze vady rozdělit na:

- **vady vzniklé při výrobě nebo manipulaci** samotného dílčího materiálu,
- **vady technologické** vzniklé při výrobě konkrétní součásti
- **provozní vady** vzniklé při plnění funkce součásti. [8]

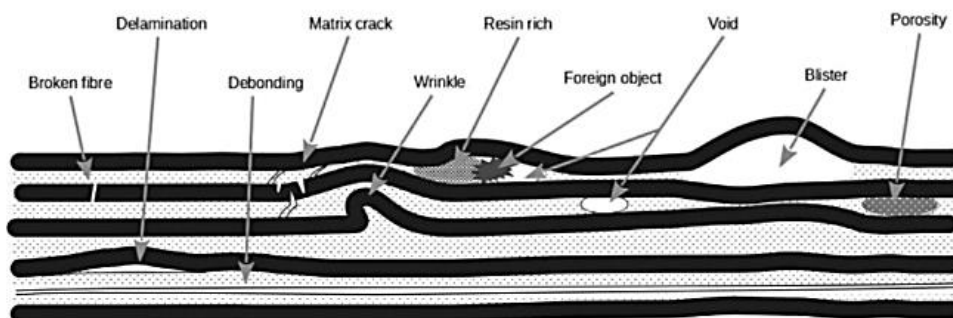
Dle složky kompozitního materiálu se vady člení na:

- **vady matrice**
- **vady vláken**, případně **prepregu** jako celku
- **vady týkající rozhraní matrice-vlákno**
- **vady související s tvarem a rozměry součásti**, tedy vady související se součástí jako celkem a nelze specifikovat o jakou složku kompozitního materiálu se jedná. [8]

Různé typy vad ukazuje Obrázek 9. [8]



Obrázek 8: Schéma rozdělení vad kompozitních konstrukcí dle velikosti a životního cyklu součásti [9]



Obrázek 9: Různé druhy vad kompozitních materiálů (zleva: přerušená vlákna, delaminace, odlepení vrstvy, prasklina matrice, zvrásnění, místo bohaté na pryskyřici, kontaminace cizím objektem, dutina, puchýř a porozita) [10]



Závažnost vad nezáleží jen na samotném druhu vady, ale také na jejím rozměru, poloze a orientaci. Rovněž výslednou závažnost ovlivňují vnější faktory jako je prostředí, ve kterém se samotná součást nachází. Prostor může podpořit šíření vady, případně může jiným způsobem v kombinaci s dalšími faktory zvýšit její závažnost. [5, 8]

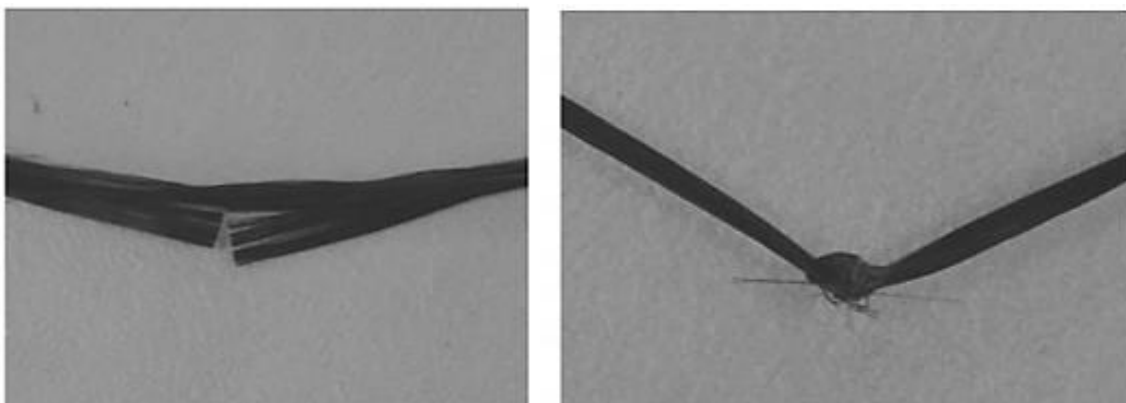
Vliv vady v součásti bude ovlivňovat také samotné zatížení součásti, případně zatížení předešlá. To může superponovat s vadou jako koncentrátorem napětí nebo může naopak působit proti tomuto napětí. Stejně tak mohou k závažnosti přispět jiné vady přítomné v materiálu. [5, 8]

3.1 Vady materiálu

Zdrojem následných vad v součásti může být nekvalitní výchozí materiál, proto je třeba nepodcenit jeho kontrolu. Častou vadou je přestárlý prepreg, kdy dojde k částečnému vytvrzení matrice v důsledku přirozeného stárnutí materiálu. V technologickém procesu potom nedojde ke správnému přilnutí matrice k vláknům, a tím dochází k poklesu pevnosti materiálu. Proto je důležité prepregy správně skladovat. Skladování probíhá při nízkých teplotách a je třeba zamezit vystavení prepregu UV záření. [3, 8]

U prepregů i jiných výchozích materiálů může být problematickým faktorem vlhkost. Před zpracováním je nutné sušit např. aramidová vlákna, která mají schopnost absorbovat vodu. Důsledkem vlhkosti je pokles modulu pružnosti v tahu. [3]

Jako příklady dalších vad lze uvést polámaná vlákna, zvlněná vlákna v tkanině, naseknuté svazky nebo zauzlené svazky vláken (viz Obrázek 10). [8]



Obrázek 10: Vady vláken: naseknutý svazek vláken (vlevo), zauzlení svazku vláken (vpravo) [8]



3.2 Technologické vady

Při výrobě součásti z kompozitního materiálu je nutné dbát na pečlivé kladení jednotlivých vrstev. Pokud některé vrstvy chybí, může dojít k propadu vrstev umístěných nad nimi, a tím vzniku asymetrického laminátu. Do laminátu se tak zavádí přídavná ohybová napětí a zároveň se správně nepřenáší ani předpokládané provozní napětí v součásti. Při napojování vrstev se musejí jednotlivé vrstvy z části překrývat. Při špatném zastřižení prepregů nastávají dva případy. Pokud je prepreg příliš krátký, je překryv vrstev nedostatečný, případně mezi vrstvami vznikne mezera a dochází ke snížení pevnosti materiálu v daném místě. Druhým případem je nadměrný překryv vrstev. Tato vada se projeví v rozměrových nepřesnostech, až zborcení součásti, zároveň se zvyšuje napětí mezi vrstvami a u vrstev je tendence k jejich odlupování. Vrstva částečně přeložená přes sebe se projevuje jako zvrásnění (viz Obrázek 9). Nerovnoměrné rozmístění výztuže je vadou u kompozitních materiálů, kde není použit prepreg a výztuž se prosycuje až při výrobě. Vznikají tak místa bohatá na pryskyřici, jež mohou způsobit až vyboulení následujících vrstev. Pokud vlákna či vrstvy nekopírují formu a jsou na ní zvlněná, potom především u jednosměrných kompozitů by při tlakovém namáhání hotové součásti mohlo dojít k delaminaci, až zlomení vláken. [5, 8]

V důsledku pochybení obsluhy se mohou vyskytnout otisky nástrojů v podobě důlků či jiných rozsáhlejších tvarů. [8]

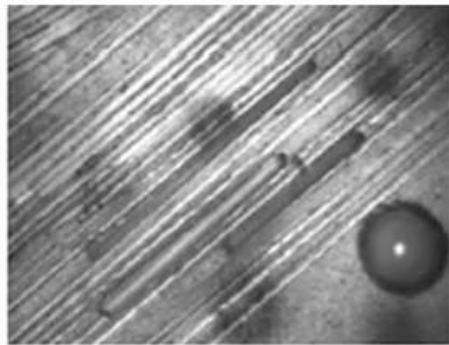
Při vniknutí cizího objektu do materiálu hovoříme o tzv. kontaminaci. Velmi často se jedná o zbytky separační fólie z prepregu nebo o chuchvalce vláken uvolněné z prepregu vzniklé např. při jeho ostříhování. [5, 8]

Špatné nastavení technologického procesu ústí nejčastěji ve vady matrice. Nadměrné vytvrzení matrice snižuje pevnost, především přenos smykového napětí na rozhraní vláken a matrice. Příčinou je nesprávně nastavená doba vytvrzování, která byla příliš dlouhá, případně došlo k nedodržení teploty vytvrzení, jež byla vyšší, než by měla být. Nedostatečné vytvrzení matrice se projevuje stejně jako nadměrné vytvrzení. Příčinou je rovněž špatné provedení výrobního procesu s tím rozdílem, že doba vytvrzení byla naopak příliš krátká nebo teplota příliš nízká. Při ohřevu matrice z termosetů v důsledku tepelné roztažnosti zvětšuje svůj objem, a tím, že je již z části vytvrzená, může také dojít k jejímu popraskání. [5, 8]

Během vyjímání vytvrzené součásti z autoklávu či jiného zařízení vznikají v materiálu tepelná pnutí zanechávající v materiálu následná zbytková pnutí. Ta mohou vyústit až ve zborcení tvaru součásti. Proto je třeba pečlivě provést i ochlazování součásti z vytvrzovací teploty. [8]



V souvislosti s vlhkostí přítomnou při technologickém procesu, nekvalitním výchozím materiálem (přestárlý prepreg, vlhkost v prepregu) nebo nedostatečným tlakem při vytvrzení se objevuje porozita. Jedná se o množství bublinek v matrici, které působí jako lokální koncentrátoři napětí. Významně tento defekt ovlivňuje vlastnosti především u kompozitních materiálů, u nichž matrice převažuje. Podobnou vadou jsou dutiny (viz Obrázek 11), které jsou rozměrově větší a vyskytují se v menším množství. Jejich příčinou může být kromě vody přeměněné v páru během vytvrzování, zachycený vzduch, který se nedostal ven z materiálu při evakuaci, nebo produkty z chemické reakce vytvrzování. [5, 8]



Obrázek 11: Dutina v kompozitu [5]

Aplikací nešetrných rozpouštědel či jiného chemického poškození dochází k poleptání matrice a poškození povrchu. Toto poškození se potom projevuje vznikem puchýřů jako místní delaminace. Chemikálie rovněž působí často velmi negativně na rozhraní matrice a vláknů, kde narušují přilnutí matrice k vláknům. [3, 8]

Řada vad je spojená s otvory pro spojovací součásti a následnou montáží. Při vrtání děr dochází k delaminaci jednotlivých vrstev, u průchozích děr nejčastěji na straně vyběhnutí vrtacího nástroje z materiálu. S geometrickými tolerancemi jsou spojené vady jako křivě navrtané otvory či jejich nesprávná poloha. V důsledku montáže mohou vzniknout otlaky od spojovacích prvků na kontaktní ploše nebo opotřebení díry při časté či nesprávné montáži a demontáži spojovacích prvků. Za vadu kompozitních materiálů, konkrétně součástí, se považují také chybějící spojovací prvky. Neopatrná manipulace se součástí může způsobit poškrábání povrchu a řízance. [8, 10]

Za výrobní vady se považují i vady konstrukční. Jedná se o špatné navržení součásti z hlediska rozměrového, špatné navržení tvaru součásti nebo jejího materiálu pro předpokládaná provozní zatížení a provozní prostředí. [8]

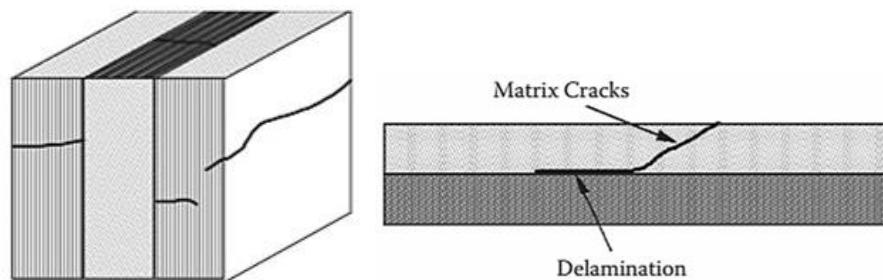


3.3 Provozní vady

Provozní vady vznikají v době, kdy součást plní svou funkci. Jednou z častých vad jsou delaminace. Delaminace vznikají většinou v důsledku nárazu cizího objektu do součásti. Jejich problémem je, že jsou obtížně detekovatelné. Proto je třeba věnovat dostatek pozornosti různým důlkům, zborcením a prasklinkám na povrchu součásti. Mohou značit vnitřní poškození poměrně velkých rozměrů. Kromě delaminace se jedná o praskliny matrice, zlomení vláken nebo rozdrčení (viz Obrázek 12). [4, 8]

Praskliny matrice mohou probíhat skrz vrstvu, ale tak, že prochází mezi jednotlivými vlákny, která nejsou poškozená (hovoříme o tzv. intralaminárních prasklinách), nebo mezi vrstvami, potom se jedná o delaminaci (tzv. interlaminární praskliny). Popřípadě dojde k prasklině, která vznikne uvnitř vrstvy a následně, ve chvíli, kdy se rozšíří až k rozhraní dvou vrstev, se začne šířit po tomto rozhraní. Pokud prasklina probíhá skrz vrstvu a jsou poškozena i vlákna, hovoříme o translaminární prasklině. [4, 8]

Rozdrčení se vyskytuje především u sendvičových konstrukcí. Pokud je náraz příliš velký, může dojít až k proděravění celého kompozitu. Dalším projevem delaminace je rozštěpení hran a rohů vznikající např. při nárazu hrany při manipulaci se součástí. Různé druhy trhlin ukazuje Obrázek 12. [8]



Obrázek 12: Druhy různých prasklin a trhlin vrstev: translaminární trhlina (vlevo), prasklina v matrici vedoucí k delaminaci (vpravo) [8]

V souvislosti s prostředím je provozní vadou eroze materiálu. Lze ji rozdělit na termochemickou a mechanickou. Termochemická eroze je spojená s provozní teplotou, která podporuje, stejně jako vysoké provozní tlaky, chemické reakce a může docházet také k tečení (creepu). Uhlík v materiálu reaguje s chemickými látkami přítomnými v prostředí jako jsou voda, kyseliny nebo např. zplodiny vycházející z motorů letadel. Při reakci uhlíku s vodou dochází ke vzniku vodíku a oxidu uhelnatého, při reakci s oxidem uhličitým vznikají dvě molekuly oxidu uhelnatého. Mechanická eroze vzniká v důsledku abraze. Může být způsobena



pevnými částicemi přítomnými ve zplodinách z motorů či prachovými částicemi přítomnými v prostředí. [8, 11, 12]

Vlhkost se do materiálu dostává nejen ve fázi výroby, ale i v provozu z okolního prostředí. Je absorbována povrchem skrz matrici, která následně měkne, narušuje se přilnavost matrice k vláknu a v případě aramidových a skelných vláken dochází k pohlcování vlhkosti přímo vlákny. Výsledkem působení vlhkosti je tedy snižování pevnostních charakteristik kompozitního materiálu. Vizualním projevem mohou být puchýře. [3, 8]



4 Defektoskopické metody zkoušení kompozitních materiálů

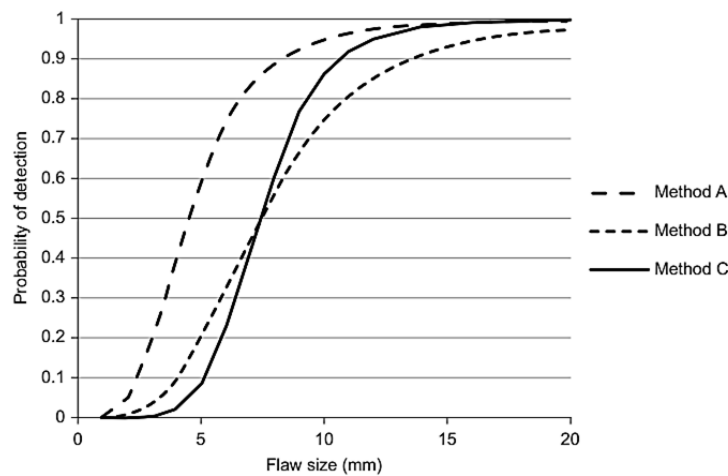
4.1 Volba metody nedestruktivního testování

Volba vhodné metody NDT bude závislá na požadavcích jako je závažnost vady, detekovatelnost vady, četnost vady, náklady na danou metodu, časová náročnost metody či náročnost z hlediska kvalifikace pracovníků. [5]

Detekovatelnost vady danou metodou se vyjadřuje závislostí pravděpodobnosti detekovatelnosti vady na jejích rozměrech. Grafickým vynesemím této závislosti se získá tzv. POD křivka (*Probability of detection*). Tato křivka se získává s určitou spolehlivostí. Jako vhodnou metodu považujeme metodu, kde spolehlivost získané křivky je 95% a detekovatelnost vady v grafickém zobrazení touto křivkou je nad 90%. Křivky se získávají empiricky. To je velmi nákladné, jelikož vyžadují vzorky s uměle vnesenými známými vadami a tyto vzorky následně zkouší několik pracovníků. [5]

Je-li hlavním hlediskem detekovatelnost vady o určitém rozměru, potom bude zvolena metoda, která daný defekt odhaluje s alespoň minimální pravděpodobností 90%, uvažujeme-li že křivky byly všechny získány s 95% spolehlivostí. Jako příklad lze uvést Obrázek 13, kde jsou tři metody. Pro velikost vzorku 7,5 mm bude vhodná pouze metoda A, pro velikost 11 mm budou vhodné metody A a C, potom budou tedy rozhodovat další kritéria, např. co největší spolehlivost (metoda A) nebo nejnižší cena. Volba NDT dle kritéria spolehlivosti připadá především pro odhalení vysoce závažných vad, které nelze v žádném případě ignorovat.

Významnou roli hraje četnost vady. Zpravidla se totiž nebude vyskytovat jen jeden druh vady, ale hned několik druhů. Každý druh vady má danou metodou jinou detekovatelnost, proto v tomto případě může pro volbu NDT rozhodovat častěji se vyskytující vada na úkor detekovatelnosti jiných druhů vad. Jako příklad lze uvést vizuální metodu. V porovnání s ostatními metodami není tato metoda tolik citlivá, nicméně může být efektivnější z hlediska ekonomického i praktického. Uplatnění nachází např. při provozních kontrolách součástí v leteckém průmyslu. [5]



Obrázek 13: POD křivky tří metod A,B a C [5]

4.2 Vizuální metoda

4.2.1 Charakteristika vizuální metody a faktory ji ovlivňující

Vizuální metoda (VT) je nejstarší zkouškou NDT. Při této metodě jsou pozorovány přímo vady na povrchu součásti, tzn. vada není určována ze zjištěné indikace. Mezi přednosti VT patří její rychlost a nižší náklady na její provedení. Nevýhodou je, že s ní zpravidla nelze odhalit vady uvnitř materiálu součásti. [13]

Podmínky pro provádění VT jsou kombinací několika faktorů. Nezbytné pro provádění VT je světlo. Z hlediska vyhodnocovacích podmínek jsou důležité vlastnosti zdroje světla, vlastnosti povrchu, na nějž světlo dopadá či šíření světla směrem ke zkoumanému povrchu. Světlo je elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek 380 až 780 nm. Světlo lze proto popsat veličinami, jakými jsou např. zářivý tok nebo spektrální intenzita vyzařování. Jedná se o tzv. radiometrické veličiny. Tyto veličiny však nerespektují vnímání lidského oka, které je navíc u každého jedince individuální. Proto bylo nutné zavést k radiometrickým veličinám odpovídající veličiny fotometrické, zohledňující tento problém pro průměrné zdravé lidské oko. Jako příklad lze uvést infračervenou žárovku, která bude vydávat pouze tepelné záření, které lze zcela bez problémů popsat zářivým tokem, jenž bude nabývat nenulovou hodnotu. Tepelné záření však lidské oko nedokáže vidět, světelný tok, jako fotometrická veličina, bude tedy nulový. Fotometrické veličiny jsou tudíž pro provádění VT stěžejní. [13, 14]

Světelný tok Φ charakterizuje, jak moc dokáže lidské oko vnímat energii světelného záření vyzářené z určité konkrétní plochy. Jednotka světelného toku je lumen (lm). Je-li část



světelného toku $d\Phi$ vyzářena do prostorového úhlu $d\Omega$, hovoříme o svítivosti I , jejíž jednotkou je kandela (cd). Svítivost a světelný tok jsou spolu svázány následujícím vztahem:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1)$$

kde: I – svítivost [Cd]
 Φ – světelný tok [lm]
 Ω – prostorový úhel [sr] [14]

Pokud dopadne světelný tok na plochu, hovoříme o intenzitě osvětlení s jednotkou lux (lx). Obecně osvětlení nedopadá na plochu kolmo, ale pod určitým úhlem α . Budeme-li chtít vyjádřit intenzitu pomocí svítivosti I , se zohledněním úhlu α , vyplývá následující vztah:

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

kde: E – intenzita osvětlení [lx]
 r – vzdálenost zdroje světla od osvětlené plochy [m]
 α – úhel, pod nímž světlo na plochu dopadá [$^\circ$]
 I – svítivost [Cd] [14]

Pro VT se intenzita osvětlení nejčastěji požaduje v rozsahu 750 až 1000 lx. Intenzita však může nabývat i vyšších hodnot v případech detailnějšího vyhodnocení nebo naopak hodnot nižších pro některé snadno odhalitelné vady např. snadno odhalitelné důlky. [5, 13]

Světlo při dopadu na materiál může být odraženo (reflexe), může jím být pohlceno (absorpce) nebo jím může být propuštěno. Tyto tři způsoby chování vyjadřují u každé látky faktory reflexe f_R , absorpce f_A a propustnosti f_T . Jsou to desetinná čísla nabývající hodnoty 0 až 1 vyjadřující podíl přijatého světla, který byl odražen, pohlcen nebo propuštěn. [13]

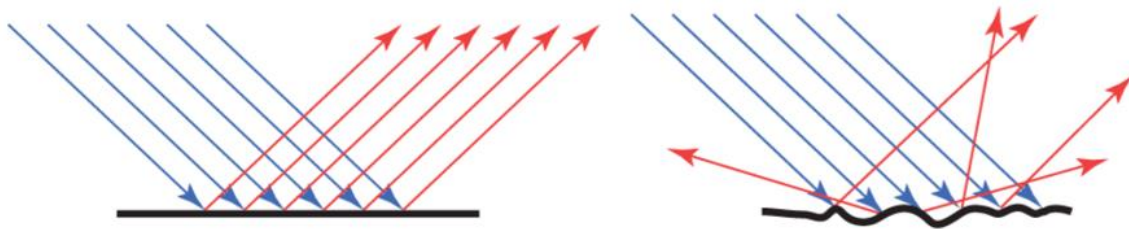
Pro VT je důležitý především faktor reflexe. Ovlivňuje tzv. jas povrchu, neboli hustotu světelného toku L dle vztahu:

$$L = 0,32 \cdot f_R \cdot E \quad (3)$$

kde: L – jas [$Cd \cdot m^{-2}$]
 f_R – reflexní faktor [–]
 E – intenzita osvětlení [lx] [13]



Na odraz má významný vliv drsnost povrchu. Odraz a dopad svazku paprsků na povrch se v případě jakékoliv drsnosti řídí zákonem odrazu, kde úhly dopadu a odrazu od kolmice k povrchu jsou shodné. V případě drsného povrchu mají tyto kolmice různé směry, proto se také do odlišných směrů odrážejí. Původně rovnoběžné paprsky se při dopadu odrážejí do navzájem různoběžných směrů a nastává tzv. rozptyl světla. U hladkého povrchu mají všechny kolmice paprsků shodný směr, proto i odražené paprsky zůstávají navzájem rovnoběžné. Chování dopadajícího svazku při odrazu u obou typů povrchů znázorňuje Obrázek 14. Stejně jako drsný povrch tak i vada, která má odlišný tvar vzhledem ke svému okolí, odráží jiné množství světla než okolní povrch, což se projevuje rozdílnými hodnotami reflexního faktoru, a tedy i rozdílným jasem pozorovaného povrchu. Tento rozdíl tvoří tzv. reflexní kontrast. [13, 15]



Obrázek 14: Odraz světla na lesklé ploše (vlevo) a drsné ploše (vpravo) [15]

Rozptylu světla se využívá také v opačném případě, kdy je povrch naopak osvětlen z více směrů, aby se zabránilo tvorbě odlesků nebo stínů, které ztěžují vyhodnocení nebo vedou k jeho nesprávnému výsledku. [13]

Kromě reflexního kontrastu je důležitý také tzv. barevný kontrast. To, jakou barvu bude mít pozorovaný povrch, bude záležet na vlnových délkách světla vyzařovaného světelným zdrojem a na materiálu, na nějž světlo dopadá. Např. bílé světlo obsahuje všechny vlnové délky zachytitelné lidským okem. Při pozorování zeleného předmětu pod bílým světlem jsou tímto předmětem odráženy vlnové délky v rozsahu přibližně 500 až 550 nm a ostatní vlnové délky jsou pohlceny nebo propuštěny. Většina zdrojů světla však vyzařuje pouze určité vlnové délky, což se projeví změnou barvy pozorovaného předmětu. Tento fakt vyjadřujeme tzv. indexem barevné reprodukce, jenž srovnává barvy při pozorování při osvětlení určitým světelným zdrojem s tím, jak barevně se nám předmět jeví za přírodního bílého světla. VT vyžaduje index barevné reprodukce minimálně 85%. [13]



Posledním důležitým faktorem je zrak pracovníka. Ten musí být ve stavu schopném provádět VT, proto se při kvalifikaci pracovníků pro VT provádějí vyšetření zraku např. na ostrost vidění nebo barvocit. [13]

V případě kompozitních materiálů jsou nejčastěji vyhodnocovanými vadami při VT poškození povrchu (praskliny nebo řízance), povrchová porozita, pryskyřicí nesmáčené vrstvy, důlky či otisky nástrojů. [8]

Vizuální metodu lze dělit následujícím způsobem:

- VT jako mezioperační kontrola
- VT pro posouzení stavu před další NDT zkouškou
- VT jako samostatná NDT zkouška [13]

4.2.2 Mezioperační kontrola

Mezioperační kontrola obsahuje kontroly týkající se především stavu materiálu, stavu polotovarů mezi jednotlivými operacemi a stavu výstupního produktu. Typickými činnostmi může být měření úchylek či porovnávání s etalony. Z hlediska kvalifikace pracovníka je tento typ VT nenáročný. Speciální NDT kvalifikace a přezkoušení často nejsou nutné, není tím ale vyloučeno, že takové kontroly pracovník kvalifikovaný v NDT, v metodě VT nemůže provádět. Požadavky na kvalifikaci budou záležet na požadavcích na provedení a vyhodnocení kontroly. Samozřejmě i tento typ VT v případě, že pracovník není kvalifikován v NDT, vyžaduje určité znalosti pracovníka a klade nároky na jeho zrakové schopnosti. [13, 16]

4.2.3 Posouzení stavu před další NDT kontrolou

Každá NDT metoda vyžaduje speciální podmínky pro provedení. K zajištění těchto podmínek je nutné vyhodnotit stav zkoušené součásti. Toto vyhodnocení zahrnuje zjištění významných viditelných vad, které neumožňují funkci součásti samy o sobě a nemělo by proto smysl další NDT kontrolu provádět. Dále zahrnuje zhodnocení stavu povrchu, což je potřebné pro stanovení realizovatelnosti a příprav následné NDT, případně stanovení oblastí, které by mohly při použití následné NDT způsobit nesprávné vyhodnocení výsledků. Tato metoda je zpravidla popsána v různých standardech a pracovníkem provádějícím VT je osoba provádějící danou následnou NDT kontrolu. [5, 13]



4.2.4 Vizuální kontrola jako samostatná nedestruktivní zkouška

Provedení VT jako samostatné NDT je normalizováno. Vyžaduje z hlediska kvalifikace osobu kvalifikovanou pro provádění VT. Vyžaduje určité zkušební podmínky, jako je např. určitá hodnota intenzity osvětlení či indexu barevné reprodukce. Dále vyžaduje určité další procedury před provedením NDT, především očištění povrchu. [5, 13]

Provádění VT se realizuje řadou technik spočívajících např ve směru osvětlení povrchu a směru pozorování povrchu. Pokud je povrch osvětlen z úhlu 45° a dráha zraku svírá s povrchem rovněž úhel 45° , hovoříme o tzv. technice usměrněného osvětlení ve světlém poli, jež nachází uplatnění především pro odhalování nereflektujících vad o malých rozměrech při vyšetřování lesklých povrchů. Při této technice dochází ke značné únavě zraku a může dojít k oslnění pracovníka. Pro hledání prohlubní, důlků a rýh je vhodnější pozorovat vady ve směru kolmo k povrchu při zachovaném úhlu osvětlení 45° . V takovém případě se jedná o techniku usměrněného osvětlení v tmavém poli. Kromě zmíněných dvou technik se využívá také techniky difúzního osvětlení nalézající uplatnění zejména u velmi drsných povrchů či povrchů s lesklými ploškami. Princip této techniky je popsán v kapitole 4.2.1. [13]

VT se rozděluje na:

- Vizuální metodu přímou
- Vizuální metodu nepřímou [13]

Vizuální metoda přímá

Přímá VT umožňuje pozorování oblasti zájmu, aniž by oku fyzicky bránilo cokoliv v pozorování této oblasti. Pokud samotné vlastnosti oka nestačí pro pozorování, využívá se podpůrných zařízení, jako je přídavné osvětlení, lupy, zrcadla, optické hranoly, apod. [13]

Vizuální metoda nepřímá

Nepřímá VT neumožňuje fyzicky pozorovat povrch samotným okem. Jedná se pozorování velmi obtížně přístupných oblastí a časté je v takovém případě nasazení robotů pořizujících videozáznam nebo fotografie zkoumané oblasti. [13]

VT lze dělit i podle dalších specifikací, např. dle velikosti objektů zájmu. Nejprve se provede všeobecná VT, jejíž úkolem je nalézt vady a další nežádoucí objekty, jež jsou viditelné z větší vzdálenosti. Jedná se např. o tvarové odchylky, poškození povrchu od mechanických činitelů



či jeho koroze. Rovněž se stanovuje např. stav povrchu pro provedení detailnějšího zkoumání. Provádí se zpravidla pouhým pohledem bez použití pomocné techniky. Zkoumání do větších detailů se nazývá místní VT, u níž jsou vyžadovány přísnější podmínky, např. u osvětlení, kde se využívá pomocné techniky. [5, 13]

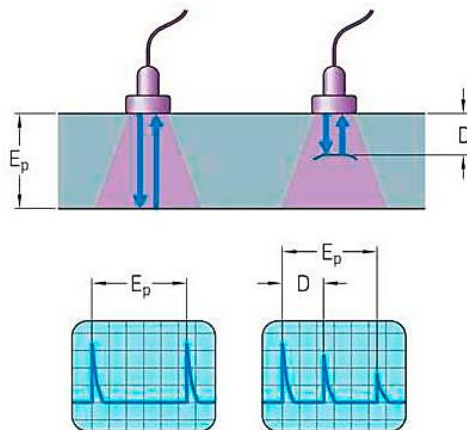
4.2.5 Přístroje používané pro vizuální metodu

Vizuální metoda pracuje s lidským okem jako hlavním vyhodnocovacím zařízením. Zrak pracovníka může být podpořen dalšími prostředky jako jsou zvětšovací zařízení, např. lupa či zakřivené zrcadlo. Dále se může jednat o prostředky umožňující změnu směru odražených paprsků (zrcadla, optické hranoly) či jejich složitější soustavy umožňující vyšetření např. nepřístupných míst (boroskopy, endoskopy). Pro dostatečné osvětlení vyšetřovaného povrchu se používají kromě denního světla další světelné zdroje (halogenové žárovky či LED osvětlení). [13]

4.3 Ultrazvukové zkoušení

4.3.1 Charakteristika ultrazvukového zkoušení a faktory jej ovlivňující

Principem ultrazvukového zkoušení je vysílání ultrazvukových vln do materiálu, tj. do materiálu se vysílá mechanické vlnění o frekvenci nad 20 kHz. Nejčastější používané frekvence se pohybují od 1 do 5 MHz. Používá se vln příčných, které kmitají kolmo na směr šíření vlnění, podélných kmitajících ve směru šíření, dále vln povrchových (Rayleighovy vlny) a vln deskových (Lambovy vlny). Vlny se v případě, že narazí na překážku, odrazí zpět a na grafickém výstupu se projeví jako tzv. echo. Princip ultrazvukového zkoušení znázorňuje Obrázek 15. [5, 13]



Obrázek 15: Princip ultrazvukového zkoušení [17]



Zjistitelnost vady ovlivňuje několik faktorů. Minimální velikost vady, která je ještě zjistitelná, závisí na velikosti vlnové délky. Teoretická minimální velikost je rovna polovině vlnové délky. Prakticky lze zjistit i menší vady, nelze však najisto říci, že došlo k odhalení všech vad, jelikož vada menší, než polovina vlnové délky, se může nacházet v pozici, kdy půlvlna tento defekt celý přeskočí. Jestliže minimální velikost vady závisí na velikosti vlnové délky, bude tedy záležet i na frekvenci, protože vlnová délka je s frekvencí vázána vztahem:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

kde: λ – je vlnová délka [m]

c – značí rychlost šíření vlnění v daném materiálu [$m \cdot s^{-1}$]

f – frekvence [Hz], pro ultrazvuk tedy $f > 20$ kHz. [13]

Čím je frekvence vyšší, tím nižší je vlnová délka, tím se tedy zvyšuje citlivost a tím menší vady lze odhalit. [13]

Významnou roli hraje při ultrazvukovém zkoušení útlum. Ultrazvukové zkoušení ovlivňuje vzdálenost, ve které se vada nachází, jelikož dochází k přirozenému útlumu v materiálu. Proto vada o stejných rozměrech ve větší vzdálenosti bude mít menší echo, než vada bližší. Útlum bude záviset na druhu materiálu. U kompozitních materiálů to bude materiál vláken, matrice. Dále bude útlum ovlivňovat vzájemný poměr vláken a pryskyřice, druh vrstvy a orientace vláken. Frekvence je dalším faktorem ovlivňujícím útlum. Se zvyšující se frekvencí je útlum větší. Útlum ovlivňuje také porozita. Vysoký obsah porozity způsobuje značný útlum ultrazvukových vln. Zejména v případě vzdálenosti je proto nutné provést korekci amplitudy signálu. [5, 13]

Výsledný útlum se vzdáleností závisí na amplitudě dle vztahu:

$$ax = \ln \frac{A_0}{A} \quad (5)$$

kde:

A_0 – původní amplituda signálu vyslaného sondou [m]

A – amplituda v daném místě, po zmenšení původní amplitudy v důsledku útlumu [m]

x – vzdálenost, v níž amplitudu měříme [m]

a – koeficient tlumení specifický pro daný materiál [–] [5]



Při znalosti původní amplitudy, polohy echa a koeficientu tlumení tak není problém provést korekci amplitudy. Zpravidla se tak činí samotným vyhodnocovacím přístrojem. [5, 13]

Akustická vazba

Pro zajištění přenosu ultrazvuku mezi sondou a materiálem se musí vytvořit akustická vazba. Důvodem je, že ultrazvukové vlny vyšších frekvencí se vzduchem nešíří dobře, a proto i malá vzduchová mezera mezi povrchem zkoušené součásti a sondou způsobuje potíže. Akustická vazba se realizuje tzv. vazebním prostředkem, což mohou být např. různé oleje, voda, pastovité celulózoové gely nebo glycerin. Volba vhodného vazebního prostředku závisí na faktorech jako je typ materiálu a jeho náchylnost na některé prvky obsažené v daném prostředku, stav povrchu, teplota povrchu i okolí nebo poloha zkoušeného povrchu. Pro vertikální povrchy nebo povrchy v poloze nad hlavou operátora bude nutné použít vazební prostředky o vyšší viskozitě. [13]

4.3.2 Přístroje a zařízení pro ultrazvukovou metodu

Sondy

Principem vzniku ultrazvukového vlnění je piezoelektrický efekt, kdy přiváděním elektrického napětí na materiál dochází k jeho mechanické deformaci, a tedy přeměně elektrické energie na mechanickou nebo zpět. Tento děj se odehrává v měniči, což tělíčko z piezoelektrického materiálu, na který je přiváděno napětí o příslušné frekvenci. Měníč se rozkmitá a vzniklé ultrazvukové vlny se šíří do materiálu. Zařízení, v němž je měnič uložen, se nazývá sonda. Kromě měniče obsahuje sonda elektrické přívody k měniči, tlumící tělíčko, ladící cívku, konektor pro elektrické propojení s generátorem, případně další elementy charakteristické pro danou konstrukci sondy. Sondy jsou konstruovány pro různé frekvence, mají různé velikosti a mohou být konstruované pro speciální použití nebo obsahovat fokusující prvky. [13]

Přímé sondy pracují s podélnými vlnami šířícími se kolmo k povrchu. Mohou být kontaktní i imersní. Obsahují-li dva měniče - jeden pro příjem a druhý pro vysílání, hovoříme o dvojných sondách. V oblasti použití kompozitních materiálů se tyto sondy mohou využít např. ke zjištění delaminací. [13]

Úhlové sondy využívají vlny podélné nebo příčné. Úhel směru šíření k povrchu materiálu se pohybuje v rozsahu 35° až 80°. [13]



Přístrojové vybavení

Přístroj pro ultrazvukové zkoušení se skládá z generátoru, jenž pomocí elektrických impulsů rozkmitává měnič. Dále obsahuje přijímač přijatých signálů a zesilovač, neboť přijaté signály jsou slabé v řádech milivoltů a jejich zobrazení by mohlo být obtížné. Nezbytnou součástí je zdroj časové základny, bez níž není možné vyhodnocení polohy a velikost defektu. Protože je vyhodnocování ultrazvukové zkoušky založeno na grafickém výstupu, je neopominutelnou součástí přístroje také obrazovka pro zobrazení naměřených dat. [13]

U analogových přístrojů se vyhodnocuje přímo napěťový signál. V současné době ale hrají nezastupitelnou roli digitální přístroje, kde je napěťový signál dále přístrojem zpracováván. Mezi jejich předností patří především značně menší rozměry a velmi přesné vyhodnocování. Napětí lze přesně číselně vyjádřit, protože jej nemusí odečítat obsluha ze stínítka, takže v tomto ohledu odpadá lidský faktor jako zdroj chyby při odečtu polohy. Pro jejich použití hovoří také nemožnost rozladění, opakovatelnost nastavení a připojení k dalším zařízením (počítač, tiskárna). Příklad technické realizace defektoskopu ukazuje Obrázek 16. [13]



Obrázek 16: Defektoskop [18]

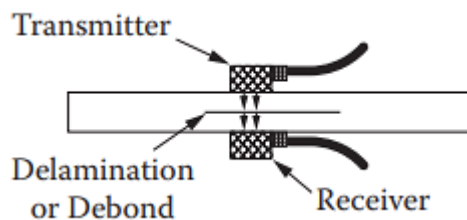
4.3.3 Průchodová metoda

Průchodová metoda spočívá v použití dvou sond, které jsou umístěné proti sobě, tj. na vnější a vnitřní straně součásti. Jedna má funkci vysílače, druhá přijímače. Metoda umožňuje vadu pouze detekovat, neumožňuje zjistit její velikost. Z jejího popisu je rovněž patrné, že nebude



použitelná pro povrchy, u nichž není přístup k vnitřní straně součásti. Princip metody zobrazuje Obrázek 17. [5, 19]

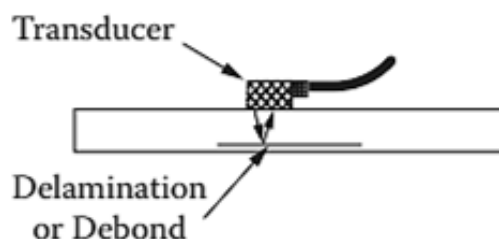
Porozita, vrásky nebo kontaminace se projeví ztlumením přijatého signálu oproti místu bez vady. Delaminace se projeví až absencí signálu u přijímače. Kromě uvedených vad je metoda rovněž vhodná pro zjišťování přítomnosti vody v konstrukci. [5, 19]



Obrázek 17: Průchodová metoda [8]

4.3.4 Pulzní metoda

Pulzní metoda (metoda Pulse-Echo) funguje na principu vysílání jednotlivých ultrazvukových pulzů do materiálu a přijímání jejich odražené odezvy zpět. Metoda dokáže lokalizovat polohu vady, její velikost, případně i tvar. mezi její nevýhody patří především větší nároky na znalosti z hlediska vyhodnocení. Metoda velmi dobře odhaluje porozitu, vrásky a delaminace. Metodu ukazuje Obrázek 18. [5, 19]



Obrázek 18: Pulzní metoda [8]

4.3.5 Další UT metody

Průchodová nebo pulzní metoda jsou základem pro další techniky UT. Jako příklad lze uvést techniku Phased Array, u níž je zkušební těleso tvořené soustavou sond, které lze různě natáčet, a tak pokrýt různé úhly a oblasti zkoušení. [13]

4.3.6 Imersní metody

Imersní metody jsou metody, u nichž se vazební prostředek pro zajištění akustické vazby nenanáší na součást lokálně. U těchto metod dochází k ponoru celé součásti do vazebního



prostředku, jímž je zpravidla voda. Z hlediska principu využívají tyto metody principy výše uvedené, např. pulsní nebo průchodovou. [13]

4.4 Termografie

4.4.1 Charakteristika zkoušení termografií

Termografie (IRT) využívá přenosu tepla vedením v tělese a jeho vyzařování povrchem tělesa. Přenos tepla vedením v tělese charakterizuje Fourierův zákon, který dává do vztahu přenesenou tepelnou energii za jednotku času \dot{q} , parametry materiálu charakterizované součinitelem tepelné vodivosti λ a gradient teploty mezi vyšetřovanými místy v tělese ∇T :

$$\dot{q} = \lambda \nabla T \quad (6)$$

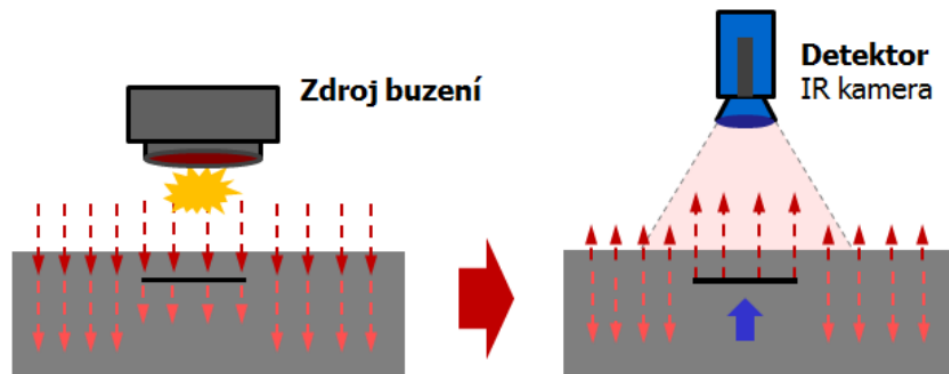
kde: \dot{q} – hustota tepelného toku [$J s^{-1} m^{-2}$], resp. [$W m^{-2}$]

λ – součinitel tepelné vodivosti [$W m^{-1} K^{-1}$]

T – teplota [K] [20, 21]

Součinitel tepelné vodivosti má pro termografii důležitou roli. Pokud bychom měli desku z určitého materiálu a tloušťky $t = 1m$, jejíž jeden povrch má teplotu T_1 a druhý teplotu T_2 . Potom tento součinitel vyjadřuje výkon, který tento materiál přenese. Pokud budeme mít desku z jiného materiálu o shodných rozměrech a shodných teplotách povrchu, potom se přenesený výkon bude lišit. [22]

Při termografickém zkoušení je součástí nejprve dodána energie zvenku. Může se jednat např. o tepelný, mechanický nebo světelný impuls. Tato energie se přeměňuje při dopadu na povrch součásti na teplo, pokud tento charakter nemá již od začátku, jako je tomu v případě dodání tepelného impulsu. Toto teplo se rozvádí z povrchu směrem do součásti. Pokud se v součásti vyskytuje defekt, potom bude odvádět teplo z povrchu rychleji, pokud bude součinitel tepelné vodivosti vyšší, než u zkoumaného materiálu, v případě menšího součinitele naopak pomaleji. Povrch bude zároveň do okolí vyzařovat méně tepelné energie, pokud bude teplo z něho odvedeno rychleji, nebo naopak více, pokud bude odvedeno pomaleji. Princip zkoušení IRT zobrazuje Obrázek 19 a Obrázek 20. [5, 23]



Obrázek 19: Prostup tepla součástí s vadou (vlevo), vyzařování tepelné energie součástí s vadou (vpravo) [23]

Obecné pravidlo pro měření touto metodou je, že plocha měřeného objektu by měla být větší, než jeho hloubka. Termografie zpravidla není příliš citlivá pro odhalování výrobních vad jako je např. porozita. Pokud se tedy používá pro detekci výrobních vad, potom se však nebude jednat o náročné aplikace na přítomnost vad, do kterých patří např. letecký průmysl. Termografie se však velmi osvědčila pro odhalování defektů vzniklých za provozu jako jsou delaminace nebo u voštinových konstrukcí přítomnost vody. Metoda může být velmi rychlá a vyhodnotit tak, jestli je nutné podrobit danou součást podrobnějšímu zkoumání. V takovém případě umožňuje velmi dobře specifikovat oblast, které by se měla věnovat zvýšená pozornost. [5, 9, 23]

Dělení termografie

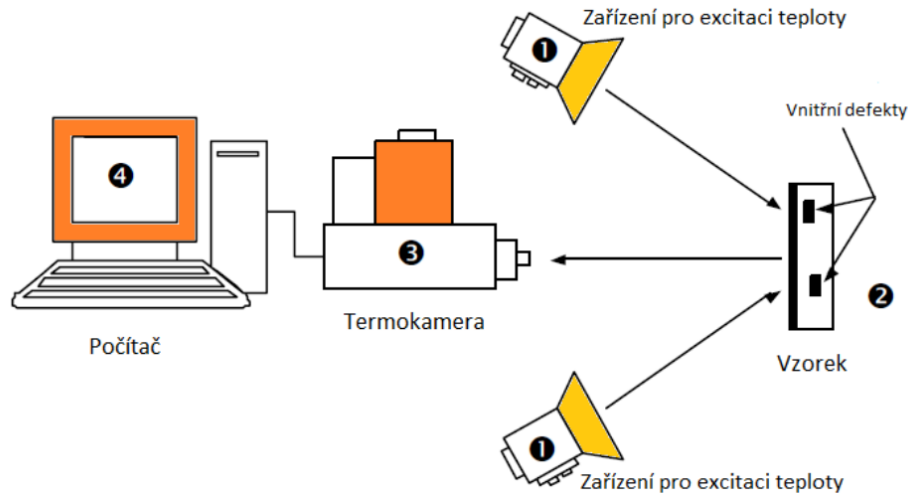
- **Pasivní termografie** pracuje s okolním prostředím jako se zdrojem tepla. Tudiž měří emisivitu povrchu jako důsledek přirozeného ohřevu prostředím, ve kterém se součást nachází. Příkladem může být letadlo, které kleslo do nižších výšek z chladnější vyšší oblasti. Mimo letecký průmysl může být zajímavou aplikací stavebnictví, kde se tímto způsobem zjišťuje průběh prosychání stavebních materiálů. [13, 23]
- **Aktivní termografie** používá umělý zdroj tepla, tedy účelně ohřívá danou součást, u níž je opět měřena emisivita. [23]

4.4.2 Přístroje a zařízení pro termografii

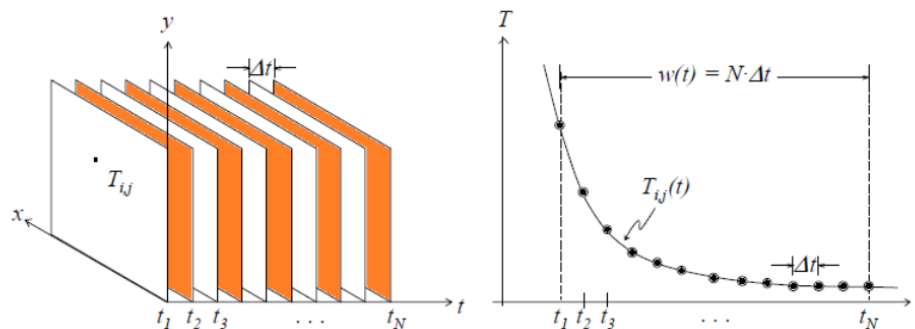
Základem jakékoli zkoušky IRT je kromě zdroje pro excitaci teploty termokamera, která měří tepelnou energii vyzářenou povrchem objektu. Termokamera pořizuje sérii snímků, tzv. termogramů zkoušené plochy, mezi nimiž je pravidelná časová prodleva. Vzniká tzv. 3D matice (viz Obrázek 21) ze souřadnic plochy x,y a souřadnice času Δt . Z těchto snímků lze potom



získat pro zkoumaný materiál charakteristickou křivku poklesu (viz Obrázek 21). Pokud se v materiálu vyskytuje defekt, dochází k deformaci této křivky. [23]



Obrázek 20: Systém zařízení pro zkoušení aktivní termografie [23]



Obrázek 21: Vlevo - teplotní 3D matice; vpravo - teplotní profil určitého místa bez defektu [23]

4.4.3 Pulsní termografie

Jedná se o aktivní metodu termografie, kde je na součást přiveden tepelný impuls (např. silným optickým zábleskem) a následně se zkoumá změna teploty povrchu s časem, tj. fáze ochlazování. Mezi výhody metody patří její rychlost. Ohřátí tepelným impulsem je řádově v rozsahu od milisekund u kovů po jednotky sekund u polymerních materiálů. Krátké trvání ohřevu tak nepoškozuje zkoumaný vzorek, nelze ale pozorovat fázi ohřívání vzorku, jež může být užitečná pro některé aplikace. Nevýhodou pulsní termografie je také omezení na základě hloubky, v níž se defekty nacházejí. Lze zpravidla zkoumat pouze defekty nacházející se v malé hloubce pod povrchem. [23]



4.4.4 Další metody termografie

Lock-in termografie nevyužívá ojedinělý tepelný impuls, ale dodává tepelnou energii do vzorku v podobě spojitě vlny. Většinou se jedná o sinusové vlny. Přítomnost vady ovlivňuje amplitudu a fázový posun. Termografie s krokovým ohřevem je velmi podobná pulsní termografii, tepelný impuls však trvá delší dobu a je proto možné pozorovat proces ohřívání součástí. [23]

4.5 Radiografická metoda

Radiografická metoda využívá průchodu elektromagnetického vlnění materiálem. Používají se dva druhy záření – rentgenové záření a gamma záření. Principem kontroly je vyhodnocení rozdílu v množství záření (tzv. dávkového příkonu), které projde materiálem. Toto množství ovlivňuje především hustota materiálu a tloušťka stěny součásti. Čím je materiál silnější, tím více záření jím bude pohlceno. Obdobně je tomu u hustoty. Materiál o vyšší hustotě pohlcuje větší množství záření. [13, 24]

Výše uvedené závislosti popisuje vztah:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (7)$$

kde: I – výstupní intenzita záření [$W \cdot m^{-2}$]

I_0 – vstupní intenzita záření [$W \cdot m^{-2}$]

μ – lineární součinitel zeslabení [m^{-1}]

x – tloušťka materiálu [m] [25, 26]

Absorpci záření lze vyjádřit nejen z pohledu záření samotného a rozdílu jeho intenzit, ale také z pohledu materiálu, jímž prochází. Absorpci lze vyjádřit již zmíněným dávkovým příkonem \dot{D} , což je energie pohlcená jedním kilogramem materiálu (tzv. dávka D) za jednotku času. Jeho jednotkou je Gray za sekundu [$Gy \cdot s^{-1}$]. Platí tedy následující vztah:

$$\dot{D} = \frac{dE}{dm \cdot dt} \quad (8)$$

kde: \dot{D} – dávkový příkon [$Gy \cdot s^{-1}$]

dE – energie záření pohlcená objemovým elementem materiálu [J]

dm – hmotnost objemového elementu [kg]

dt – časový interval [s] [27]



Pro vyhodnocování přítomnosti vad je důležitý předmětný neboli subjektivní kontrast K_p . Dává do poměru dávkový příkon, který pohltí materiál v místě vady, a dávkový příkon pohlcený materiálem bez vad. Platí pro něj následující vztah:

$$K_p = \frac{D_1}{D_2} \quad (9)$$

kde: K_p – předmětný kontrast [-]

D_1 – dávkový příkon pohlcený materiálem bez vady [$Gy \cdot s^{-1}$]

D_2 – dávkový příkon pohlcený materiálem s vadou [$Gy \cdot s^{-1}$] [13]

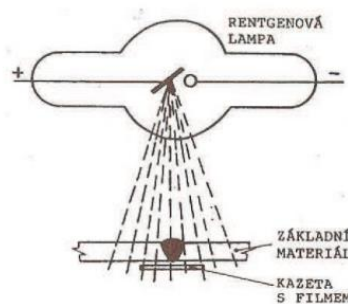
Mezi často odhalované vady kompozitních materiálů patří delaminace, kontaminace, nesprávné rozmístění vláken nebo vlhkost. [5, 8]

4.5.1 Přístroje a zařízení pro radiografickou metodu

Základem pro provádění radiografické metody je zdroj rentgenového záření, jímž je rentgenová trubice (viz Obrázek 22), kde se využívá vzniku záření při nárazu elektronů do anody. Při použití gamma záření vznikajícím při rozpadu atomu, tzn. při přechodu do nižšího (stabilnějšího) stavu se jako zdroje používají izotopy selena (Se 75), iridia (Ir 192) nebo kobaltu (Co 60). [13]

Nezbytné je vybavení schopné detekovat dopadající záření. Při klasické rentgenové metodě se jedná o filmy (fólie) obsahující molekuly bromidu stříbrného, z nichž se při interakci s RTG zářením vylučují krystalky stříbra. Filmy se musejí dále zpracovat – vyvolat, aby mohl být na nich zachycený obraz viditelný. [13]

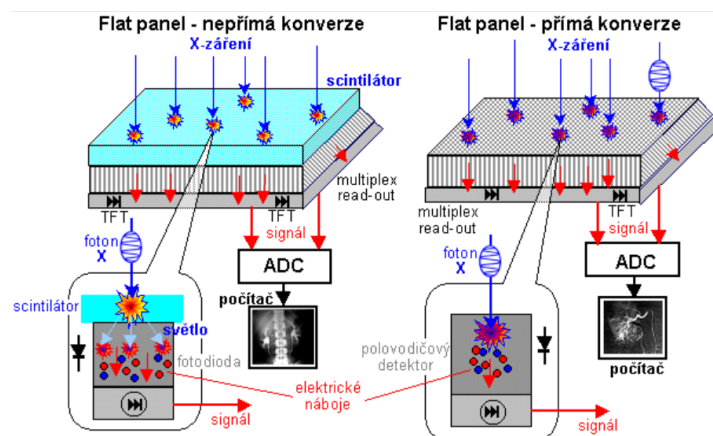
Při provádění RT se používají další podpůrné fólie, např. kovová fólie, která významně snižuje průchod rozptýleného záření a tím i jeho působení na film a zlepšuje jeho následnou čitelnost. Pro ověření správného provedení metody se používají různé přístroje a prostředky, jakými jsou např. radiografické měrky. [13]



Obrázek 22: Rentgenová lampa: princip vzniku záření (vlevo) [24], technické provedení (vpravo) [28]

4.5.2 Digitální radiografie

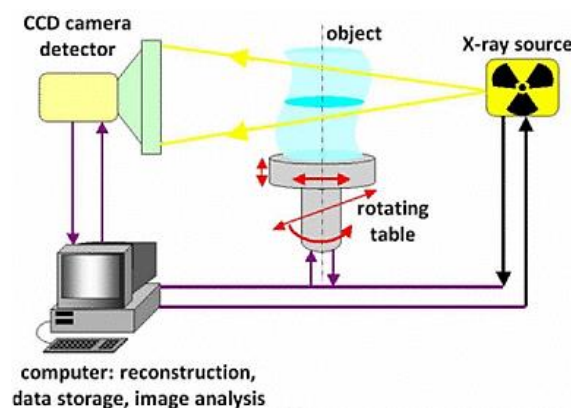
Digitální radiografie využívá místo fólií speciální panely schopné detekovat rentgenové záření a následně jej převádět na elektrický signál. Skládají se ze scintilační vrstvy, ve které při dopadu RTG záření vznikají záblesky, tzv. scintilace. Viditelné světlo v podobě těchto záblesků následně detekuje vrstva křemíku a převádí jej na elektronový signál, který se následně převádí do digitální podoby. Jedná se o tzv. nepřímou konverzi. V některých případech je místo scintilační a křemíkové vrstvy pouze jedna vrstva z polovodiče, která je schopná detekovat přímo RTG záření, jedná se o jeho tzv. přímou konverzi. Princip digitální radiografie ukazuje Obrázek 23. [13, 29, 30]



Obrázek 23: Princip digitální radiografie: vlevo - nepřímá konverze, vpravo – přímá konverze [30]

4.5.3 Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (CT) je z hlediska převodu obrazu velice podobná metodě digitální tomografie s tím rozdílem, že dochází k otáčení předmětu ve snímacím poli, tudíž vzniká velké množství obrazů z různých úhlů místo jednoho obrazu pouze v jednom směru. Tím je pomocí počítače možné zrekonstruovat 3D obraz součásti. Princip CT ukazuje Obrázek 24. [13, 30, 31]



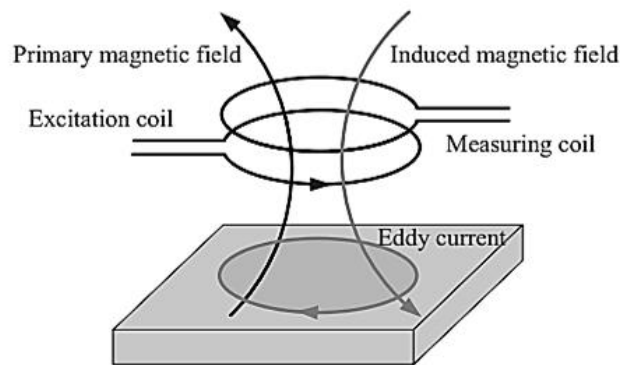
Obrázek 24: Princip počítačové tomografie [31]



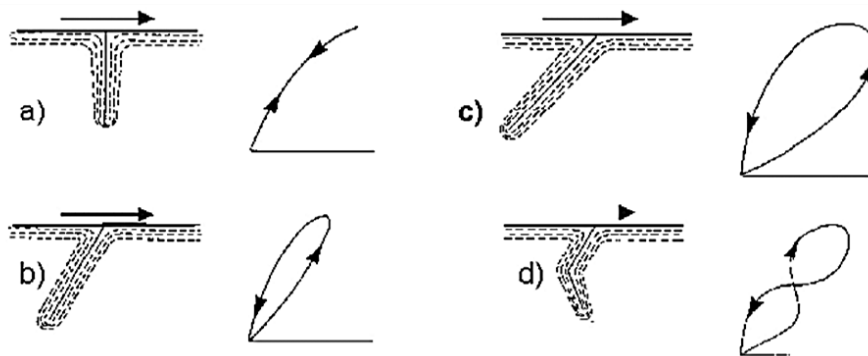
4.6 Metoda vířivých proudů

4.6.1 Charakteristika zkoušení vířivými proudy a faktory jej ovlivňující

Metoda vířivých proudů (Eddy Current Testing, ET) je založená na vyvolání vířivých proudů ve zkoušeném materiálu vnějším magnetickým polem. Vířivé proudy vyvolávají jako odpověď vlastní magnetické pole, které působí proti primárnímu poli. Princip ET je zobrazuje Obrázek 25. Zároveň může toto pole indukovat napětí v dalších cívkách, které do tohoto pole umístíme. Ve chvíli, kdy proud narazí na vadu, např. na trhlinu, musí nalézt jinou cestu, což se projeví i na následném zobrazení na obrazovce vyhodnocovacího přístroje (viz Obrázek 26). [32, 33]

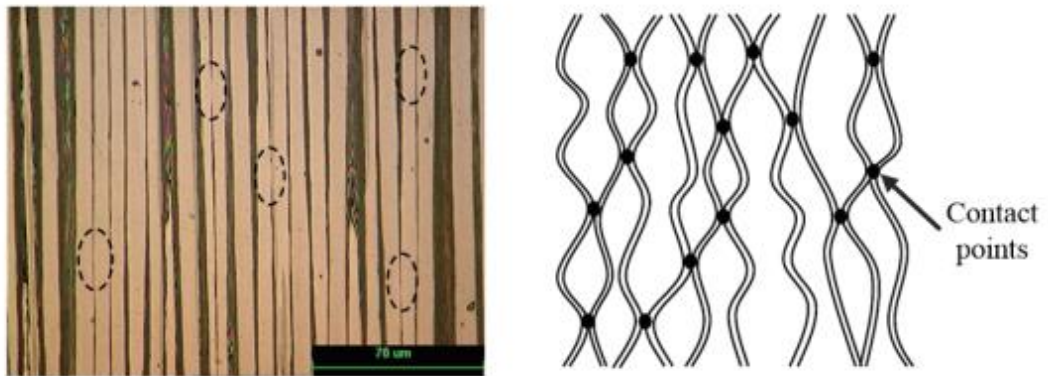


Obrázek 25: Princip ET [32]



Obrázek 26: Vliv vady na tok proudu v materiálu [33]

Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující zkoušení ET je zkoušený materiál a jeho vlastnosti, především elektrická vodivost a magnetická permeabilita. Při nedostatečné vodivosti materiálu protéká velmi malý proud a metoda je pro materiál nevhodná. V uhlíkových kompozitních materiálech s polymerní matricí jsou tímto vodivým materiálem uhlíková vlákna, která se dotýkají navzájem v různých místech a tvoří tak uzavřené vodivé smyčky, jak znázorňuje Obrázek 27. Polymerní matrice je oproti tomu nevodivá, proto v příčném směru je elektrický odpor výrazně vyšší než ve směru vláken. [13, 32]



Obrázek 27: Uložení vláken v laminátu (vlevo) a znázornění smyček s kontaktními body (vpravo) [32]



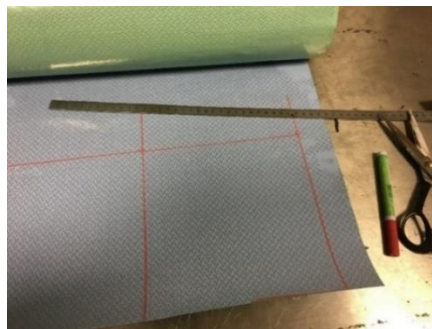
Praktická část

5 Výroba vzorků

5.1 Obecný popis výroby vzorků

Pro ověření vhodného defektoskopického zkoušení bylo nejprve nutné vyrobit vzorky s uměle vnesenými vadami. Nejprve bylo potřeba zvolit vhodnou podobu vzorků - zda budou vyrobeny samostatně, nebo bude více vad v jednom objektu. Jako optimální řešení s ohledem na zkoušení i efektivitu výroby byla zvolena deska, která obsahovala všechny zvolené vady. Destička měla rozměry 200 x 200 mm o celkem 12 vrstvách. Tloušťka vytvrzeného vzorku činila 3 mm. Byl použit základní materiál prepreg HexPly M26T/ 50%/ G939.

Nejprve bylo provedeno dělení materiálu z role prepregu. Dělení bylo provedeno stříhem na jednotlivé předem naměřené vrstvy (viz Obrázek 28 a Obrázek 29). Následně byly tyto vrstvy kladeny na sebe.



Obrázek 28: Proces přípravy tvaru vzorků nakreslení rozměrů a nastříhání role prepregu



Obrázek 29: Jednotlivé vystřižené vrstvy



Kromě přípravy samotných vzorků bylo také nutné připravit formu, již byla hladká ocelová deska. Po odmaštění a očištění formy byl na formu nanesen separační gelcoat FMS Frekote od výrobce Loctite (viz Obrázek 30).



Obrázek 30: Nanášení gelcoatu

Po přípravě vrstev a formy bylo možné zahájit sestavení vzorku z dílčích vrstev a vnesení vad. Na očištěnou formu s gelcoatem se nalepila první vrstva prepregu, z níž byla nejprve stržena z jedné strany ochranná fólie. Ochranná fólie z druhé strany byla stržena až následně, aby nedocházelo ke zbytečnému kontaktu vrstvy prepregu s okolním prostředím. Stejným postupem se kladly na sebe i ostatní vrstvy, mezi které byly vnášeny umělé vady. O této části výroby pojednává kapitola 5.2.



Obrázek 31: Umístění vrstev na formu



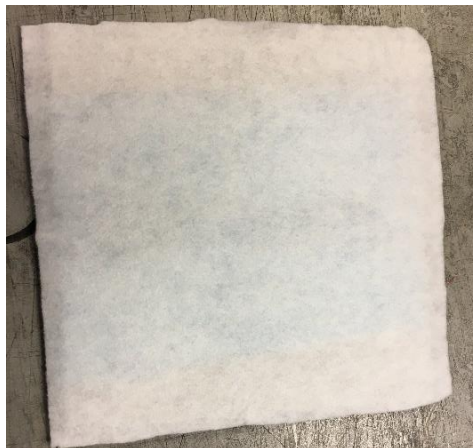
Následující operací po zhotovení vzorku byla jeho příprava na vytvrzení. Na vzorek se umístila strhávací tkanina chránící budoucí vytvrzený vzorek před případným dalším zpracováním (viz Obrázek 32). Poté se umisťovala perforovaná separační fólie (viz Obrázek 33) a odsávací rohož pohlcující nadměrné množství pojiva (viz Obrázek 34).



Obrázek 32: Umístění strhávací fólie na vzorek



Obrázek 33: Perforovaná separační fólie



Obrázek 34: Umístění odsávací rohože na vzorek



Forma se vzorkem a uvedenými krycími vrstvami se umístila celá do vakuovací fólie a utěsnila těsnící páskou. Ke vzorku do vakuovací fólie bylo nutné umístit i část ventilu pro vývěvu. Následně se vytvořil do fólie malý otvor v místě ventilu, přesněji v místě, kde je vytvořen závitový otvor pro druhou část ventilu (viz Obrázek 35). Do takto vytvořeného otvoru ve fólii byla poté zašroubována druhá část ventilu.



Obrázek 35: Vytváření otvoru v místě závitového otvoru části ventilu umístěné ve vakuovací fólii

V této fázi byla již forma připravena na evakuaci, která byla provedena s pomocí vývěvy. Ventil byl připojen k vývěvě prostřednictvím hadice. Evakuaci znázorňuje Obrázek 36.



Obrázek 36: Evakuace vzorku

Po vakuaci bylo možné provést samotné vytvrzení. Dle doporučené receptury přípravy materiálu byl proveden postupný ohřev a natlakování až na teplotu 110 °C a tlak 6 bar. Tato



teplota se udržovala po dobu 100 minut. Následně došlo k postupnému snížení tlaku a teploty na počáteční hodnotu. Podrobný popis receptury uvádí Tabulka 1.

Krok	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Doba kroku [min]
1.	45	0	1
2.	60	1	35
3.	60	2	50
4.	110	6	50
5.	110	6	100
6.	50	3	120
7.	50	0	30

Tabulka 1: Receptura pro vytvrzení vzorku

5.2 Implementace vad do vzorků

Předchozí podkapitola se věnovala obecnému postupu při zhotovování kompozitních vzorků. Tato podkapitola přibližuje samotné zhotovení vad a jejich implementaci do vzorku. Jako první bylo nutné stanovit počet vrstev, vhodné vady a jejich velikost pro simulaci. Snaha byla především simulovat vady vzniklé při výrobě, proto byla zvolena kontaminace, porozita, otisk nástroje, zvrásnění a překryv vrstev. Za hlavní materiál kontaminace byla zvolena aluminiová fólie. V případě výroby kompozitních materiálů se jedná o nestandardní druh materiálu kontaminace, nejčastěji se vyskytuje jako kontaminace krycí fólií. Účelem však bylo simulovat situaci, kdy by při neprofesionálním přístupu personálu došlo např. ke konzumaci potravin ve výrobních prostorách v těsné blízkosti vyráběných součástí. Vady byly rozmístěny do celkem sedmi polí (viz Obrázek 37 a Obrázek 38). Zároveň byly vady rozmístěny tak, aby byla jejich výroba co nejsnazší.

V poli č. 1 se nachází kontaminace realizovaná třemi materiály o rozměrech 10x10 mm. Jedná se směrem od horního okraje o krycí fólii z prepregu, následuje tkanina a aluminiová fólie. Přítomnost vady měla za cíl ověřit, jak jednotlivé NDT metody odhalí různé typy materiálu.

Pole č. 2 jsou vady tvořené čtverečky z aluminiové fólie o rozměrech 10x10 mm. Tyto čtverečky jsou vždy umístěny po položení každé sudé vrstvy, jsou tedy umístěny na druhé, čtvrté, šesté, osmé a desáté vrstvě. Účelem bylo zjistit detekovatelnost vad v různých hloubkách.



Pole č. 3 obsahuje nadměrný překryv vrstev, který byl realizován celkem čtyřmi čtverečky z prepregu o rozměrech 20 x 20 mm. Tyto čtverečky byly umístěny po dvou na sobě a od sebe vzdáleny 10 mm. Účelem implementace vady bylo stanovit, zda-li je takovýto překryv v tloušťce vzorku zjištělný.

V poli č.4 se nachází kontaminace - aluminiová fólie jako prostorová vada v podobě dvou kuliček o rozměrech 5x5 mm a 3x3 mm a jako plošná vada o rozměrech 3x3 mm, 5x5mm, 10x10 mm a 15x15 mm. Účelem bylo ověřit zjištělnost vad z hlediska rozměrového.

Pole č. 5 žádnou vadu neobsahuje za účelem kalibrace zařízení.

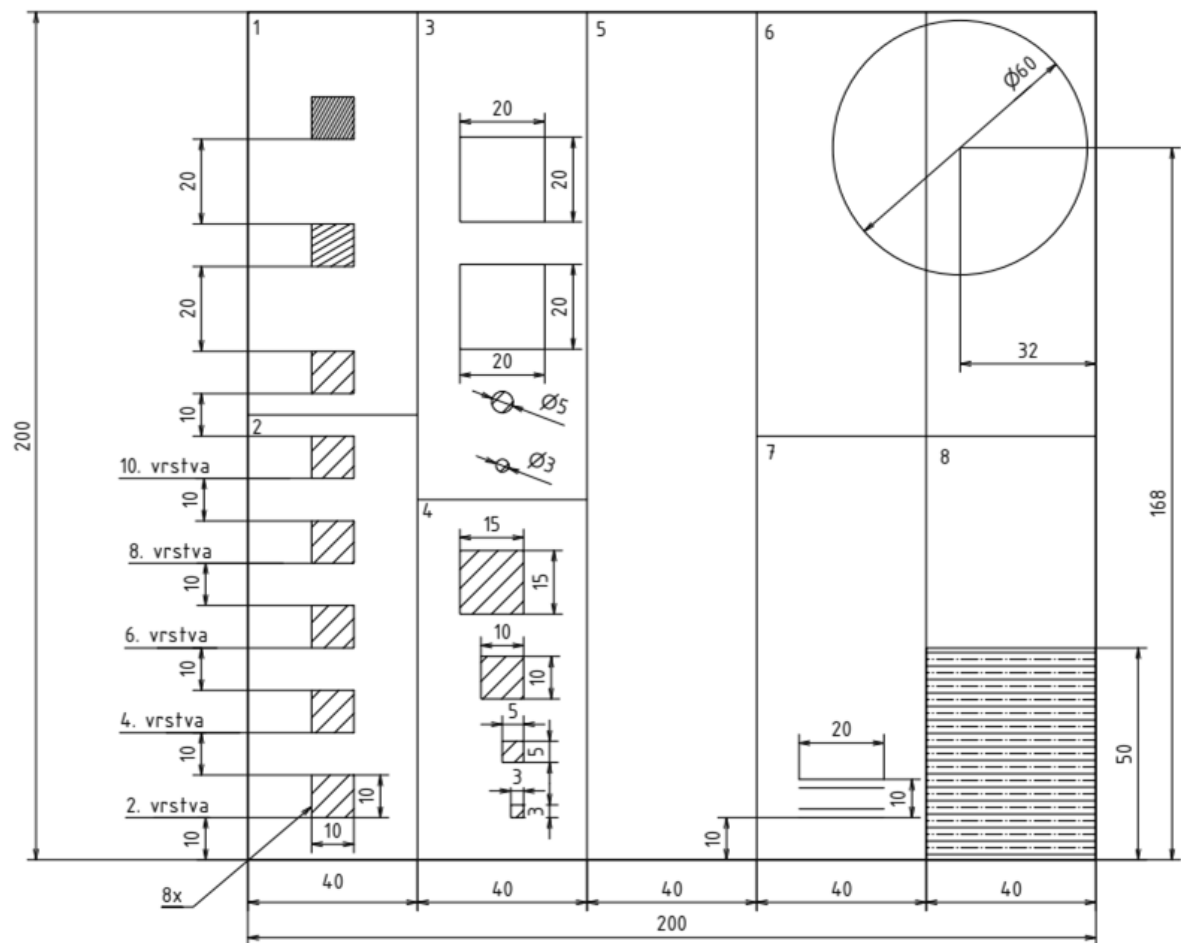
Pole č. 6 a 8. obsahuje otisk nástroje. Otisk byl proveden nesprávným umístěním odsávacího ventilu vývěvy. Účelem této vady bylo ukázat, v jakém rozsahu se může projevit otisk nástroje či umístění cizího objektu na vzorek při vytvrzování.

Pole č. 7 realizuje technologickou vadu, kdy v důsledku nedůkladného nalepení dojde k přeložení jedné vrstvy z části přes sebe. Účelem bylo zjistit, jak se tento překryv při zkoušení projeví.

Pole č. 9 simuluje vlhkost v prepregu. Vrstva byla navlhčena do vzdálenost 50 mm od spodního okraje. Účelem bylo zjistit, zda bude tato vada detekovatelná různými metodami.



Obrázek 37: Vady umístěné mezi vrstvou č. 4 a 5



Obrázek 38: Schéma rozmístění vad ve vzorku v pohledu shora



6 Nedestruktivní zkoušení

6.1 Vizuální kontrola

Vizuální metoda byla provedena jako mezioperační VT posuzující stav výstupního produktu. Na vzorku byl výrazně viditelný otisk nástroje (odsávacího ventilu), dále ze vzorku zřetelně vystoupaly vady v podobě nadměrného překryvu vrstev, zvrásnění a objemové vady kontaminace aluminiovou fólií (viz Obrázek 42). Pod otiskem odsávacího ventilu došlo k vytržení vláken a vzniku nekompaktního povrchu (viz Obrázek 41). Zároveň lze pozorovat nedůkladné vrstvení na nepravidelných rozích (viz Obrázek 39). Během manipulace se vzorkem došlo ke vzniku škrábanců na povrchu (viz Obrázek 40).



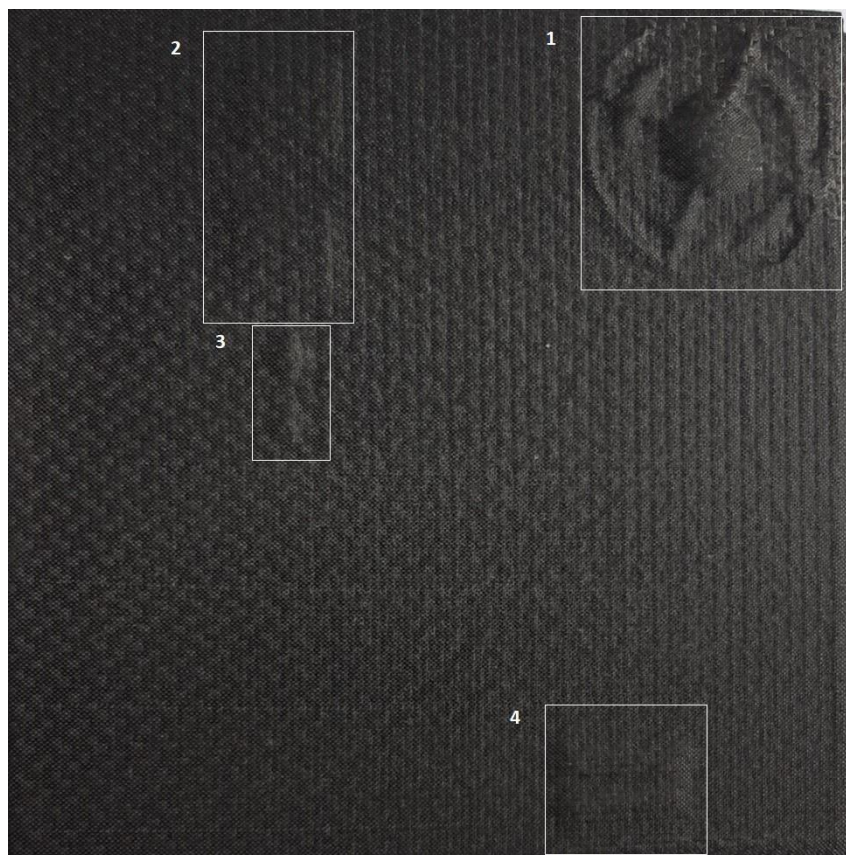
Obrázek 39: Nepravidelný roh vzorku při nedůsledném pokládání vrstev



Obrázek 40: Poškrábání povrchu v důsledku manipulace se vzorkem



Obrázek 41: Vytržení vláken pod otiskem ventilu



Obrázek 42: Vyznačení vad vystupujících na povrch 1 – otisk nástroje, 2 – nadměrný překryv vrstev, 3 – kontaminace aluminiovou fólií v podobě prostorových vad, 4 – vrásky

6.2 Ultrazvuková imersní odrazová metoda

Při aplikaci UT byla zvolena imersní metoda odrazová. Prozkoušení bylo provedeno na zařízení – prototypu UZM 3000 CS společnosti ATG s.r.o. Jako první bylo nutné provést vhodné upevnění vzorku. Toho se docílilo upevněním vzorku pomocí šroubů do ocelové konstrukce



zkušebního zařízení. Tato konstrukce se umístila do bazénu, jenž se následně napustil vodou. Umístění vzorku do konstrukce s částečně napuštěným bazénem ukazuje Obrázek 43.



Obrázek 43: Upevněný vzorek v ocelové konstrukci v bazénu

Jako další krok bylo nezbytně nutné zvolit vhodnou sondu. Jako část zkušebního zařízení byla zvolena sonda TECHNISONIC ISL-0502-HR 5 MHz o průměru frekvenčního měniče 0,25“ (tj. přibližně 3 mm), jež byla upevněna do pohyblivého uchycovacího ústrojí. Vzhledem k malé tloušťce vzorku bylo nastaveno napájecí napětí 125 V. Montáž sondy do úchopného zařízení ukazuje Obrázek 44.



Obrázek 44: Montáž sondy do úchopného zařízení

Dalším krokem bylo umístění sondy do správné polohy, aby měření probíhalo za blízkým polem. Kromě umístění sondy do polohy před zkoušený vzorek bylo nutné nastavit vhodnou vzdálenost sondy od zkoušeného vzorku. Dále se musela sonda nastavit ve správném úhlu tak, aby byla kolmo k povrchu vzorku.



V další etapě již bylo možné zahájit samotné měření. To se skládalo z proskenování vzorku, kdy se sonda pohybovala v daných horizontálních směrech ve vytyčené dráze a po proběhnutí této dráhy se posunula ve vertikálním směru do dané polohy v níž opět provedla horizontální proskenování vzorku. Výsledkem bylo zobrazení v rovině XY s barevným rozlišením indikací, tzv. C-scan (viz Obrázek 45 a Obrázek 46). Vzorek byl rozdělen do dvou zobrazení – horní a spodní části. Jako další výstupy byly získány pro vybrané charakteristické oblasti závislosti amplitudy echa na vzdálenosti od čela sondy, tzv. A-scan.

C-Scan	
Ultrazvuková karta	PCMUX7108HA+
Sonda	TECHNISONICS ISL-0502-HR, 5 MHz
Napájecí napětí	125 V
Vzdálenost sondy od vzorku	31 až 34,5 mm
Celkové zesílení	
Část 1 (horní polovina)	3,6 dB
Část 2 (spodní polovina)	5,6 dB
Zesílení koncového echa	8,6 dB
Rychlost šíření ultrazvuku v kompozitu	2700 m/s
Rychlost šíření ultrazvuku ve vodě	1400 m/s
Krok scanu	1 mm
Rychlost scanu	300 mm/s

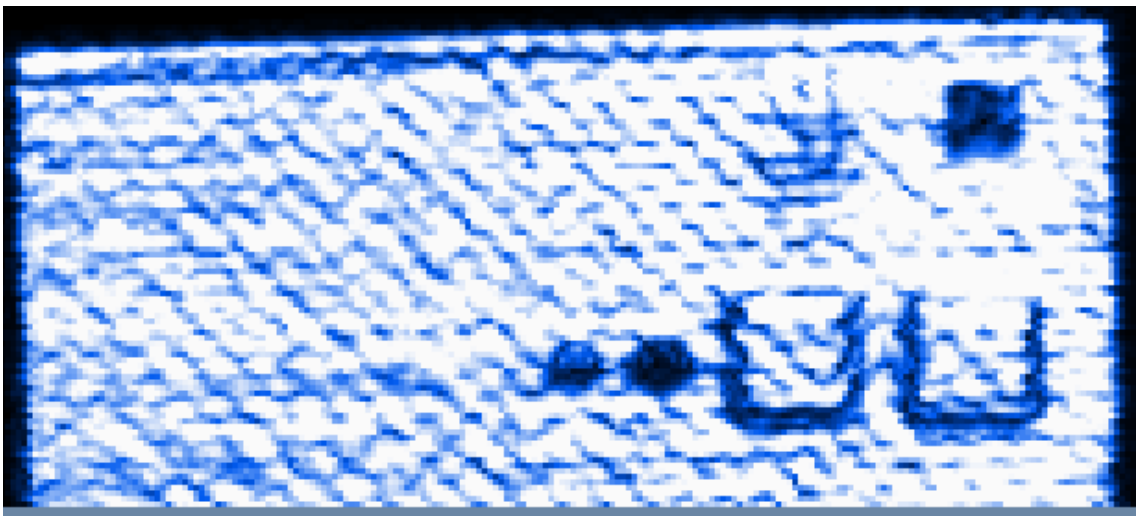
Tabulka 2: Parametry zkoušení UT imersní metodou odrazovou

Po provedení měření bylo zjištěno, že vady v podobě aluminiové fólie imersní odrazová UT metoda pro dané nastavení sondy neodhalila. Odhalila pouze prostorové vady z aluminiové fólie. Důvodem odhalení prostorových vad je jejich velká tloušťka podobně jako v případě otisku nástroje. Velmi nezřetelně je na C-scanu viditelná tkanina, metoda velmi dobře odhalila kontaminaci v podobě krycí fólie. Z vyhodnocení je zároveň patrný význam drsnosti povrchu, neboť drsný povrch strhávací tkaniny se v C-scanu projevil jako zrnitost, a značně znesnadňoval vyhodnocení indikací. Tato komplikace mohla být příčinou neodhalení porozity, která rovněž není na C-scanu viditelná. Na C-scanu je dále viditelný nadměrný překryv vrstev,

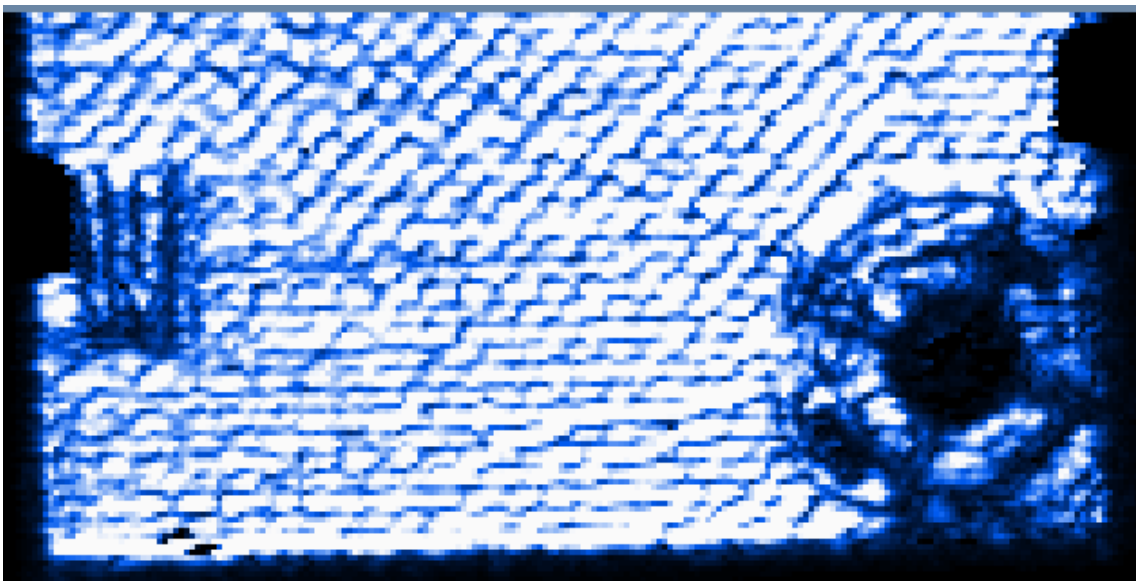


zvrásnění a otisk nástroje. Jejich viditelnost je však umožněna spíše v důsledku výrazného převýšení. UT tedy v případě těchto vad fungovala jako tloušťkoměr.

Příčinou neodhalení aluminiové fólie byl zvolený materiál vady. Koeficient útlumu ultrazvuku hliníkem se pohybuje v jednotkách $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$ (např. materiál EN AW 2024 má hodnotu koeficientu útlumu $6,6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$). Oproti tomu koeficient útlumu kompozitního materiálu s polymerní maticí je $120 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$ a polyethylenu $256 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$. Vzhledem k řádovému rozdílu v hodnotách koeficientu útlumu tedy prošel ultrazvuk vadami z aluminiových fóliích jako by tam žádná vada nebyla. [34]



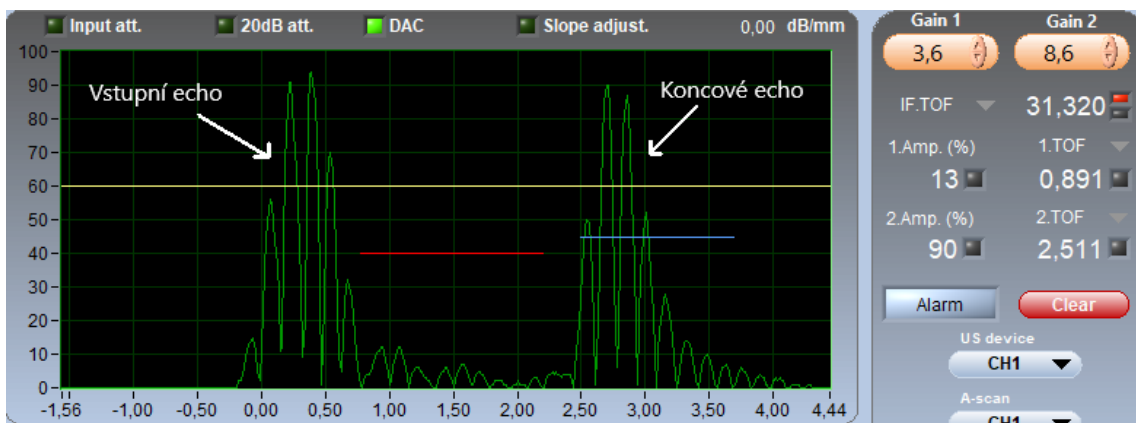
Obrázek 45: UT imersní odrazová: C-sken: Část 1 (svrchní část)



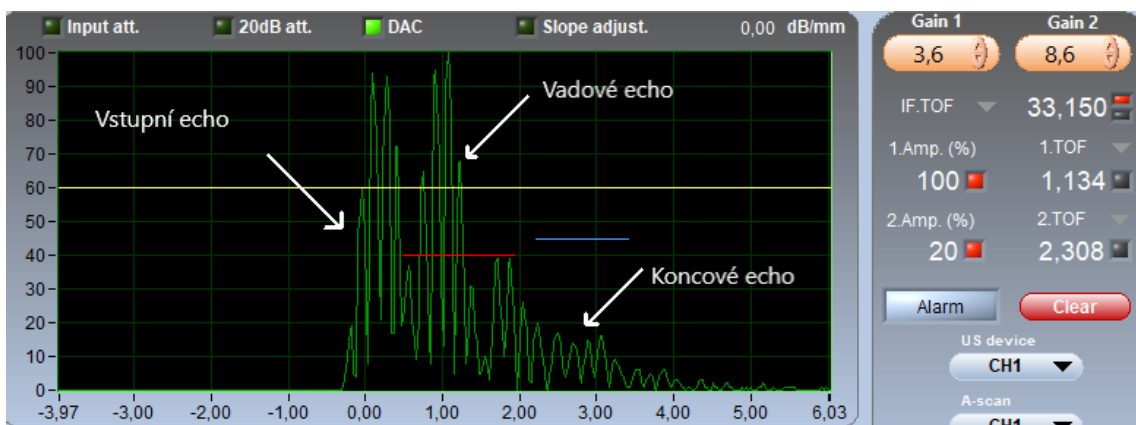
Obrázek 46: UT imersní odrazová: C-sken: Část 2 (spodní část)



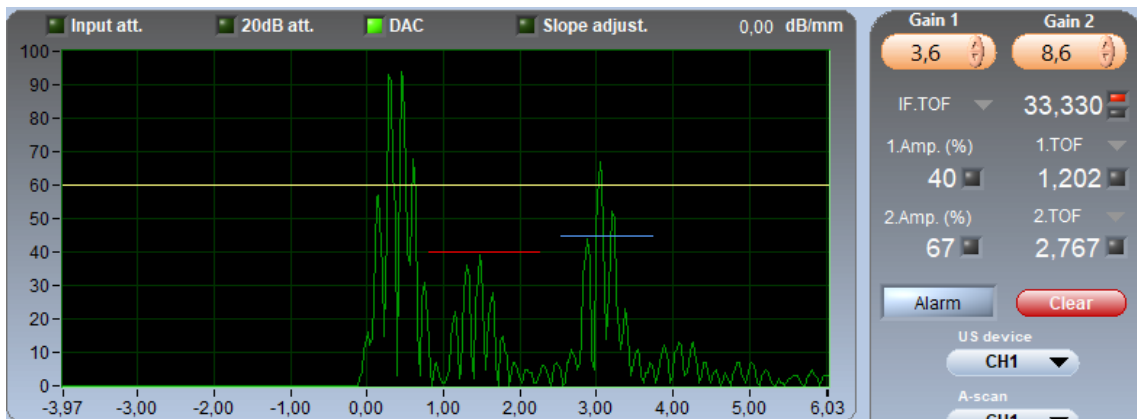
Jako referenční A-scan byl zobrazen scan z pole č. 5. (viz Obrázek 47). Na obrázku je velmi dobře patrné vstupní echo a koncové echo, jehož polohu určuje modrá úsečka. V případě krycí fólie a tkaniny je mezi těmito odezvami patrné ještě vadové echo v oblasti určené červenou úsečkou (viz Obrázek 48 a Obrázek 49). U fólie navíc došlo ke velmi výraznému snížení koncového echa. Stejně tak bylo možné pozorovat pokles nebo ztrátu koncového echa u vad, způsobujících výraznou změnu tloušťky, např. u otisku nástroje (viz Obrázek 51) a u objemových vad z aluminiové fólie (viz Obrázek 50). U nadměrného překryvu (viz Obrázek 52) a vrás (viz Obrázek 53) je patrná zvětšená vzdálenost vstupního a koncového echa v důsledku větší tloušťky vzorku v těchto místech. Echa jsou označena pouze u referenčního A-scanu bez vady a A-scanu krycí fólie.



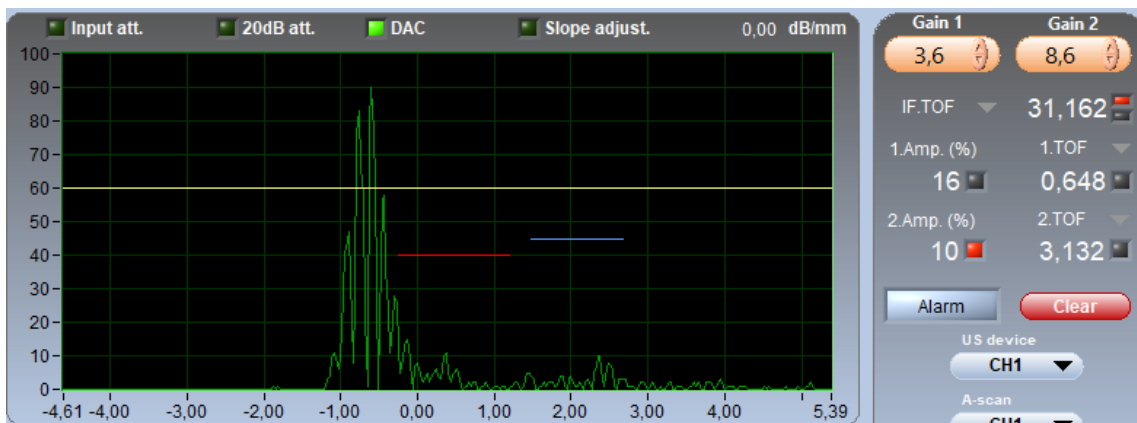
Obrázek 47: UT imersní odrazová: A-scan: Oblast bez vady



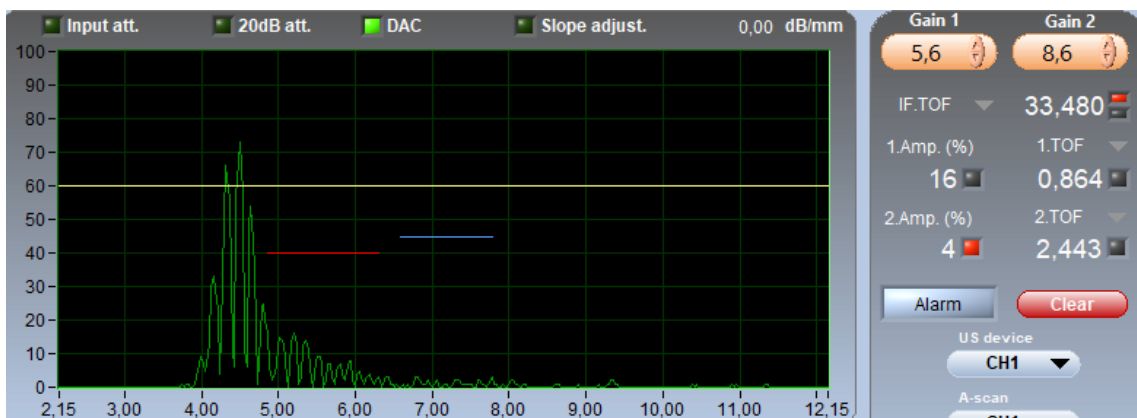
Obrázek 48: UT imersní odrazová: A-scan: Kontaminace krycí fólie



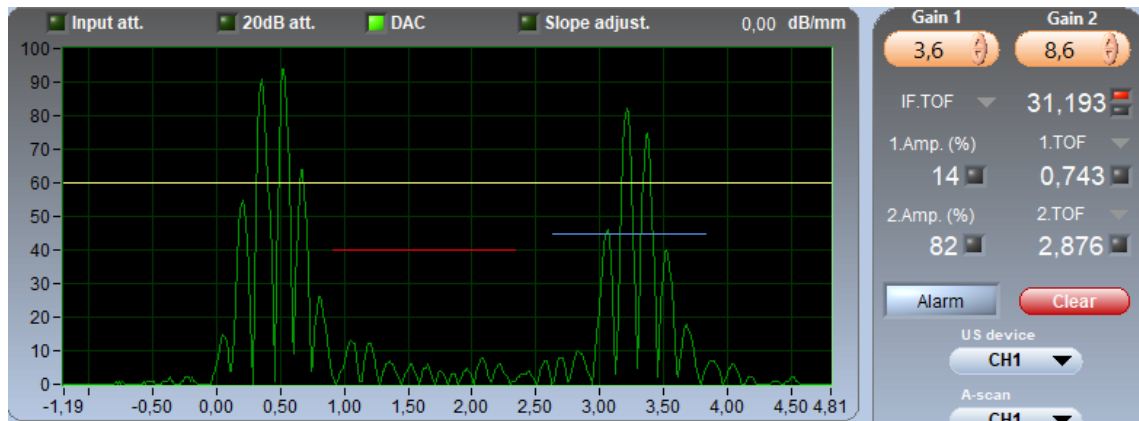
Obrázek 49: UT imersní odrazová: A-scan: Kontaminace tkaninou



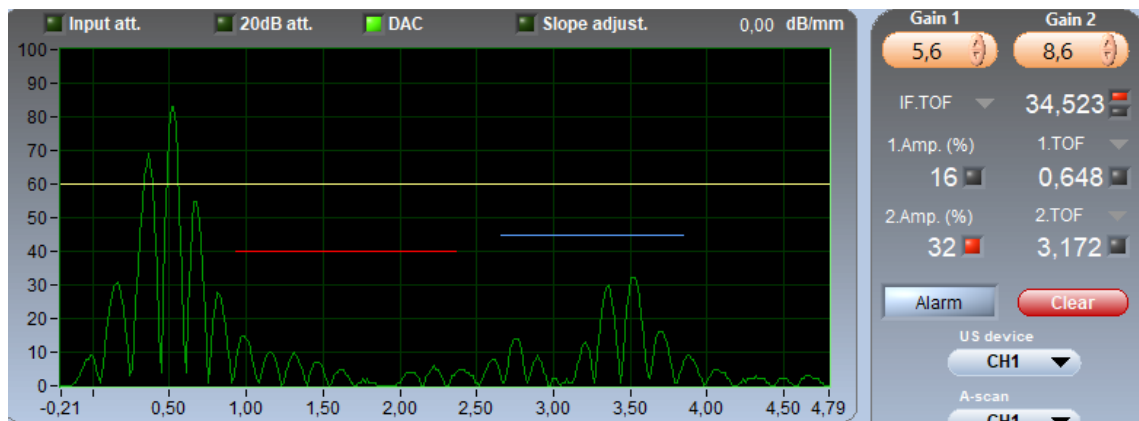
Obrázek 50: UT imersní odrazová: A-scan: Kontaminace aluminiovou fólií (vada objemová, průměr 3 mm)



Obrázek 51: UT imersní odrazová: A-scan: Otisk nástroje



Obrázek 52: UT imersní odrazová: A-scan: Nadměrný překryv vrstev



Obrázek 53: UT imersní odrazová: A-scan: Zvrásnění

6.3 Ultrazvuková imersní průchodová metoda

Prozkoušení probíhalo, stejně jako v případě prozkoušení ultrazvukovou imersní metodou průchodovou, na stroji UZM 300 CS společnosti ATG s.r.o. Upevnění vzorku je proto shodné s postupem popsáním v kapitole věnující se imersní metodě odrazové.



Obrázek 54: Dvojice sond pro UT metodu imersní průchodovou v úchopném zařízení



Prozkoušení bylo provedeno dvojicí sond TECHNISONIC ISL-1002-HR, 10 MHz. Průměr frekvenčních měničů těchto sond činí 0,25“ (tj. přibližně 3 mm).

Sondy byly upevněny do pohyblivých proti sobě umístěných úchopů a nastaveny do polohy kolmé vůči povrchu desky (viz Obrázek 54). Dále byla nastavena vzdálenost zohledňující blízké pole. Parametry měření uvádí Tabulka 3.

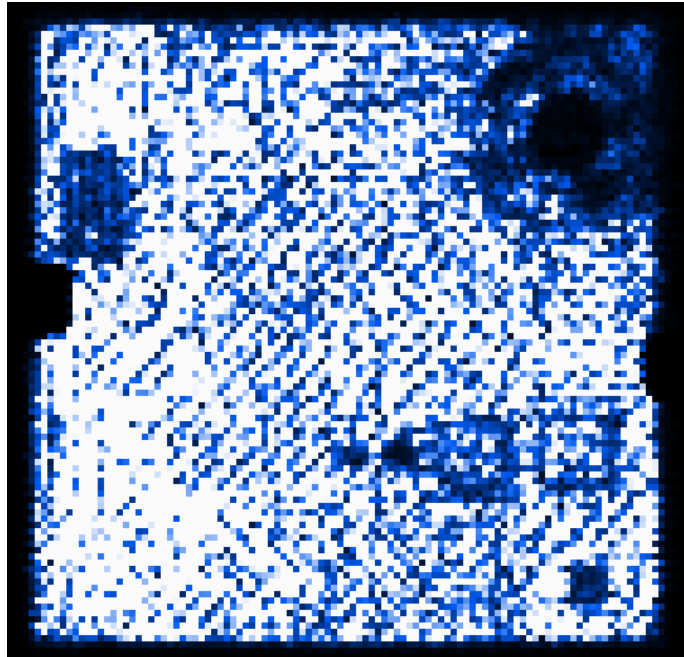
Vzorek byl následně proskenován, kde výstupem byl opět C-scan a pro výrazná místa na C-scanu se zhotovil ještě A-scan.

C-Scan	
Ultrazvuková karta	PCMUX7108HA+
Sonda	TECHNISONICS ISL-1002-VHR, 10 MHz
Napájecí napětí	125 V
Vzdálenost sondy od vzorku	62,8 mm
Celkové zesílení	24 dB
Rychlost šíření ultrazvuku v kompozitu	2700 m/s
Rychlost šíření ultrazvuku ve vodě	1400 m/s
Krok scanu	1 mm
Rychlost scanu	300 mm/s

Tabulka 3: Parametry zkoušení UT imerzní metodu průchodovou

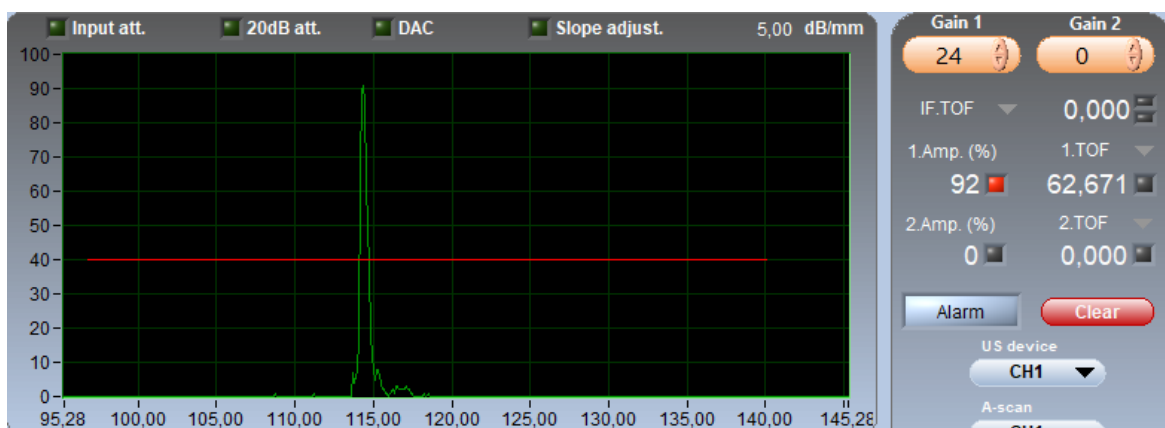
Vyhodnotit získaný C-scan bylo mnohem obtížnější z hlediska kvality obrazu, než v případě UT metody imerzní odrazové. Příčinou byl drsný povrch vzorku v kombinaci se zvolenou sondou. Ta má menší vlnovou délku oproti sondě TECHNISONICS ISL-0502-HR, 5 MHz, je tedy citlivější, ale má horší zobrazení.

UT metoda imerzní průchodová odhalila pouze otisk nástroje, zvrásnění, a nadměrný překryv vrstev a prostorové vady v podobě aluminiové fólie, kde v těchto případech fungovala opět jako tloušťkoměr. Metoda velmi dobře odhalila kontaminaci v podobě krycí fólie. Aluminiová fólie v podobě plošných vad nebyla odhalena ze stejného důvodu jako u odrazové metody, tzn. z důvodu řádově nižšího útlumu ultrazvuku hliníkem. Oproti UT metodě imerzní odrazové nebyla odhalena kontaminace v podobě vláken, vzhledem k horší kvalitě snímku. Porozita pozorována nebyla. Výsledný C-scan zobrazuje Obrázek 55.

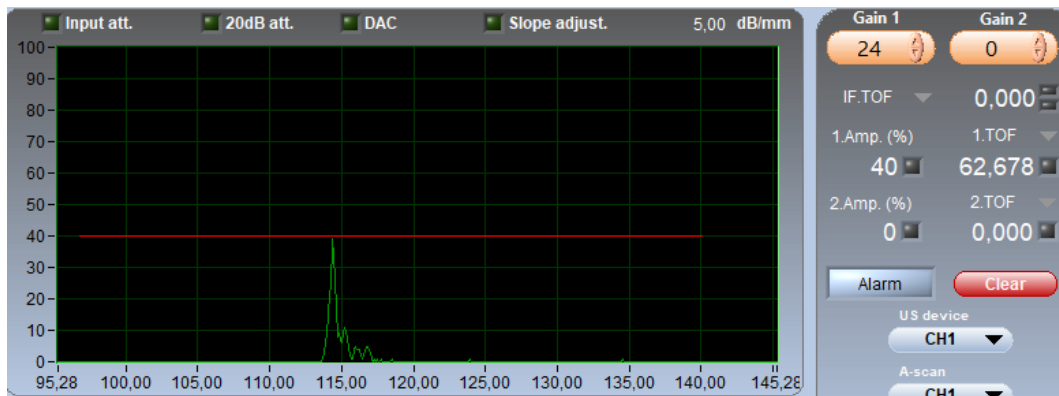


Obrázek 55: UT imerzní průchodová: C-scan

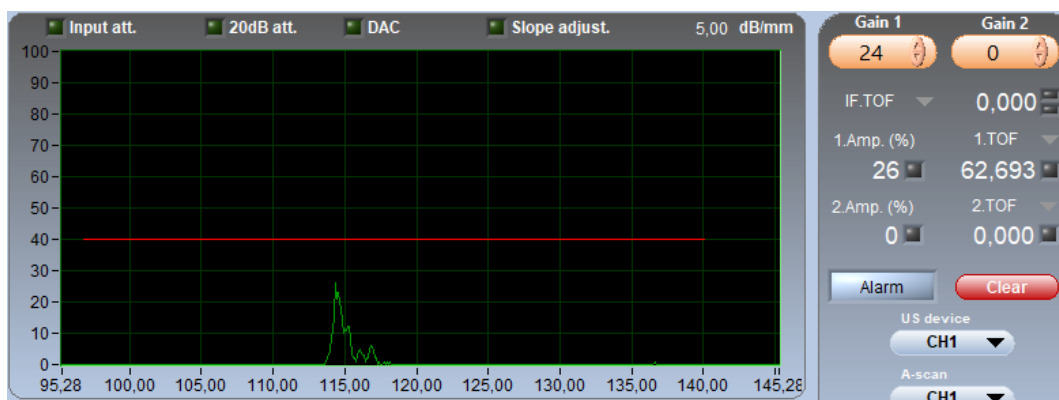
Referenční A-scan ukazuje výšku přijatého echa v místě bez vady (viz Obrázek 56). V místech s vadou tedy pozorujeme utlumení tohoto echa. Lze vidět, že čím byla větší tloušťka materiálu, tím více výška přijatého echa klesala. Největší echo u vad bylo pro prostorovou vadu v podobě aluminiové kuličky o průměru 3 mm (viz Obrázek 57), menší pro kuličku o průměru 5 mm (viz Obrázek 58) a v místě otisku nástroje byla pozorována úplná ztráta přijatého echa (viz Obrázek 59). Tato ztráta byla pozorována také v místě kontaminace krycí fólie, přestože tloušťka v daném místě byla stejná jako v případě referenčního A-scanu. Došlo tedy k utlumení ultrazvukového vlnění materiálem fólie (viz Obrázek 60).



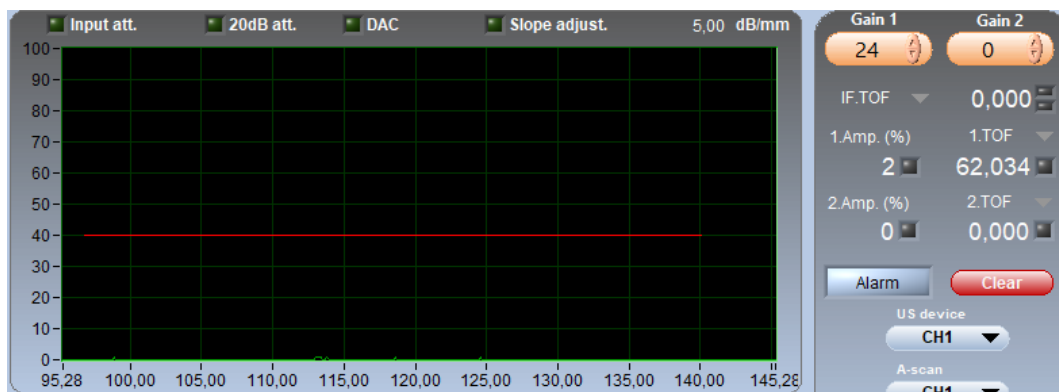
Obrázek 56: UT imerzní průchodová: A-scan: Oblast bez vady



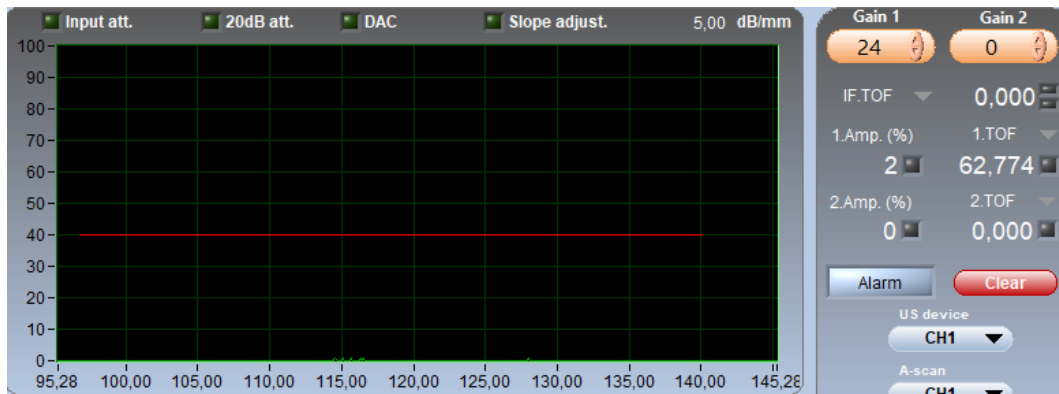
Obrázek 57: UT imersní průchodová: A-scan: Kontaminace aluminiovou kuličkou ($d=3$ mm)



Obrázek 58: UT imersní průchodová: A-scan: Kontaminace aluminiovou kuličkou ($d=5$ mm)



Obrázek 59: UT imersní průchodová: A-scan: Otisk nástroje



Obrázek 60: UT imersní průchodová: A-scan: Kontaminace krycí fólii

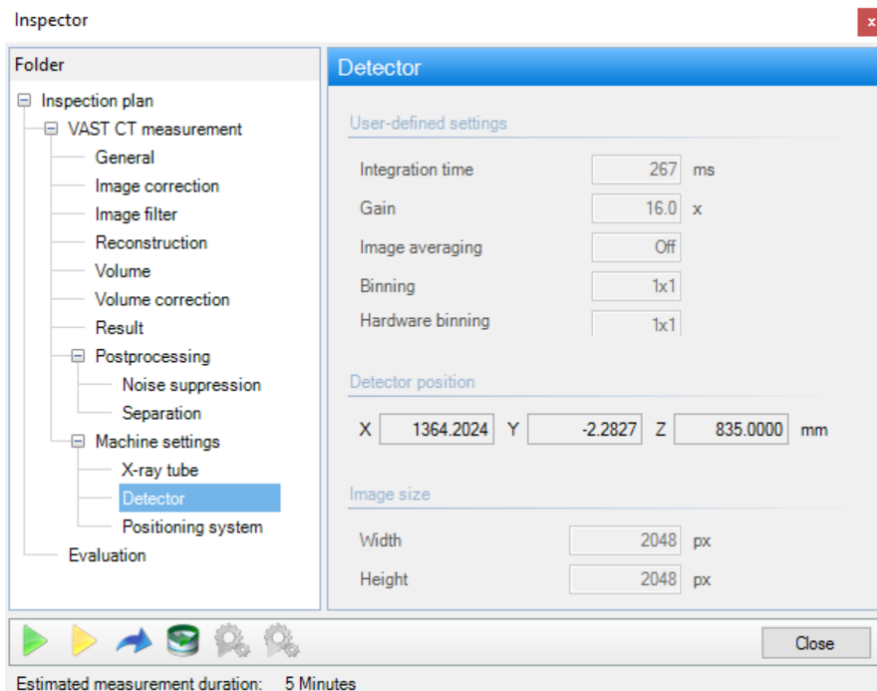
6.4 Počítačová tomografie

Pro porovnání odhalitelnosti vnitřních vad byl vzorek zaslán na proskenování metodou počítačové tomografie, kde byl skenován pomocí tomografu ZEISS METROTOM 1500. Tato metoda spočívala v umístění desky do polystyrenového stojanu a umístění na otočný stůl tomografu. Díky otáčení bylo možné vytvořit z nasnímaných dílčích snímků 3D obraz (viz Obrázek 62).

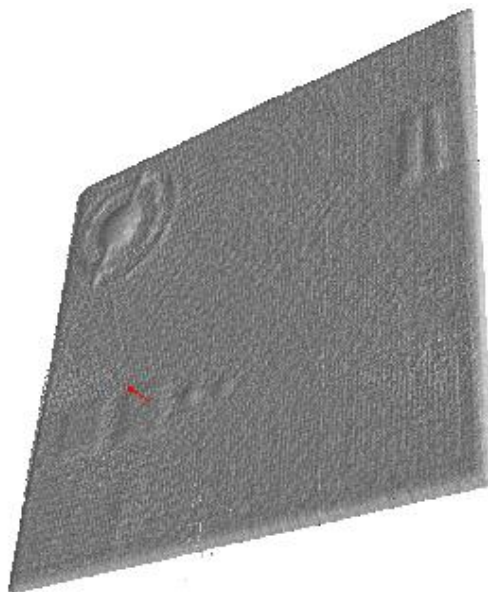
Následně bylo potřeba nastavit parametry měření, mezi které patřilo napětí rentgenové trubice nebo integrační čas, tedy doba expozice záření na pořízení jednoho dílčího snímku. Parametry měření ukazuje Tabulka 4 a ukázkou programu nastavení tomografu Obrázek 61.

Napětí rentgenové trubice	200 kV
Proud rentgenové trubice	2500 μ A
Integrační čas	267 ms
Zesílení	16x
Rozlišení detektoru	2048x2048 px
Počet snímků	850

Tabulka 4: Parametry zkoušení metodu CT



Obrázek 61: Ukázka nastavení parametrů tomografu ZEISS METROTOM 1500

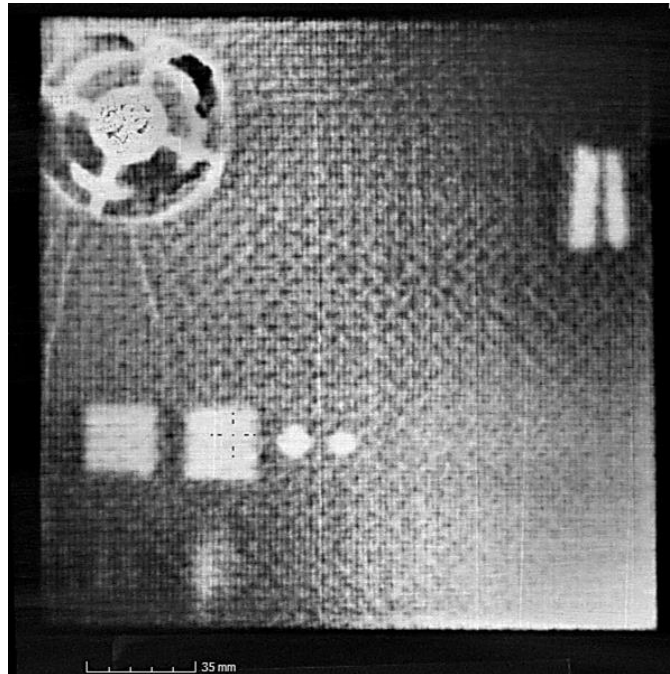


Obrázek 62: Metoda CT: 3D-scan vzorku

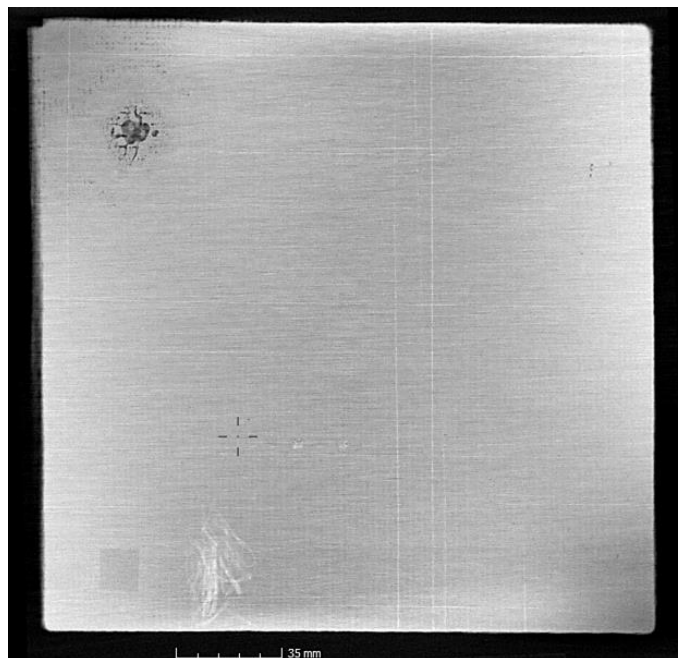
Na výsledku jsou velmi dobře patrné oblasti, kde je výrazná změna tloušťky materiálu. Lze velmi dobře vidět, že s větší tloušťkou proniklo materiálem menší množství záření a oblasti se jeví jako bílé (viz Obrázek 63). Na snímku jsou tak viditelné vady odhalené v předchozích metodách – otisk nástroje, překryv vrstev a vrásky. Oproti UT je vidět oblast, kde je kontaminace v podobě vláken. Naopak nelze v pohledu shora rozpoznat polyethylenovou fólii, v rovině implementovaných vad ji lze rozeznat jen obtížně (viz Obrázek 64). Vady z aluminiové fólie



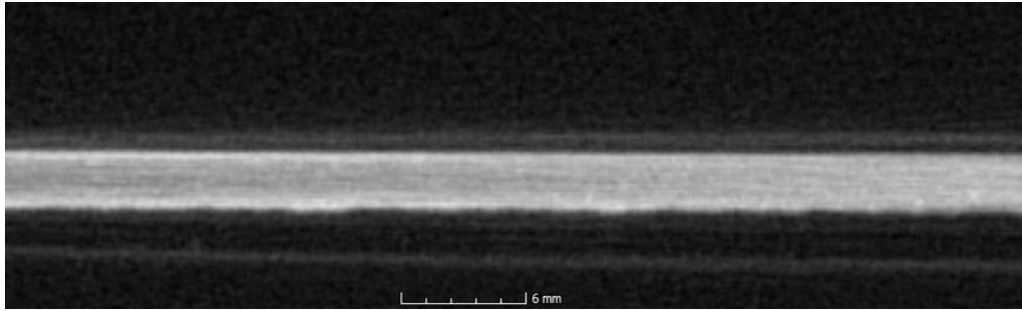
nejsou viditelné (viz Obrázek 65). Příčinou byla malá tloušťka vad a záření fóliemi prošlo téměř beze změny.



Obrázek 63: Metoda CT: Pohled shora

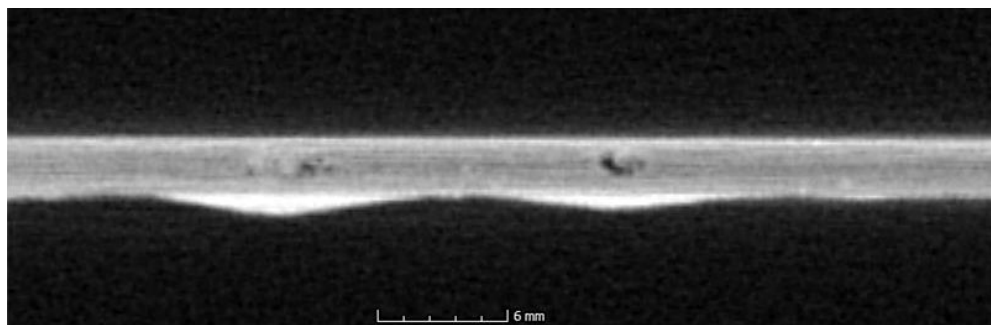


Obrázek 64: Metoda CT: Pohled shora v rovině mezi vrstvou č.4 a 5

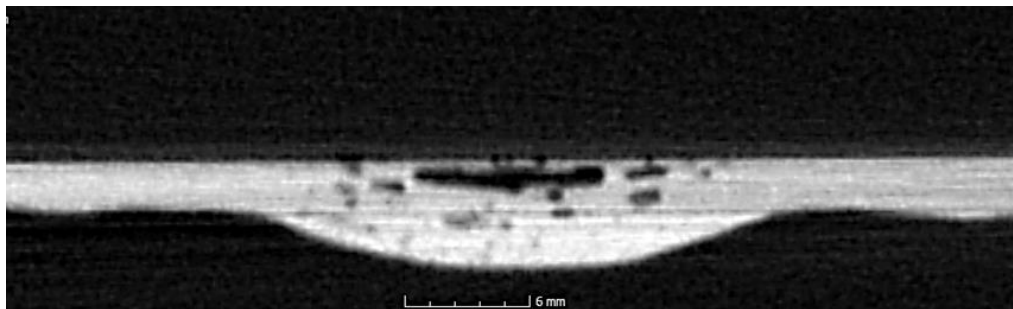


Obrázek 65: Metoda CT: Čelní pohled oblasti výskytu plošných vad v podobě kontaminace aluminiovou fólií

U objemových vad v podobě kuliček z aluminiové fólie lze vidět, že v nich zůstaly vzduchové bubliny, tudíž došlo k průchodu většího množství záření v těchto oblastech a na snímku se projeví tmavými poli (viz Obrázek 66). V případě otisku nástroje lze vidět, že oblast obsahuje velké množství dutin, které vznikly v důsledku odtržení vrstev vývěvou od sebe (viz Obrázek 67).



Obrázek 66: Metoda CT: Objemové vady v podobě aluminiové fólie – vzduchové bubliny



Obrázek 67: Metoda CT: Čelní pohled v oblasti otisku nástroje - dutiny



Závěr

V bakalářské práci dle jejího zadání byla rozebrána problematika rozdělení kompozitních materiálů a jejich možné výroby. Byla provedena rešerše vad vyskytujících se v tomto typu materiálů a způsoby jejich identifikace.

V praktické části byla autoklávovou technologií zhotovena destička z vrstev prepregu. Mezi vrstvy byly uměle vloženy vady, které byly následně ověřovány zvolenými NDT metodami.

Vady byly zvoleny s ohledem na defekty, které se mohou objevit během technologického procesu. Ve vzorku byl uměle vytvořen nadměrný překryv vrstev a vrásy. Dále byl záměrně chybně umístěn odsávací ventil vývěvy a na vzorku tak vznikla simulace vady v podobě otisku nástroje. Porozitu simulovalo záměrné navlhčení prepregu při výrobě. Cílem aplikace těchto vad bylo zjistit, jak zvolené NDT metody detekují tyto vady. Do vzorku byla rovněž uměle vnesena kontaminace aluminiovou fólií v podobě plošných i prostorových vad. Plošné vady o různých velikostech z aluminiové fólie byly zvoleny s cílem zjistit citlivost NDT metod na vadu určité velikosti. Za účelem zjištění, jak je daná metoda citlivá s rostoucí hloubkou vady od povrchu, byly umístěny mezi různé vrstvy plošné vady tvarů čtverců se shodnými rozměry. Čtverce byly rovněž zhotoveny z aluminové fólie. Plošné vady z aluminové fólie, tkaniny a polyethylenové fólie, které měly shodné rozměry, byly zvoleny s cílem zjistit citlivost NDT metody na různé materiály.

Pro identifikaci vad byla zvolena metoda vizuální, ultrazvuková imersní průchodová, ultrazvuková imersní odrazová a metoda počítačové tomografie. V případě ultrazvukových metod byly vyhotoveny C-scany vzorku a v místech vad také A-scany. Výstupem z počítačové tomografie byl 3D model vzorku a rentgenové snímky vzorku.

Volba NDT metod předpokládala, že otisk nástroje bude odhalen vizuální metodou a všechny ostatní vady budou odhaleny ostatními zvolenými metodami. Vizuální metoda odhalila vadu v podobě otisku nástroje. Metoda však neočekávaně odhalila vady v podobě vrás, nadměrného překryvu vrstev a prostorové vady z aluminiové fólie. Ultrazvukové metody kromě těchto vad, u nichž metody fungovaly na principu tloušťkoměru, odhalily dále vadu z polyethylenové fólie, ultrazvuková imersní odrazová metoda odhalila nezřetelně také tkaninu. Všechny uvedené vady odhalila rovněž počítačová tomografie. Oproti ultrazvukové metodě byla lépe odhalena tkanina, polyethylenová fólie byla naopak na snímku z tomografu obtížněji rozpoznatelná. Vady z aluminiové fólie a porozita nebyly odhaleny žádnou metodou.



Příčinou neodhalení aluminiové fólie ultrazvukovou metodou byl zvolený materiál vady. Hliník má řádově nižší útlum ultrazvukového vlnění oproti polymerům a kompozitním materiálům. Při nastavení sondy na měření kompozitních materiálů s polymerní matricí v kombinaci s malou tloušťkou aluminiové fólie tedy prošlo ultrazvukové vlnění místem vady se zanedbatelným útlumem. Lze proto říci, že ultrazvuková metoda je vhodná pro odhalování kontaminací v podobě plošných vad z materiálů, jejichž koeficient útlumu je řádově stejný nebo vyšší, než je koeficient základního materiálu a pro který se nastavuje zkušební zařízení. Naopak je nutné zamezit při výrobě vměstkům z materiálů, které v porovnání se základním materiálem ultrazvukové vlnění výrazně nezeslabují. U ultrazvukové metody je dále třeba říci, že vyhodnocení součásti značně ztížil drsný povrch součásti. Vyráběné součásti by měly mít, pokud možno, co nejhladší povrch, aby došlo k minimalizaci času prozkoušení a spolehlivému odhalení vad.

Příčinou neodhalení aluminiové fólie a velmi obtížného rozeznání polyethylenové fólie metodou CT byla především malá tloušťka vad a průchod rentgenového záření nebyl příliš ovlivněn. Metoda počítačové tomografie je proto pro odhalování kontaminací v podobě plošných vad méně vhodná.

Porozita způsobená navlhčeným prepregem odhalena nebyla. Vypařená voda s vysokou pravděpodobností unikla ven ze vzorku a defekt nevznikl. Příčinou mohla být malá tloušťka vzorku. Při zvolení větší tloušťky vzorku by pára mohla zůstat zachycena ve vzorku.

Na vzorku bylo zjištěno několik neúmyslně vytvořených vad. Vizualní metodou bylo zjištěno poškození povrchu poškrábáním, které vzniklo při manipulaci se vzorkem. Dále byly zjištěny nepravidelné okraje vzorku. Příčinou bylo nepřesné vrstvení prepregu. Pod otiskem ventilu byl vizualní metodou odhalen necelistvý povrch jako důsledek umístění ventilu vývěvy, která zčásti odtrhla vrstvy od podkladu. Ve vzorku byla odhalena porozita v podobě ojedinělých vzduchových bublin.

Práce nabízí podnět pro zkoumání vzorku dalšími NDT metodami, jako je např. termografie nebo metoda vířivých proudů. Dále otevírá prostor pro zkoumání parametrů měření vzorku ultrazvukovými metodami a metodou počítačové tomografie. Práce zároveň nabízí optimalizaci procesu výroby zkušebních vzorků. Tímto bych doporučila podnět pro další výzkum, kde by mohl být vyroben primární vzorek s dostatečně identifikovatelnými vadami v podobě kontaminace z různých materiálů vznikajících při výrobě či opravách kompozitních materiálů. Výzkum by usnadnil identifikaci materiálů, které jsou snáze zjištělné konkrétní metodou. Po



této identifikaci „materiál/metoda“ by bylo možné výzkum rozpracovat v detailní podobě pro každou „metodu/materiál“, kde se mohou zkoumat minimální rozměry defektů za účelem jejich odhalení.



Bibliografie

- [1] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity: Definice a úvod, Matrice, Vlákná, Lamináty [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>.
- [2] Composite materials. In: <https://constructionor.com/> [online]. [cit. 2022-07-16]. Dostupné z: <https://constructionor.com/composite-materials/>.
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] KAHLA, Hiba Ben. Micro-cracking and delaminations of composite laminates under tensile quasi-static and cyclic loading [online]. Luleå, Sweden, 2019 [cit. 2022-07-16]., Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1303134/FULLTEXT01.pdf>. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology.
- [5] IRVING, Philip a Constantinos SOUTIS. Polymer Composites in the Aerospace Industry. Second edition. Elsevier, 2020. ISBN 978-0-08-102679-3. pp. 59-85, 88-101, 457-486.
- [6] Composites Market [online]. In: . November, 2020 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://www.fortunebusinessinsights.com/composites-market-102295>.
- [7] „Technologie kompozitů [online]. [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%A5.pdf>“ [Online].
- [8] HESLEHURST, Rikard Benton. Defects and Damage in Composite Materials and Structures [online]. CRC Press, 2014 [cit. 2021-12-08]. ISBN 13: 978-1-4665-8048-0., Dostupné z: https://structures.dhu.edu.cn/_upload/article/files/f6/62/f5c6159f4c86ae7a86fbd6b48811/de2f3e84-c3f9-42d4-833d-21279796173a.pdf.
- [9] ČAPKA, Alexander. Defektoskopie kompozitních konstrukcí dopravních prostředků [online]. 2019 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/337597381_DEFJEKTOSKOPIE_KOMPOZITNICH_KONSTRUKCI_DOPRAVNICH_PROSTREDKU.



- [10] KARDYS, Gary. Automotive composites, part 3: Quality, inspection and standards [online]. 2019 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://insights.globalspec.com/article/10994/automotive-composites-part-3-quality-inspection-and-standards>.
- [11] YOUNGIN, Kim a Cho JEONGHO. Surface Erosion Analysis for Thermal Insulation Materials of Graphite and Carbon–Carbon Composite [online]. 2019 [cit. 2021-12-18]., Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3323/html>.
- [12] PATNAIK, Amar et al. Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review [online]. 2009 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/223634558_Solid_particle_erosion_wear.
- [13] JANDURA, Václav a kolektiv. NDT Nedestruktivní zkoušení základní kurz. Praha: ATG Advanced Technology Group, 2020. pp. 70-109, 152-193, 194-221, 222-225, 236-237.
- [14] Fotometrické veličiny. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>.
- [15] Reflection [online]. [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: https://connect.collins.co.uk/repo1/Content/Live/JI/Leckie/AQA-GCSE-Physics-SB-Free-Site-13-Jan-V1/Contents/58774_gcse_physics_ch2_p22_2.html.
- [16] KUDĚLKA, Vladimír, Pavla NEJETKOVÁ a Jan OPLETAL. Instrukce pro provádění vizuální i rozměrové kontroly svarových spojů dle požadavků ČSN EN ISO 17637 [online]. 2.5.2019 [cit. 2022-03-05]., <https://www.technicka-zarizeni.cz/instrukce-pro-provadeni-vizualni-i-rozmerove-kontroly-svarovych-spoju-dle-pozadavku-csn-en-iso-17637/>.
- [17] Nedestruktivní zkoušky v SKF [online]. 2017 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://evolution.skf.com/cs/nedestruktivni-zkousky-v-skf/>.
- [18] KENASTON, Betsy. Snadné plachtění s defektoskopem pro opravy a prohlížení jachet. [online]. 2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/insight/smooth-sailing-with-a-flaw-detector-for-yacht-repair-and-surveys/>.
- [19] LÁNÍK, Jaromír a Tereza KOMÁRKOVÁ. Ultrazvuk jako možný nástroj inspekce ocelových prvků stavebních konstrukcí [online]. 26.3.2018 [cit. 2022-04-02]., Dostupné



- z: <https://stavba.tzb-info.cz/hruba-stavba/17138-ultrazvuk-jako-mozny-nastroj-inspekce-ocelovych-prvku-stavebnich-konstrukci>.
- [20] DAŘOUREK, Karel. Tepelná technika: Teorie tepelného zpracování [online]. 2007 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ/ttz%20Dad/teptech.pdf.
- [21] ČSN EN ISO 7345. Tepelné chování budov a stavebních dílců - Fyzikální veličiny a definice. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [22] HOFER, Peter. Výpočet tepelného odporu a součinitele prostupu tepla [online]. 2016 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.zdrave-bydleni.com/vypocet-tepelneho-odporu-a-soucinitele-prostupu-tepla/>.
- [23] Aktivní termografie jako metoda NDT [online]. [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/aktivni-termografie-jako-metoda-ndt-nedestruktivniho-testovani/>.
- [24] BLAHUTA, Ladislav. Nedestruktivní zkoušky svarů [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4239492-Nedestruktivni-zkousky-svaru.html>. pp. 4-8.
- [25] ČSN IEC 61584 (356657). Přístroje pro ochranu před zářením - Instalovaná, přenosná nebo transportní zařízení - Měření směru záření a kermového příkonu ve vzduchu. 03/2003.
- [26] KOZLOVSKÁ, Michaela a Petr OTÁHAL. Zeslabení pronikavého ionizujícího záření v nově vyvíjených materiálech stínících vrstev pro ochranné oděvy. Kamenná, 2018. ISBN ISBN-978-80-270-4825-6. pp. 2-3.
- [27] Ozáření z přírodních zdrojů záření. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/prirodni-zdroje-ionizujiciho-zareni/ozareni-z-prirodnich-zdroju-zareni>.
- [28] Přenosný rentgenový přístroj [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: https://papco.cz/wp-content/uploads/2018/12/soubor1_34.pdf.
- [29] ULLMANN, Vojtěch. Detekce a spektrometrická analýza fotonového a korpuskulárního záření pro výzkum, technologické aplikace a medicínu [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#4>.



- [30] ULLMANN, Vojtěch. Aplikace ionizujícího záření: Jaderné a radiační metody [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadMetody.htm#2>.
- [31] POMAREDE, Pascal a kol. Damage Evaluation in Woven Glass Reinforced Polyamide 6.6/6 Composites Using Ultrasound Phase-Shift Analysis and X-ray Tomography [online]. 2018 [cit. 2022-07-05]., 322948056_Damage_Evaluation_in_Woven_Glass_Reinforced_Polyamide_666_Composites_Using_Ultrasound_Phase.
- [32] CHENG, Jun, Jinhao QIU, Xiaojuan XU, Hongli JI, Toshiyuki TAKAGI a Tetsuya UCHIMOTO. Research advances in eddy current testing for maintenance of carbon fiber reinforced plastic composites [online]. July 2016, 25 [cit. 2022-04-05]., Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305274023_Research_advances_in_eddy_current_testing_for_maintenance_of_carbon_fiber_reinforced_plastic_composites.
- [33] HALAMA, Radim a kol. Vlastnosti a zkoušení materiálů: Zbytková napětí a defektoskopie [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2022-04-05]., Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2010.pdf.
- [34] KANJI, Ono. A Comprehensive Report on Ultrasonic Attenuation of Engineering Materials, Including Metals, Ceramics, Polymers, Fiber-Reinforced Composites, Wood, and Rocks [online]. Los Angeles,, 2020 [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/340169155_A_Comprehensive_Report_on_Ultrasonic_Attenuation_of_Engineering_Materials_Including_Metals_Ceramics_Polymers_Fiber-Reinforced_Composites_Wood_and_Rocks: Department of Materials Science and Engineering, University of California, Los Angeles (UCLA). Pp 27,37,40.



Seznam obrázků

Obrázek 1: Druhy výztuže kompozitních materiálů [2]	13
Obrázek 2: Laminát z tkanin (vlevo) a z vrstev s jednosměrným uložením vláken pod úhly 45°/0°/-45°/90° (vpravo) [4].....	13
Obrázek 3: Podíl zastoupení jednotlivých odvětví v celkové produkci kompozitních materiálů v roce 2019 [6].....	17
Obrázek 4: Výroba jednosměrného prepregu [3]	19
Obrázek 5: Technologie ručního kladení [7].....	20
Obrázek 6: Technologie stříkání [3].....	21
Obrázek 7: Lisování pomocí vakua [7]	22
Obrázek 8: Schéma rozdělení vad kompozitních konstrukcí dle velikosti a životního cyklu součásti [9].....	24
Obrázek 9: Různé druhy vad kompozitních materiálů (zleva: přerušená vlákna, delaminace, odlepení vrstvy, prasklina matrice, zvrásnění, místo bohaté na pryskyřici, kontaminace cizím objektem, dutina, puchýř a porozita) [10]	24
Obrázek 10: Vady vláken: naseknutý svazek vláken (vlevo), zauzlení svazku vláken (vpravo) [8]	25
Obrázek 11: Dutina v kompozitu [5].....	27
Obrázek 12: Druhy různých prasklin a trhlin vrstev: translaminární trhlina (vlevo), prasklina v matrici vedoucí k delaminaci (vpravo) [8]	28
Obrázek 13: POD křivky tří metod A,B a C [5].....	31
Obrázek 14:Odraz světla na lesklé ploše (vlevo) a drsné ploše (vpravo) [15].....	33
Obrázek 15: Princip ultrazvukového zkoušení [17]	36
Obrázek 16: Defektoskop [18]	39
Obrázek 17: Průchodová metoda [8].....	40
Obrázek 18: Pulzní metoda [8].....	40
Obrázek 19: Prostup tepla součástí s vadou (vlevo), vyzařování tepelné energie součástí s vadou (vpravo) [23].....	42
Obrázek 20: Systém zařízení pro zkoušení aktivní termografií [23].....	43
Obrázek 21: Vlevo - teplotní 3D matice; vpravo - teplotní profil určitého místa bez defektu [23]	43



Obrázek 22: Rentgenová lampa: princip vzniku záření (vlevo) [24], technické provedení (vpravo) [28].....	45
Obrázek 23:Princip digitální radiografie: vlevo -nepřímá konverze, vpravo – přímá konverze [30]	46
Obrázek 24: Princip popčítačové tomografie [31]	46
Obrázek 25: Princip ET [32]	47
Obrázek 26:Vliv vady na tok proudu v materiálu [33].....	47
Obrázek 27: Uložení vláken v laminátu (vlevo) a znázornění smyček s kontaktními body (vpravo) [32].....	48
Obrázek 28: Proces přípravy tvaru vzorků nakreslení rozměrů a nastříhání role prepregu	49
Obrázek 29: Jednotlivé vystřižené vrstvy.....	49
Obrázek 30: Nanášení gelcoatu	50
Obrázek 31:Umístění vrstev na formu.....	50
Obrázek 32: Umístění strhávací fólie na vzorek	51
Obrázek 33: Perforovaná separační fólie.....	51
Obrázek 34: Umístění odsávací rohože na vzorek	51
Obrázek 35:Vytváření otvoru v místě závitového otvoru části ventilu umístěné ve vakuovací fólii	52
Obrázek 36: Evakuace vzorku.....	52
Obrázek 37: Vady umístěné mezi vrstvou č. 4 a 5	54
Obrázek 38: Schéma rozmístění vad ve vzorku v pohledu shora.....	55
Obrázek 39: Nepravidelný roh vzorku při nedůsledném pokládání vrstev	56
Obrázek 40: Poškrábání povrchu v důsledku manipulace se vzorkem	56
Obrázek 41:Vytržení vláken pod otiskem ventilu	57
Obrázek 42: Vyznačení vad vystupujících na povrch 1 – otisk nástroje, 2 – nadměrný překryv vrstev, 3 – kontaminace aluminiovou fólií v podobě prostorových vad, 4 – vrásky.....	57
Obrázek 43: Upevněný vzorek v ocelové konstrukci v bazénu.....	58
Obrázek 44: Montáž sondy do úchopného zařízení.....	58
Obrázek 45: UT imersní odrazová: C-sken: Část 1(svrchní část)	60
Obrázek 46: UT imersní odrazová: C-sken: Část 2 (spodní část)	60
Obrázek 47: UT imersní odrazová: A-scan: Oblast bez vady	61
Obrázek 48: UT imersní odrazová: A-scan: Kontaminace krycí fólií.....	61



Obrázek 49: UT imersní odrazová: A-scan: Kontaminace tkaninou.....	62
Obrázek 50: UT imersní odrazová: A-scan: Kontaminace aluminiovou fólií (vada objemová, průměr 3 mm).....	62
Obrázek 51: UT imersní odrazová: A-scan: Otisk nástroje.....	62
Obrázek 52: UT imersní odrazová: A-scan: Nadměrný překryv vrstev.....	63
Obrázek 53: UT imersní odrazová: A-scan: Zvrásnění.....	63
Obrázek 54: Dvojice sond pro UT metodu imerzní průchodovou v úchopném zařízení.....	63
Obrázek 55: UT imerzní průchodová: C-scan.....	65
Obrázek 56: UT imersní průchodová: A-scan: Oblast bez vady.....	65
Obrázek 57: UT imersní průchodová: A-scan: Kontaminace aluminiovou kuličkou (d=3 mm).....	66
Obrázek 58: UT imersní průchodová: A-scan: Kontaminace aluminiovou kuličkou (d=5 mm).....	66
Obrázek 59: UT imersní průchodová: A-scan: Otisk nástroje.....	66
Obrázek 60: UT imersní průchodová: A-scan: Kontaminace krycí fólií.....	67
Obrázek 61: Ukázka nastavení parametrů tomografu ZEISS METROTOM 1500.....	68
Obrázek 62: Metoda CT: 3D-scan vzorku.....	68
Obrázek 63: Metoda CT: Pohled shora.....	69
Obrázek 64: Metoda CT: Pohled shora v rovině mezi vrstvou č.4 a 5.....	69
Obrázek 65: Metoda CT: Čelní pohled oblasti výskytu plošných vad v podobě kontaminace aluminiovou fólií.....	70
Obrázek 66: Metoda CT: Objemové vady v podobě aluminiové fólie – vzduchové bubliny..	70
Obrázek 67: Metoda CT: Čelní pohled v oblasti otisku nástroje - dutiny.....	70



Seznam tabulek

Tabulka 1: Receptura pro vytvrzení vzorku	53
Tabulka 2: Parametry zkoušení UT imersní metodou odrazovou	59
Tabulka 3: Parametry zkoušení UT imersní metodu průchodovou.....	64
Tabulka 4: Parametry zkoušení metodu CT	67



Seznam rovnic

- (1) Rovnice svítivosti
- (2) Rovnice intenzity osvětlení
- (3) Rovnice světelného toku
- (4) Rovnice vlnové délky
- (5) Rovnice útlumu ultrazvukového signálu
- (6) Fourierův zákon
- (7) Rovnice útlumu intenzity záření
- (8) Rovnice dávkového příkonu
- (9) Rovnice subjektivního kontrastu