

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

Huu Petr

Pham

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pham** Jméno: **Huu Petr** Osobní číslo: **470023**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální ověření ultrazukových systémů pro nedestruktivní zkoušení

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental evaluation of ultrasound systems for NDT

Pokyny pro vypracování:

Problematiky ultrazukového zkoušení materiálů.
Současný stav experimentálních zařízení v oblasti ultrazukového zkoušení
Porovnání ultrazukového zkoušení s dalšími metodami NDT.
Navrhnout a experimentálně ověřit zařízení pro imerzní a ostřikové ultrazukové zkoušení kompozitových dílů.

Seznam doporučené literatury:

1. Regazzo, R., Regazzová, M.: Ultrazuk: základy ultrazukové defektoskopie. Senzory neelektrických veličin. BEN ? technická literatura, 2013, Praha, 6 díl., 1. vyd.
2. Helfen, T.B., Venkat, R. S., Rabe, U.: Characterisation of CFRP Through Enhanced Ultrasonic Testing Methods. ProQuest Technology Collection, Applied Composite Materials, Springer Netherlands, 19,6.
3. Armitrage, P.R., Wright, C.D., Design, development and testing of multi-functional non-linear ultrasonic instrumentation for the detection of defects and damage in CFRP materials and structures. Composite Science and Technology, Elsevier B.V., 87, 10/2013
4. Firemní příručky a prospekty

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

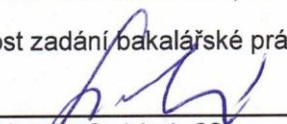
prof. Ing. Jan Suchánek, CSc., ústav strojírenské technologie FS

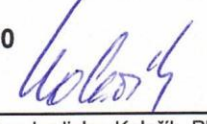
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

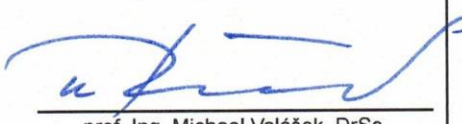
Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**


prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce



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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen 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.

23.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním defektoskopických metod vhodných pro zkoušení kompozitních materiálů. V rešeršní části jsou popsány kompozitní materiály s polymerní matricí, vady vznikající při výrobě a provozu a s nimi spojené způsoby namáhání. Dále uvádí defektoskopické metody použitelné pro polymerní kompozity. V experimentální části je porovnávána ultrazuková metoda prováděná v imerzi impulzně odrazovou technikou s metodou prozářením technikou digitální radiografie. Na základě porovnání výsledků zkoušek je zvolena vhodnější metoda.

Klíčová slova:

Ultrazvuk, defektoskopie, kompozitní materiály, NDT

Abstrakt

This bachelor thesis deals with the comparison of non-destructive testing methods applicable for composite materials. The research part describes polymer matrix composites, manufacturing and in-service defects and types of load. Furthermore it describes non-destructive testing methods suitable for it. The experimental contains comparison of pulse-echo ultrasonic method in immersion and radiographic testing using digital detector array. More suitable method will be suggested based on comparison of results.

Key words:

Ultrasound, defectoscopy, composite materials, NDT



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Experimentální ověření ultrazvukových systémů pro nedestruktivní zkoušení** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že 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

.....



Poděkování

Děkuji panu prof. Ing. Janu Suchánkovi, CSc. za odborné vedení, rady a trpělivý přístup při zpracování této bakalářské práce. Dále děkuji společnosti ATG s.r.o. za umožnění a uskutečnění experimentu.

Také děkuji kolegyni Ing. Šárce Ječmínkové za pomoc a cenné rady při zpracování zadaného tématu.



Obsah

Úvod	9
ŘEŠERŠNÍ ČÁST	10
1 Úvod do kompozitních materiálů	10
1.1 Charakteristika	10
1.1 Rozdělení kompozitů	10
1.2 Popis výztuže	11
1.3 Popis matrice	12
1.4 Polymerní matrice	12
1.5 Kompozity s polymerní matricí vyztužené vlákny	13
1.6 Kompozity s polymerní matricí vyztužené částicemi	16
2 Výrobní vady a jejich prevence	17
2.1 Póry	17
2.2 Necelistvosti v lepeném spoji	18
2.3 Zbytkové napětí	19
2.4 Lom vláken	19
3 Provozní vady	20
3.1 Druhy mechanismů poruch	20
3.2 Mechanické namáhání kompozitů	21
3.2.1 Náraz	21
3.2.2 Tah	22
3.2.3 Tlak	22
3.2.4 Smyk	23
4 Úvod do defektoskopie	24
4.1 Vizuální metoda	25



4.1.1	Vizuální kontrola přímá	25
4.1.2	Vizuální kontrola nepřímá	26
4.2	Ultrazvuková metoda	27
4.2.1	Fyzikální princip	27
4.2.2	Základní druhy ultrazvukových vln	28
4.2.3	Útlum ultrazvuku	31
4.2.4	Absorpce	31
4.2.5	Rozptyl	31
4.2.6	Způsoby prozvučování	32
4.2.7	Akustická vazba	33
4.2.8	Přechodové ztráty	35
4.2.9	Způsoby zobrazení	36
4.2.10	Ultrazvukové zařízení a vybavení	38
	38
4.2.11	Typy sond pro ultrazvukové zkoušení	39
4.3	Kapilární metoda	42
4.4	Metoda prozářením	43
4.4.1	Zdroje záření:	44
4.4.2	Filmová radiografie	44
4.4.3	Počítačová radiografie	45
4.4.4	Digitální radiografie	46
4.4.5	Doporučené techniky snímkování	46
	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	50
5	Cíle experimentální části	50
5.1	Schéma vad vzorku	50



5.2	Použité defektoskopické metody	51
5.3	Metoda prozáření.....	52
5.3.1	Použité zařízení	52
5.3.2	Digitální detektor (DDA).....	52
5.4	Postup skenování.....	56
5.5	Ultrazvuková metoda	60
5.5.1	Použité zařízení	60
5.5.2	Postup skenování	61
5.5.3	Výsledek prvního skenování.....	62
5.5.4	Výsledek druhého skenování	63
5.6	Vyhodnocení experimentu	64
	Závěr.....	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71



Úvod

Defektoskopické metody se uplatňují v průmyslové kusové i sériové výrobě. Společnosti se v dnešní době snaží zvyšovat požadavky na kvalitu, životnost a spolehlivost výrobků a zároveň se snaží být časově, energeticky a materiálově úspornější. Defektoskopické zkoušky jsou vhodným způsobem, jak vyhovět všem těmto požadavkům.

Cílem této bakalářské práce je porovnat různé defektoskopické metody použitelné pro kompozitní materiály. Rešeršní část uvádí popis kompozitních materiálů s polymerní matricí, způsoby namáhání a vady vznikající při výrobě a provozu. Dále popisuje nedestruktivní zkoušky, kterými je vhodné kompozitní materiály kontrolovat. Experimentální část se zabývá porovnáním metody prozářením technikou digitální radiografie a ultrazvukovou metodou pomocí impulzně odrazové techniky v imerzním prostředí. Vyhodnocení experimentu stanoví, jaká z vybraných metod je pro kompozitní materiály vhodnější, případně zdali je potřeba metody kombinovat.

Tato bakalářská práce byla vypracována ve spolupráci se společností ATG s.r.o.

ŘEŠERŠNÍ ČÁST

1 Úvod do kompozitních materiálů

1.1 Charakteristika

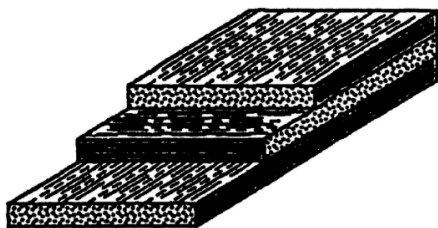
Kompozitními materiály se rozumí všechny pevné materiály, které se skládají z dvou a více složek o rozlišných vlastnostech. Tato definice zahrnuje širokou škálu materiálů používaných nejen ve strojírenství, například železobeton, keramické směsi, dřevěné lamináty. Tato práce se však zaměřuje na kompozitní materiály používané v letectví, které je vhodnější definovat jako: „Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrďší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá se matrice.“ citováno z [1]

1.1 Rozdělení kompozitů

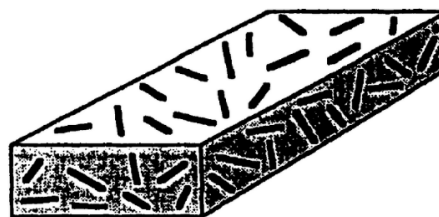
Kompozitní materiály jsou obvykle klasifikovány podle typu a tvaru použité výztuže. Rozdělit je lze do dvou velkých skupin:

a) kompozity vyztužené vlákny

- kontinuálními
- krátkými



Kontinuální vlákna

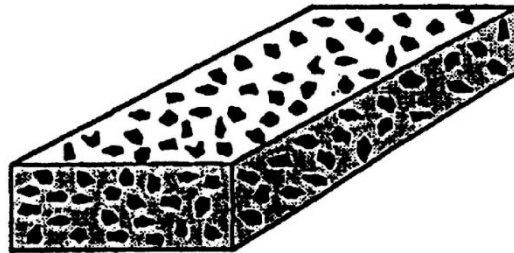


Krátká vlákna, whiskery

Obr. 1: Kompozit vyztužený vlákny (upraveno podle [2])

b) kompozity vyztužené částicemi

- sférickými
- destičkovými [1]



Částice

Obr. 2: Kompozit vyztužený částicemi (upraveno podle [2])

Dále mohou být rozděleny podle materiálu matrice:

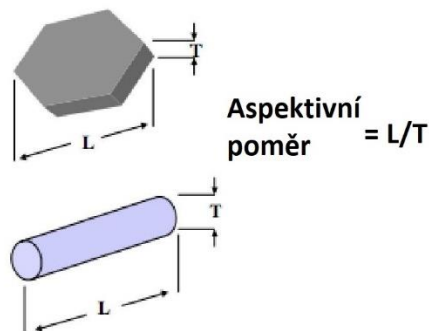
- polymerní
- uhlíková
- keramická
- kovová
- skleněná
- sklokeramická [1]

1.2 Popis výztuže

Pro kovové a keramické matrice není možno použít vlákna, které mají špatnou tepelnou a chemickou odolnost. Vlákna se rozdělují pro polymerní matrice (uhlíková, skleněná, polymerní) a vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická, kovová). [1]

Částice sférického tvaru nesmí být příliš velké, mohlo by pak dojít ke snížení pevnosti, avšak neměly by být ani velmi jemné, bylo by pak složité docílit rovnoměrného rozložení částic. Částice, které mají tvar jehliček, destiček a disků, se nazývají anizotropní částice. Pomocí těchto částic je možno dosáhnout větší pevnosti i výrazného zpevnění, nazývají se tzv. aktivní částice. Důležitou vlastností částic je poměr mezi jejich

maximálním a minimálním rozměrem, tuto informaci nám udává aspektivní neboli štíhlostní poměr. [1]



Obr. 3: Aspektivní poměr (upraveno podle [3])

1.3 Popis matrice

Matrice má za úkol držet výztuž kompozitu pohromadě a ochraňovat ji. Polymerní a kovové matrice jsou jediné, které mají mezní poměrné prodloužení při tahovém namáhání větší než mezní prodloužení vláken. Výroba kompozitů je velmi usnadněna, pokud je matrici možno roztavit. Technologii výroby kompozitu ovlivňují tyto vlastnosti: povrchová energie a viskozita roztavené matrice. Matrice by měla mít v kapalném stavu co nejmenší povrchovou energii, aby výztuž s vysokou povrchovou energií měla co nejlepší smáčivost. [1], [4]

1.4 Polymerní matrice

Polymerní matrice používané pro kompozitní materiály lze obecně popsat jako termoplastické nebo reaktoplastické materiály. Reaktoplasty jsou polymery pryskyřice, které po vytvrzení zesíťují a vytvářejí trojrozměrnou strukturu. Po vytvrzení je síťová struktura nevratná a nelze ji přetvořit ani změnit. Oproti tomu termoplasty, které se skládají z lineárních nebo rozvětvených molekul s vysokou molekulovou hmotností polymerního řetězce (nezesítěně), mohou být přetvořeny působením tepla



a tlaku. Existuje mnoho typů reaktoplastických a termoplastických materiálů, které se používají jako matrice v kompozitech vyztužených vlákny. Výběr materiálu matrice a typu vlákna závisí na fyzikálních a mechanických vlastnostech, které jsou vyžadovány pro navrženou součást. [1], [4]

Nejčastější typ kompozitu, se kterým se dnes setkáme, jsou kompozity s polymerní matricí vyztuženou vlákny. Pro letectví jsou vhodné zejména díky svým příznivým mechanickým vlastnostem, konkrétně poměrům modulu pružnosti k hustotě a pevnosti v tahu k hustotě. Další pozitivum kompozitů se skleněnými a polymerními vlákny je jejich dobrá chemická odolnost, odolnost proti půdní korozi, dielektrické vlastnosti a nevodivost. [1]

Nejpoužívanější jsou matrice reaktoplastové. Nejlepšími mechanickými vlastnostmi, vysokou teplotní a chemickou odolností disponují epoxidové pryskyřice. Do interiérů dopravních prostředků se používají laminační fenolformaldehydové pryskyřice, které nejsou hořlavé, a pokud jsou ohni vystaveny, tvoří jen malé množství toxických zplodin a kouře. [1]

Termoplastické matrice se často využívají v hromadné výrobě kvůli jejich nižší ceně. Na rozdíl od reaktoplastových matic termoplastické matrice není nutné vytvrdit, po vstříknutí do formy nebo po tvarování za tepla stačí matici ochladit pod teplotu tvarové stálosti za tepla, díky tomu mají kratší čas výroby. [1]

1.5 Kompozity s polymerní matricí vyztužené vlákny

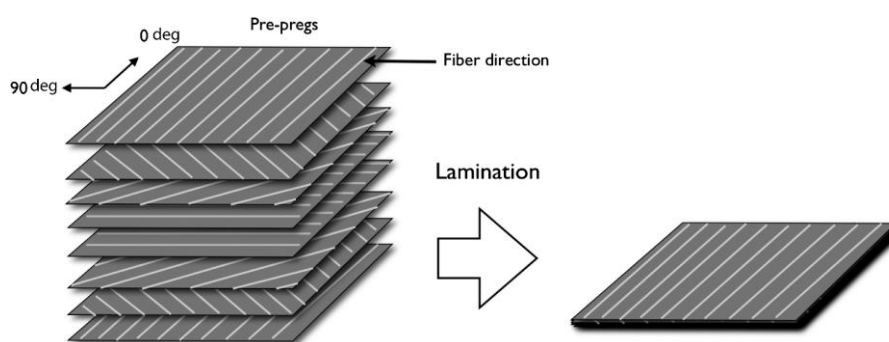
Druhy vláken pro kompozity:

- skleněná vlákna
- uhlíková vlákna
- polymerní vlákna

Vlákna v kompozitech mohou mít různou orientaci. Výztuž tvořená kontinuálními vlákny může být orientována jednosměrně, dvouose a osově nahodile. Krátká vlákna

a whiskery se v kompozitech mohou vyskytovat s nahodilým nebo přednostním uspořádáním. [1]

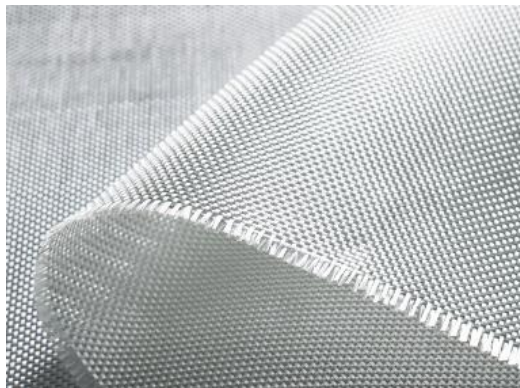
Požadovaná tloušťka kompozitu se docílí vrstvením tzv. elementárních vrstev, tvořených výztuží z kontinuálních vláken. Tímto procesem vzniká laminát, jehož vlastnosti určuje směr vláken v dílčích vrstvách. Téměř anizotropní, tzv. kvazi – izotropní laminát vzniká v případě, že jsou vlákna ve vrstvách směřována v jednom směru, až v případě skládání vrstev uvedeném na obr. 4.



Obr. 4: Skladba vrstev kvazi – izotropního laminátu (převzato z [5])

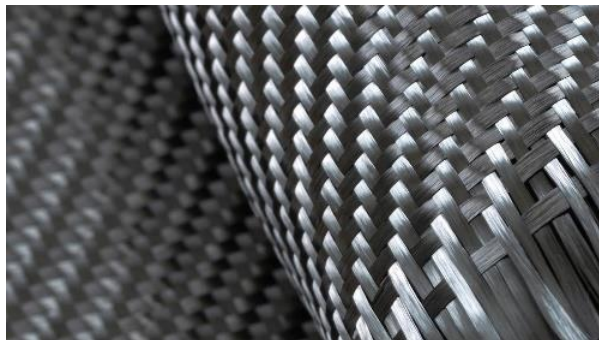
Zásadní výhodou vláknových kompozitů je fakt, že zhoršené mechanické vlastnosti jednotlivých vrstev neovlivňují výsledný laminát. Například pokud jsou vlákna i matrice náchylná ke křehkému lomu, výsledný kompozit může mít odolnost vůči křehkému lomu dobrou. Díky odlišnému průběhu šíření poruch nemusí i po větším počtu poškození matrice a vláken dojít ke katastrofickému lomu, na rozdíl od homogenního materiálu. Výsledný kompozit tvořený více složkami má lepší vlastnosti než složky jednotlivě. Jedná se o synergický efekt. Následující příklady vláken jsou vhodné pro výztuž polymerních matric. [1]

Skleněná vlákna jsou amorfní, nemají tedy pravidelnou krystalickou mřížku. Pevnost v tahu je významně podmíněna stavem povrchu. Při splétání vláken do pramenů nesmí docházet k vzájemnému poškozování a adsorpci vzdušné vlhkosti, pevnost čerstvě vytaženého vlákna by se snížila až o 50%. Aby se zabránilo jejich vzájemnému poškozování, je zásadní vlákna chránit povlakem dříve, než budou spletena do pramene. Vlákna kompozitů s epoxidovou matricí jsou chráněna povlakem speciální epoxidové pryskyřice. [1]



Obr. 5 Skleněná vlákna (převzato z [7])

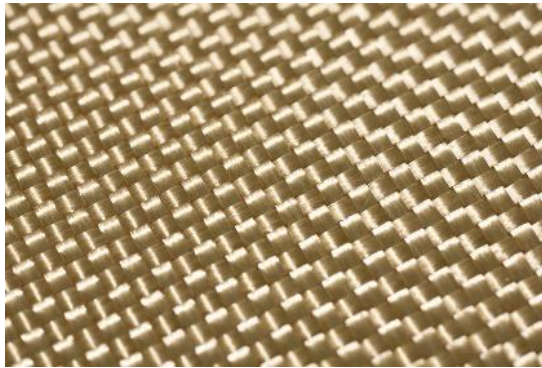
Uhlíková vlákna se používají pro komponenty letadel, satelity, rentgenové vybavení, automobilový průmysl a sportovní či rekreační vybavení. Na rozdíl od skleněných vláken jsou krystalická. Podobně jako u skleněných vláken je i uhlíková vlákna nutné chránit proti vzájemnému poškození při nadcházejícím zpracování povlakem speciálních epoxidových pryskyřic, nejčastěji elektrochemickou úpravou povrchu. Tento proces také zlepšuje soudržnost s polymerními matricemi. Jejich nevýhodou oproti vláknům skleněným je, že jsou křehčí. [1]



Obr. 6: Uhlíková vlákna (převzato z [8])

Polymerní vlákna jsou také krystalická. Díky svým mechanickým vlastnostem jsou pro kompozity nejvhodnější vlákna z aromatického polyamidu, tzv. aramidová vlákna. Nejznámější značky aramidů jsou Kevlar a Nomex. Kevlar 49 a Kevlar 29 jsou v současnosti nepoužívanějšími aramidovými vlákny. Aramidová vlákna se používají díky svému vynikajícímu poměru nízké hustoty k vysoké pevnosti a tuhosti.

Všestrannost a trvanlivost v kombinaci s jejich žádoucími vlastnostmi dělá z kompozitů s těmito vlákny ideální kandidáty pro díly vyžadující nízkou hmotnost, vysokou pevnost a trvanlivost. Ačkoliv nejsou vhodné pro díly podrobené vysokým nebo dlouhodobým namáháním v tlaku. [1], [6]



Obr. 7: Polymerní (aramidová) vlákna (převzato z [9])

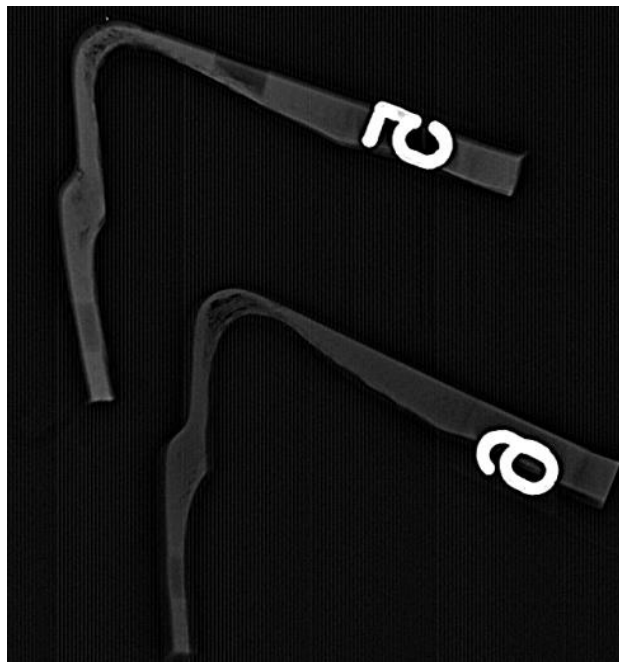
1.6 Kompozity s polymerní matricí vyztužené částicemi

Částicová výtzuž pro polymerní matrice se vyrábí výhradně z anorganických materiálů. Jsou vyrobeny z mikromletých materiálů, nejčastěji jsou to vrstevnaté hlinitokřemičitany (slídy), hlinitokřemičitany (mastek, kaolin) a uhličitany (vápenec, těživec). Kovové částice bronzu s částicemi grafitu, polytetrafluoretylenu nebo sulfidu molybdenu se mohou kombinovat za účelem zdokonalení kluzných vlastností a otěruvzdornosti. Zvýšením obsahu anorganických částic lze dosáhnout snížení hořlavosti polymerů. U polyolefinu (PE a PP), které obsahují výtzuž z $Mg(OH)_3$ nebo $Al(OH)_3$, se při vystavení ohni z hydroxidu uvolňuje chemicky vázaná voda, nazývají se tzv. samozhášivé. [1]

2 Výrobní vady a jejich prevence

2.1 Póry

Jedná se o výskyt plynových bublin o velikosti v řádech mikronů, oblasti výskytu těchto bublin se nazývá pórovitost. Tato vada se nejčastěji vyskytuje v ručně vyráběných kompozitech. Póry vznikají při nesprávně nastavených parametrech během vytvrzování, jako je například tlak, teplota a tok pryskyřice během vakuového lisování. Dále póry mohou vznikat, pokud dojde k nesprávnému skládání vláken při tkaní a také během chybného křížení vláken, které vede k nedokonalému smáčení pryskyřicí. Pórovitost v kompozitech má za následek snížení mechanických vlastností, jako je mezilaminární napětí ve stříhu. Následující opatření vedou k minimalizaci těchto vad.[10], [11]



Obr. 8: Snímek pórovitosti na kompozitním vzorku

Kontrola zachycených plynů

Plyny zachycené v matrici při výrobním procesu se musí odstranit pomocí válečku při ručním vrstvení. Při vakuovém lisování by měla být dodržena správná hodnota vakua. [10]



Vhodný tlak

Vady vzniklé při lepení vznikají z důvodu nízké adheze mezi matricí a vlákny. Tyto vady snižují pevnost v ohybu a v rázu kompozitu. Velikost adheze závisí na povrchu vláken. U kompozitů s voštinou a pěnovým jádrem může dojít k nedokonalému spojení mezi deskou a jádrem. Nevhodné spojení matrice a vlákna je velmi dobře vidět na snímcích pořízených elektronovou mikroskopií. [10], [11]

2.2 Necelistvosti v lepeném spoji

Vady vzniklé při lepení vznikají z důvodu nízké adheze mezi matricí a vlákny. Tyto vady snižují pevnost v ohybu a v rázu kompozitu. Velikost adheze závisí na povrchu vláken. U kompozitů s voštinou a pěnovým jádrem může dojít k nedokonalému spojení mezi deskou a jádrem. Nevhodné spojení matrice a vlákna je velmi dobře vidět na snímcích pořízených elektronovou mikroskopií. Následující prevenční opatření vedou k minimalizaci těchto vad. [10], [11]

Chemické ošetření vláken

Na organická vlákna se pro odstranění cizorodých nečistot používá alkalické, acetylové aj. ošetření. Vlákno má po těchto úpravách hrubý povrch, což napomáhá lepší smáčivosti a tím i adhezi k matrici. Při srovnání kompozitů chemicky ošetřených s neošetřenými se došlo k závěru, že ošetřené vykazují lepší pevnost oproti neošetřeným. [10]

Správný výběr aditiv pryskyřice

Adheze mezi matricí a polymerem je ovlivněna výběrem aditiv pryskyřice. Pokud vytvrzení proběhne příliš rychle, vlákna nebudou dostatečně smáčeny. Aditiva tedy musí vhodně interagovat s vlákny, z důvodu dobré smáčivosti. [10]

Zarovnání vláken

K vrásnění by nemělo docházet, každé vlákno by mělo být zarovnané, aby došlo ke snížení výskytu pórů. [10]



2.3 Zbytkové napětí

U kompozitů s epoxidovou pryskyřicí se zbytkové napětí vyskytuje kvůli její vysoké teplotě vytvrzování. Je přímým důsledkem chemického smrštění matrice během polymerace a nesouladu tepelné kontrakce mezi vláknem a matricí během chlazení. Pokud rozdíl tepelné kontrakce vlákna a matrice je příliš velký, může dojít k popraskání kompozitu už během chladnutí. Teplota vytvrzování by neměla přesahovat teplotu zpracování matrice, aby nedocházelo k vytvoření zbytkového napětí. [10]

2.4 Lom vláken

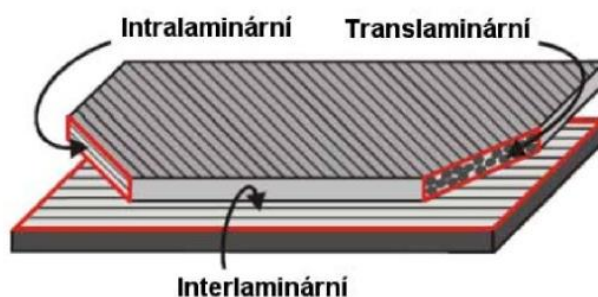
K lomu vláken dochází z důvodu špatného křížení vláken, vrásnění vláken, vlhkosti a nečistotám přítomným ve vlákně. Všechny tyto faktory přímo ovlivňují velikost adheze mezi vláknem a matricí a tím i mechanické vlastnosti kompozitu. Je tedy nutností vybrat bezvadná vlákna. Použití chemicky ošetřených vláken a vláken, která nejsou zvrásněná, je jedna ze základních prevencí pro minimalizaci těchto vad. [10]

3 Provozní vady

V provozu může dojít ke vzniku defektů v důsledku statických přetížení, únavy, nárazu atd. V kompozitech se obvykle vnitřní porušení materiálu vyskytne mnohem dříve, než je pozorovatelné makroskopicky vzhledem, nebo chováním. Je zapotřebí studovat lokální objem a určit, k jakému defektu dojde. [10]

3.1 Druhy mechanismů poruch

Druhy mechanismů poruch vláknových kompozitů se rozdělují podle toho, zdali dochází k porušení matrice, nebo vláken. Rozdělují se na vláknové a mezivláknové porušení. Mechanismy porušení se dále dělí podle polohy poškození ve vrstvách laminátu na translaminární, intralaminární, interlaminární. [12]



Obr. 9: Typy mechanismů poruch podle polohy ve vrstvách laminátu (převzato z [13])

Nachází-li se defekt ve vrstvě, jedná se o vláknový translaminární mechanismus poruch. Do skupiny těchto poruch patří přetržení vlákna, rozštěpení vlákna podél jeho osy, zborcení vlákna ve vzpěru, nebo lom vlákna v ohybu. K poruše dochází v závislosti na namáhání. Translaminární mechanismus velmi často doprovází i mezivláknový lom. [12]

Mezivláknova intralaminární porucha se také nachází ve vrstvě, ale jedná se pouze o poruchu matrice nebo rozhraní matrice s vláknem. Tyto trhliny jsou nebezpečné, jelikož nemusí být na povrchu vidět, separují pouze vlákna ve svazku. Laminát jako celek vypadá při vizuální kontrole neporušený. Trhlina může v závislosti na směru skládání vláken a směru namáhání, případně za přítomnosti dutin měnit orientaci, nebo se začít větvit. [12]



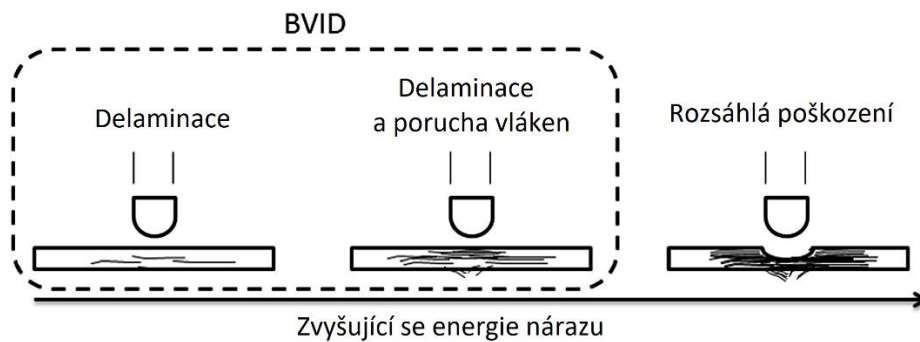
Mezivláknový interlaminární lom, běžně nazývaný delaminace, se nachází na rozhraní dvou sousedících vrstev a neproniká do svazků vláken ve vrstvě. Na rozdíl od intralaminárního mechanismu není omezen výztuží, dosahuje tedy mnohem větších rozměrů. [12]

3.2 Mechanické namáhání kompozitů

Napětí je v kompozitu na výztuž přenášeno za pomoci adheze. Adheze je tření na rozhraní mezi matricí a výztuží. Podmínka dobré soudržnosti laminátu je i dobrá smáčivost matrice s vlákny. Pokud jsou na kompozit vysoké pevnostní nároky, musí být adheze co největší. Naopak, je-li vyžadována dobrá odolnost proti nárazu, musí být adheze snížena. Absorbovaná energie naruší celistvost mezi matricí a výztuží, které způsobí růst trhlin podél povrchu výztuže. Hlavními způsoby mechanického namáhání kompozitů jsou tah, tlak, smyk a ohyb. Speciálním způsobem zatížení je náraz cizím tělesem. [12]

3.2.1 Náraz

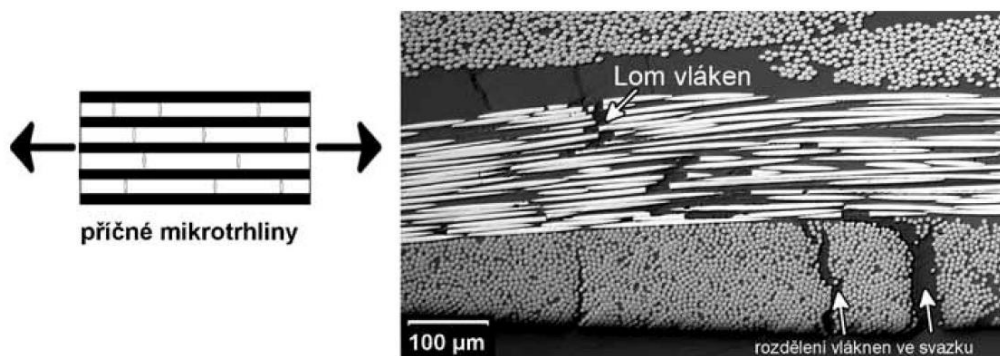
Největší množství provozních vad je způsobeno právě nárazem, jeho rozsah poškození závisí na energii dopadu. V některých případech se na povrchu objeví trhlina, ve většině případů tomu tak není a dochází k delaminaci uvnitř kompozitu. Nižší energie nárazu způsobí (intralaminární) příčné trhliny v matrici a ve svazcích. Při působení větší energie dojde k velkoplošné delaminaci vrstev. Takovéto vady se nazývají nedetekovatelné poruchy, anglicky „barely – visible impact damage“ (BVID). Vady detekovatelné, anglicky „visible impact damage“ (VID) jsme schopni poznat pouhým okem. Na rázové poškození jsou náchylnější kompozity s reaktoplastovou matricí, které trpí nedostatkem houževnatosti. [11], [12]



Obr. 10: Barely – visible impact damage a visible impact damage (převzato z [14])

3.2.2 Tah

Odolnost kompozitu vůči namáhání v tahu závisí na pevnosti a tuhosti výztuže. Pro jednosměrný kompozit bude při rostoucím tahovém zatížení ve směru vláken docházet k intralaminární porušení příčnými trhlinami v matrici a ve svazcích vláken. Může dojít až k translaminárnímu přetržení vláken v jejich nejmenších průřezech. Experimentálně bylo zjištěno, že se vlákna přetrhávají při působení zatížení, které je nižší než zatížení konečné, a k přetržení dochází náhodně. Dojde-li k přetržení kritického množství vláken, nastane konečný lom. [12]

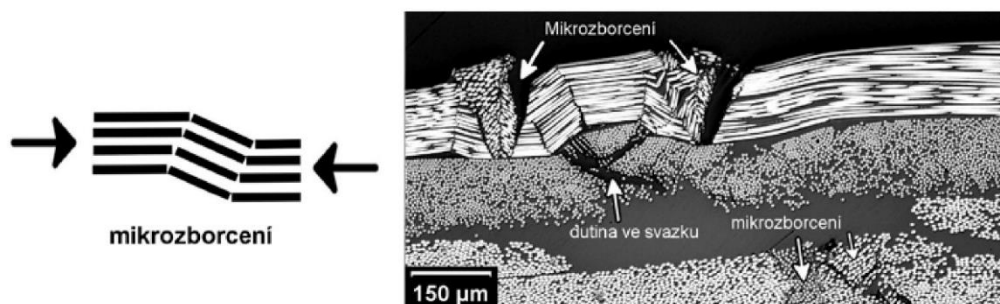


Obr. 11: Lom vláken způsobený tahovým zatížením a rozdělení vláken ve svazku způsobené příčnými mikrotrhlinami (převzato z [12])

3.2.3 Tlak

Při namáhání tlakem dochází ze začátku ke stlačování vláken, při větší deformaci v matrici dojde k translaminárnímu porušení, přesněji k mikrozborcení vláken. Mimo tlakového zatížení na matrici v příčném směru působí zároveň i tahové zatížení. Při mikrozborcení dochází často i k intralaminárnímu porušení, při kterém vznikají dutiny v matrici a ve svazcích vláken. Při tlakovém namáhání má významný vliv adhezivní

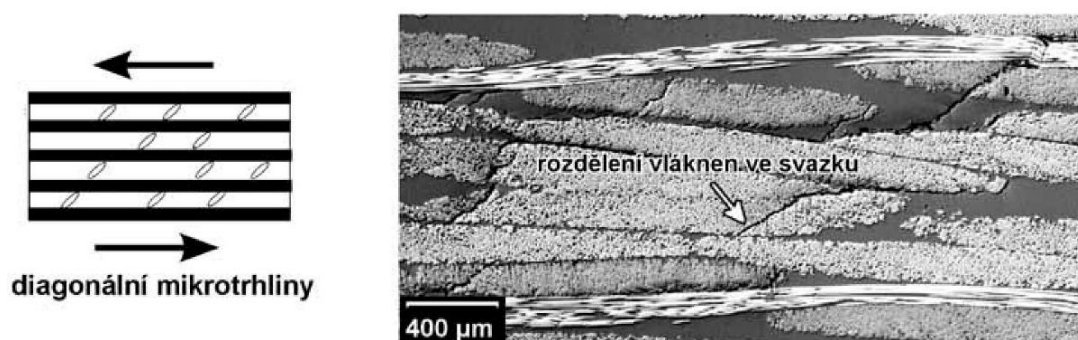
a tuhostní charakteristiky matrice. Pojivo zachovává vlákna v přímé poloze a chrání je před selháním ve vzpěru. [12]



Obr. 12: Mikrozboreni vláken a vznik dutiny ve svazku (převzato z [12])

3.2.4 Smyk

Při působení smykového zatížení mezi sebou vzájemně prokluzují dvě sousední vrstvy laminátu. Matrice je nositelem napětí a je nezbytné, aby adheze mezi matricí a výztuží byla co nejvyšší. Mezilaminární smyková pevnost je častým indikátorem schopnosti adheze mezi vlákny a matricí. Delaminaci běžně předchází diagonální trhliny v matrici a mezi vlákny, způsobené právě smykovým namáháním. [12]



Obr. 13: Diagonální mikrotrhliny rozdělující vlákna ve svazku (převzato z [12])



4 Úvod do defektoskopie

Defektoskopie, nebo také nedestruktivní testování obsahuje soubor metod, pomocí kterých lze na základě pozorovatelných, nebo měřitelných výsledků odhalit vadu v součásti.

Větší povrchové vady lze odhalit pouhým okem, avšak k nalezení vad uvnitř součásti bez poškození, je potřeba použít právě některou z defektoskopických metod.

Existuje mnoho metod nedestruktivního zkoušení, ale momentálně není žádná, která by s jistotou odhalila jakýkoliv typ vady. Důležitou podmínkou pro správné identifikování vady je zvolení správných defektoskopických metod pro určitý materiál. Při hledání defektu je doporučeno použít více různých metod, hlavní zvolená metoda vadu v součásti objeví a doplňující metody potvrdí výsledek hlavní metody. Úkolem defektoskopie je dokázat, že kontrolovaná součást nemá nepřijatelné vady. [15]

Nejčastěji používané defektoskopické metody pro kompozitní materiály jsou:

- Vizuální metoda
- Kapilární metoda
- Ultrazvuková metoda
- Metoda prozářením [15], [16]

K docílení kvalitního vyhodnocení vad je nutné, aby kontrolu prováděl řádně zaškolený personál. Vady lze rozdělit dvěma způsoby.

Podle jejich umístění:

- vady povrchové
- vady vnitřní

Podle jejich charakteru:

- vady objemové - rozměry vad jsou ve všech směrech srovnatelné (bubliny, póry...)
- vady plošné - rozměry vad jsou v jednom směru značně větší než ve směru druhém (delaminace, trhliny...) [17]



Nejnebezpečnější jsou vady povrchové, které mají tvar vrubu (ostrý zářez na povrchu dílu), například trhliny a praskliny.

4.1 Vizualní metoda

Jedná se o nejstarší a nejběžnější NDT metodu používanou v letectví. Zkouška je snadná, cenově dostupná a velmi účinná pro kontrolu povrchových vad, měla by se provádět před ostatními NDT metodami. Podmínkou pro správné vyhodnocení vady je zkušený personál, který se orientuje v dané problematice. Personál provádějící kontrolu se musí řídit určitými zásadami a postupy. Obvykle jsou to zásady obsažené v normě ČSN EN 13018 (015037) *Nedestruktivní zkoušení - Vizualní zkoušení - Obecné zásady*. [15], [16], [18]

Vizualní kontrola místní zkoumá svary, odlitky, povrch jednotlivých součástí apod.

Vizualní kontrola všeobecná hledá vady na větších plochách (ocelové konstrukce, rotory turbín, potrubí...). [15], [18]

Dále se vizualní kontrola dělí do dvou skupin:

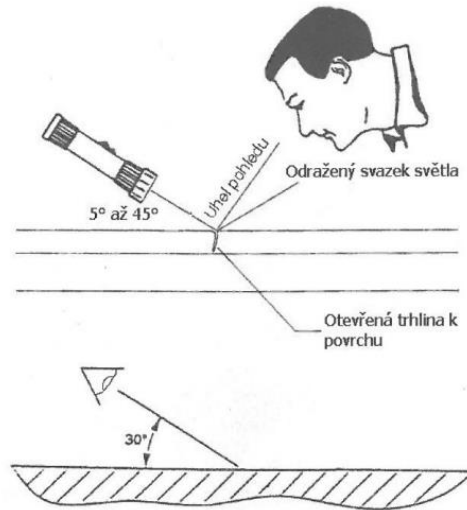
- přímá
- nepřímá [18]

4.1.1 Vizualní kontrola přímá

Vizualní kontrola přímá je podrobná kontrola povrchu součásti, při které nesmí být přerušena optická dráha mezi okem obsluhy a pozorovanou plochou. Nejčastěji je prováděna jako vizualní kontrola místní, musí být prováděna ze vzdálenosti do 600 mm a pod úhlem větším než 30° vzhledem k povrchu součásti. Kontroluje se pouhým okem, případně s pomocí lupy nebo optických zařízení s optickými vlákny, jejichž konstrukce nemá přerušenu optickou dráhu (endoskopy, boroskopy, fibroskopy), a které jsou zahrnuty v normě pro tento typ kontroly, úhel pozorování je možné zlepšit za pomoci zrcadel.

Kontrola prováděná ze vzdálenosti větší než 600 mm je považována za všeobecnou vizualní kontrolu. Při vizualní kontrole místní je potřeba minimálního

osvětlení 500 luxů a při všeobecné vizuální kontrole musí být součástí osvětleny minimálně 160 luxy. [15], [18]



Obr. 14: Pozorování povrchu při přímé vizuální kontrole (převzato z [15])

4.1.2 Vizuální kontrola nepřímá

Provádí se v případě, kdy vizuální kontrolu přímou není možné provést z důvodu nedostatečné přístupnosti nebo bezpečnosti. Tuto kontrolu provádíme za pomoci endoskopů, videoskopů a jiných přístrojů s optickými vlákny, ve spojení s kamerou nebo jinými vhodnými prostředky. [15], [18]

Výhody vizuální metody:

- cenově dostupná
- přenosná
- má okamžitý výsledek
- minimální příprava dílu
- nenáročné školení personálu



Nevýhody:

- pouze pro povrchové vady
- pouze pro velké vady
- subjektivní vyhodnocení vad [15]

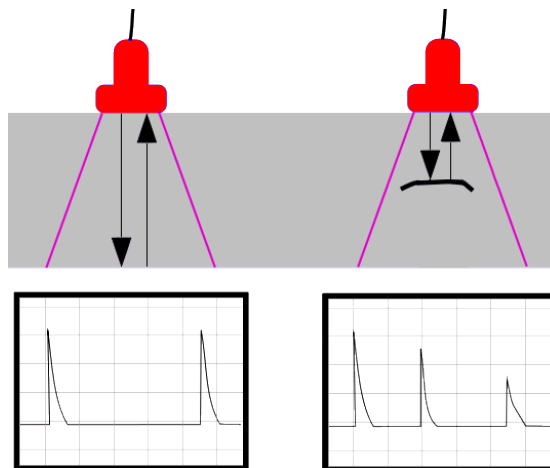
4.2 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková defektoskopie, také známá jako ultrazvukové NDT, je metoda sloužící ke stanovení různých vlastností materiálu jako například tloušťka, pnutí, elastické vlastnosti nebo k odhalení vnitřních vad pomocí vysokofrekvenčních zvukových vln pohybujících se od 0,5 MHz do 25 MHz. Nejčastěji jsou touto metodou zkoušeny svary, odlitky a tvářené polotovary. Vhodná je však i pro zkoušení nekovových materiálů, jako jsou kompozity a určité typy plastů. Výhodou ultrazvukové defektoskopie je schopnost odhalit vadu ve velké hloubce i na povrchu materiálu. [17], [31]

4.2.1 Fyzikální princip

Ultrazvuk je mechanické vlnění s frekvencí nad 20 000Hz. Akustická energie má schopnost se lámat, ohýbat a být absorbována, při překročení frekvence 100 kHz se začíná šířit ve svazku. V případě extrémně vysokých frekvencí (MHz) jsou vlny tlumeny a přestávají se šířit vzduchem. Dokážou se však šířit kapalinami a pevnými materiály, čehož se využívá v této metodě. [17], [31]

Vzdálenost vady je určena podle vzdálenosti echa vady od počátečního impulsu na displeji. Amplituda odraženého echa je přímo úměrná velikosti odrazové plochy, díky tomu je možné zjistit i relativní velikost vady. Poloha vady je určena za pomoci vzorců a jiných softwarových funkcí. [17], [31]



Obr. 15: Princip ultrazvukové metody (převzato z [19])

Ultrazvukové vlny se šíří jedině v pružném prostředí, jejich způsob šíření je určen typem zdroje (bodový nebo plošný) a vlastnostmi materiálu. Na rozhraní různých prostředí nastává lom, odraz nebo ohyb akustických vln, tyto jevy mohou být příčinou následné interference, nebo fokusace vln, které se projevují v různých vzdálenostech od zdroje. [17], [31]

4.2.2 Základní druhy ultrazvukových vln

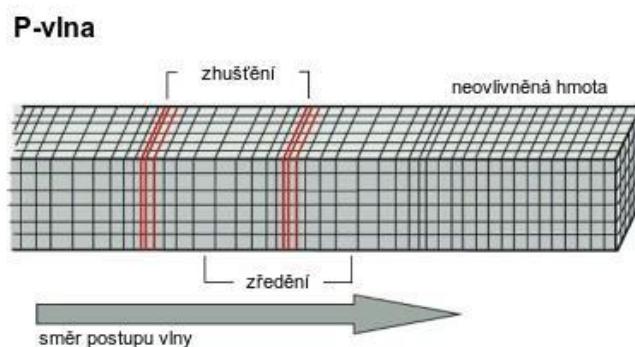
Pro ultrazvukovou defektoskopii se nejčastěji používají tyto vlny:

- podélné vlny
- příčné vlny
- povrchové vlny
- deskové vlny [17]

Podélné vlny

U podélných vln dochází ke kmitání částic ve směru šíření, vlny se sobě oddalují a přibližují, dochází k zředování a zhušťování prostředí tento jev nazýváme objemové změny prostředí. Mohou procházet pevnými, kapalnými i plynnými prostředími. Podélné vlny jsou díky své univerzálnosti nejpoužívanějším typem vln. Lze je lehce vygenerovat v jakémkoliv pevném či kapalném prostředí a nejsou omezeny příliš velkým útlumem. [17]

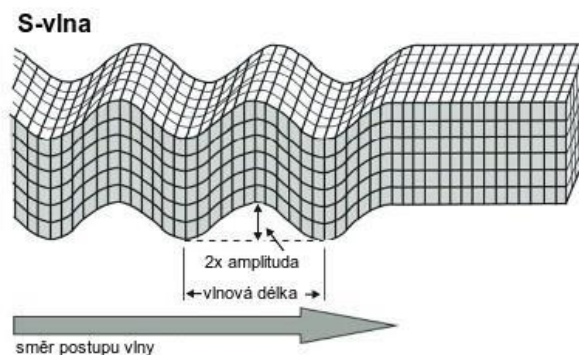
Zvláštním druhem podélných vln jsou vlny podpovrchové nebo také nazývané plíživé vlny, které vznikají těsně před dosažením prvního kritického úhlu. Na rozdíl od povrchových vln nejsou citlivé na nečistoty a nerovnosti na povrchu součásti. Určitý podíl energie je vynaložen na příčnou vlnu, proto má podpovrchová vlna primární a sekundární menší dosah. Tento typ vln je nejvhodnější pro hledání vad těsně pod povrchem součásti. [17], [31]



Obr. 16: Podélná vlna (převzato z [20])

Příčné vlny

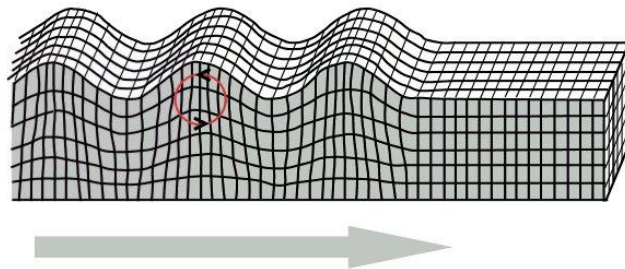
U příčných vln částice kmitají kolmo na směr šíření vlny. Nedochozí k zředění a zhuštění, částice se pouze vůči sobě příčně posouvají. Vlny se mohou šířit pouze v prostředí, které dokáže přenášet smykové zatížení, tj. pevné látky a kapalné s vysokou viskozitou. V oceli je vlnová délka příčné vlny přibližně o polovinu menší než podélné vlny, je tedy možné tímto druhem vln najít menší vady než s vlnou podélnou o stejné frekvenci. [17], [31]



Obr. 17: Příčná vlna (převzato z [20])

Povrchové vlny

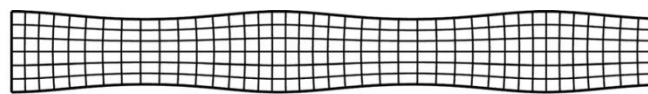
Povrchové nebo také Rayleighovy vlny vznikají zvětšením úhlu dopadu příčné vlny. Jak už název napovídá, šíří se pouze po povrchu, ve hloubce vlnové délky. Rayleighovy vlny se šíří pomaleji než vlny příčné, přibližně 0,92 krát. Tento druh vln je tedy ještě citlivější než vlny příčné. Používají se výhradně pro hledání povrchových trhlin. Nevýhodou je fakt, že na rozdíl od podpovrchových podélných vln i malé nečistoty a nerovnosti na povrchu zde vyvolávají při zkoušení dojem vady. Povrch zkoušeného dílu tedy musí být jemně zbrúšen. [17], [31]



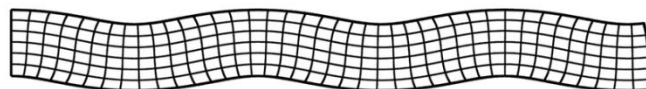
Obr. 18: Rayleighova vlna (upraveno podle [20])

Deskové vlny

Deskové vlny se šíří symetricky nebo asymetricky v závislosti na tloušťce materiálu, frekvenci a úhlu dopadu. Lambovy vlny se používají na díly, kterých tloušťka je podobná s délkou vlny. K jejich vytvoření je totiž nutné, aby procházely celou tloušťkou stěny dílu. Lambovy vlny jsou velmi citlivé, jelikož každá vada ovlivňuje symetrii vlny a vyvolává indikaci. [17], [31]



(a) S_0 -mode



(b) A_0 -mode

Obr. 19: Lambova symetrická a asymetrická vlna (převzato z [21])

4.2.3 Útlum ultrazvuku

V reálném materiálu dochází ke ztrátám vlivem absorpce a rozptylu. Tyto ztráty nazýváme útlumem. K absorpci dochází nejčastěji u plastových dílů, k rozptylu u dílů kovových. [17]

4.2.4 Absorpce

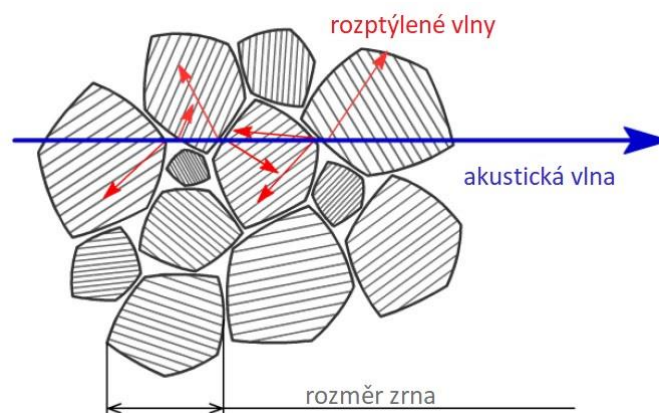
Zvuková energie se vlivem vnitřního tření ve struktuře při průchodu materiálem transformuje na teplo, tento proces se nazývá absorpce. Intenzita zvukového pole klesá bez vzniku rušivého šumu. Klesající výška echa se kompenzuje navýšením výkonu, nebo zesílením. [17], [31]

4.2.5 Rozptyl

Ztráty rozptylem mají za následek, že určitá část zvukového vlnění v průběhu šíření mění směr od původního přímého šíření. Na displeji je zobrazen jako strukturální šum, který může překrývat echa od materiálových vad. [17], [31]

Rozptyl je způsoben:

- odrazem od malých nehomogenit (póry, vměstky)
- odrazem od přirozených nehomogenit (grafitické částice v litině, porozita ve slinutých materiálech)
- ohybem na hranicích zrn struktury
- rozdílnými elastickými charakteristikami zrn [17]



Obr. 20: Rozptyl akustické vlny (upraveno podle [22])

4.2.6 Způsoby prozvučování

V ultrazvukové defektoskopii existuje mnoho metod prozvučování. Tyto dvě patří mezi ty nejdůležitější:

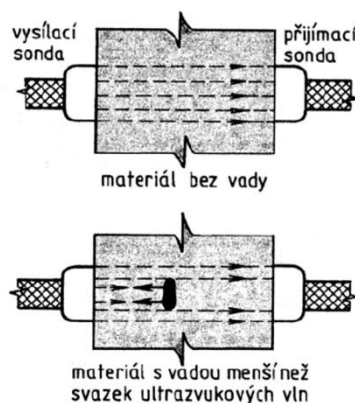
- průchodová technika
- impulzně odrazová technika [17]

Průchodová technika

K této technice je zapotřebí dvou sond (vysílače a přijímače). Vysílač vygeneruje ultrazvukovou vlnu, která prochází součástí, na druhé straně ji zachytí přijímač a signál je následně vyhodnocen softwarem. Pokud by se v součásti nacházela vada, došlo by k zeslabení akustického tlaku vlivem tzv. stínu vady. S rostoucími rozměry vady klesá část akustického tlaku, který prochází součástí, následkem je pokles echa na displeji. [17]

Nevýhody této metody jsou:

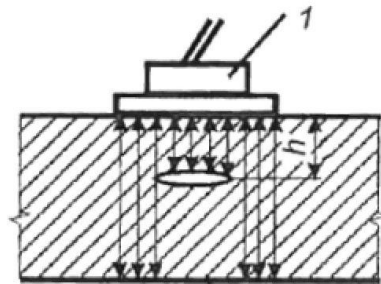
- nezbytnost přístupu z obou stran k prozvučované součásti
- nutnost použití dvou sond a zajištění jejich souososti
- nepřímé prokázání vady, není možnost určit její hloubku
- ohyb vlnění může potlačit působení malých vad [17]



Obr. 21: Ultrazvukové zkoušení průchodovou technikou (upraveno podle [23])

Impulzně odrazová technika

U této metody stačí přístupná pouze jedna plocha součásti. Sondou je vysláno ultrazvukové vlnění směrem do kontrolované součásti, které je na rozhraní dvou prostředí odraženo zpět do sondy, sloužící jako vysílač i přijímač. Čas uplynulý mezi vysláním a přijetím signálu je úměrný vzdálenosti sondy od vady. Díky tomu je možné přesně určit polohu vady v součásti. [17]



Obr. 22: Ultrazvukové zkoušení impulzně odrazovou technikou (upraveno podle [24])

4.2.7 Akustická vazba

Jelikož se ultrazvukové vlny o frekvencích používaných pro NDT vzduchem téměř vůbec nešíří, je potřeba použít vazební prostředek, aby se vlnění z měniče sondy přeneslo do kontrolovaného dílu. Vazební prostředek slouží k vyplnění vzduchové mezery mezi sondou a kontrolovaným dílem. Lze použít například vodu, vazelínu, olej, glycerin, různé typy gelů, atd. [17]

Vzhledem k tloušťce vazební vrstvy se rozlišují tři základní typy akustické vazby:

- kontaktní
- mezerová
- imerzní

Kontaktní vazba

Při kontaktní vazbě je sonda přiložena přímo na zkoušený díl. Vzduchovou mezeru vzniklou tvarem dílu, nerovnostem na povrchu atd. musí vyplnit kapalina s vhodnými vlastnostmi. Kapaliny jsou dobře přenášeny podélné vlny, příčné vlny však ne tak dobře, vzhledem k nízkému modulu ve smyku (až na velmi viskózní materiály).



Sonda i kontrolovaný povrch by měly být namočený a neměly by mezi nimi být žádné vzduchové mezery. Vazební prostředek nesmí žádným způsobem reagovat a poškodit sondu nebo kontrolovaný materiál. [17]

Vazební prostředky pro kontaktní zkoušení musí splňovat tyto požadované vlastnosti:

- vhodnou smáčivost a viskozitu
- odstranitelnost
- netoxičnost
- nízký útlum
- nesmí způsobit korozi [17]

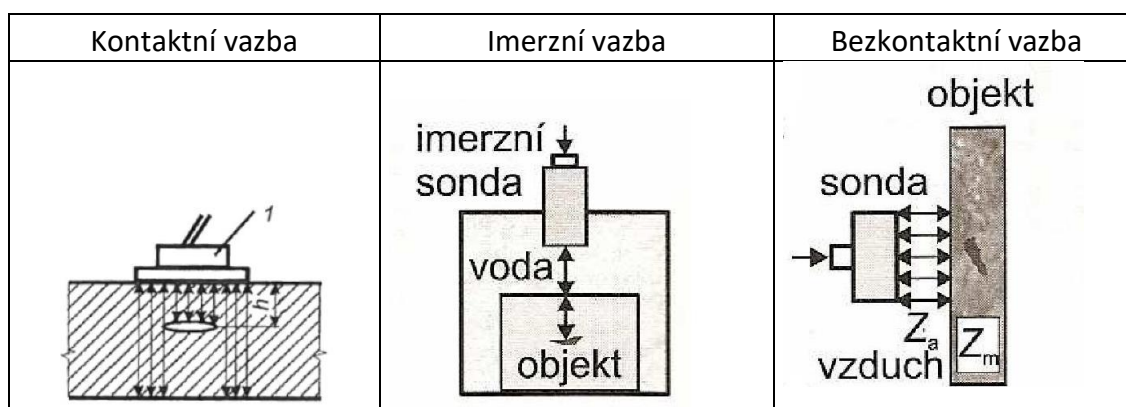
Operátor provádějící zkoušku musí zohlednit všechny tyto vlastnosti vzhledem k typu materiálu, stavu kontrolovaného dílu, teplotě, orientaci povrchu a dostupnosti. Během kontroly musí být po celou dobu sonda v kontaktu s kontrolovaným dílem skrze vazební prostředek nanesený v tenké vrstvě. Pokud je povrch dílu drsný, orientovaný vertikálně nebo dochází ke kontrole nad hlavou, je potřeba použít viskóznější kapaliny jako například pastovité celulózové gely, oleje, glycerin, které se mohou vypařit téměř beze zbytku. Také je možné jejich směsi společně s vodou použít jako ředidlo. [17]

Imerzní vazba

Jak už bylo výše zmíněno, kapaliny jsou nejlepšími vazebními prostředky, pro imerzní metodu se nejčastěji používá voda kvůli své dostupnosti a ceně. Kontrolovaná součást musí být ponořena do vody. Aby bylo zabráněno výskytu nečistot organického původu, korozi, vytváření bublin a hnilobě, je v některých případech nutností použít smáčedlo. Vzduchové bubliny je potřeba z povrchu sondy i kontrolovaného dílu pravidelně stírat, nebo k jejich odstranění použít vodní trysku. [17]

Bezkontaktní vazba

Do této techniky patří především technika EMAT, která vytváří ultrazvukové vlnění ve zkoušeném materiálu. Pro funkčnost této metody je také nutné, aby materiál byl elektricky vodivý. Dále na principu bezkontaktní vazby také funguje technika air – coupled, využívající podélných vln o nízkých frekvencích, přibližně desítky až stovky kHz, vlnění o takto nízké frekvenci je možné přenášet vzduchem. [17]



Obr. 23: Základní typy akustických vazeb Z_a – akustický odpor vzduchu, Z_m – akustický odpor materiálu (upraveno podle [24], [25])

4.2.8 Přechodové ztráty

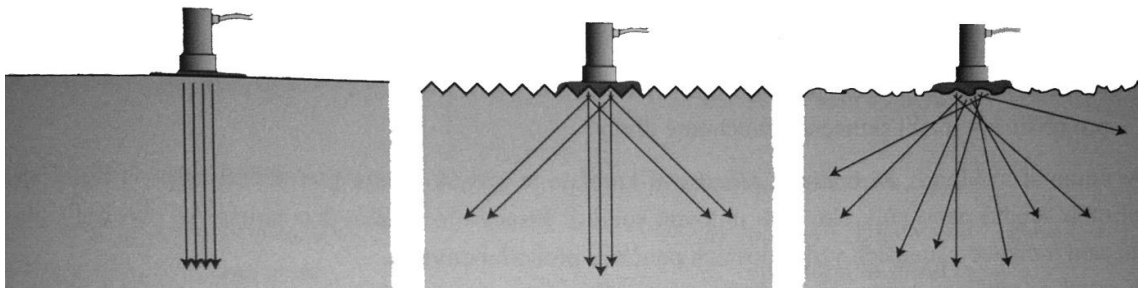
Přechodové ztráty vznikají při průchodu ultrazvukových vln ze sondy do kontrolovaného materiálu. Jsou zapříčiněny odlišnou jakostí povrchu sondy a kontrolované součásti. Existuje mnoho norem, které udávají, jakou jakost povrchu musí součást mít a jaký vazební prostředek je nutné zvolit, aby mohla být ultrazvukovou defektoskopií spolehlivě kontrolována. [17]

Nežádánějším stavem je co nejmenší možná drsnost povrchu, kterou mají většinou válcované polotovary a díly s dobře opracovaným povrchem (broušené, leštěné, honované povrchy). Při prozvučování součástí s hladkými povrchy nedochází k žádným, nebo pouze velmi malým ztrátám. Výběr vazebních materiálů pro tento případ součástí nemá žádné omezení. Je možné použít např. vodu, vazební pasty nebo olej. [17]

S druhým typickým stavem povrchu se lze setkat u obráběných dílů, na kterých nebyla provedena žádná dokončovací operace. Jedná se o díly s nerovným povrchem pravidelné struktury. [17]

Do materiálu vstupuje kolmo pouze část svazku, zbytek prochází šikmo pod určitým úhlem, to má za následek velké ztráty. Zde je nutné použít pouze vazební prostředky s vyšší viskozitou, kterými jsou například těžké oleje, nebo správně rozmíchané pasty. [17]

Nepravidelné povrchové struktury, například neopracovaných odlitků mají nejvyšší ztráty. Jen nepatrná část svazku projde kolmo. Jelikož struktura povrchu není pravidelná, ztráty nejsou konstantní na celé ploše, nedají se vynahradit prostým zvýšením zesílení. Z důvodu zachování ztrát v určitém intervalu je nutné použít viskózní vazební prostředek. [17]

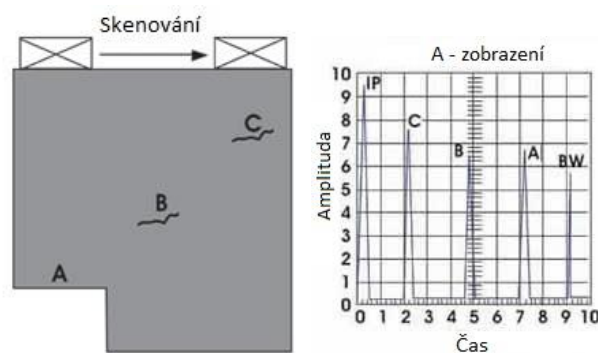


Obr. 24: Přechodové ztráty ultrazvuku na různých jakostech povrchu (převzato z [17])

4.2.9 Způsoby zobrazení

A – zobrazení

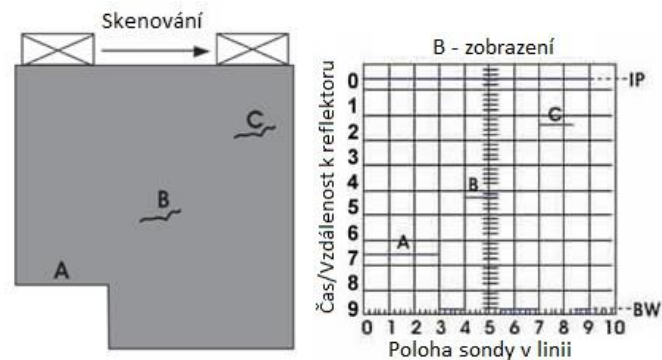
Při kontrole A – zobrazením je výsledkem graf, na kterém horizontální osa představuje dobu průchodu signálu kontrolovaným dílem, tento údaj je většinou přepočítáván na vzdálenost vady od čela sondy. Na vertikální ose je zaznamenána výška signálu, která odpovídá velikosti akustického signálu, který je přijat měničem sondy. [17]



Obr. 25: A-zobrazení, IP – počáteční puls, BW – koncové echo (upraveno podle [26])

B – zobrazení

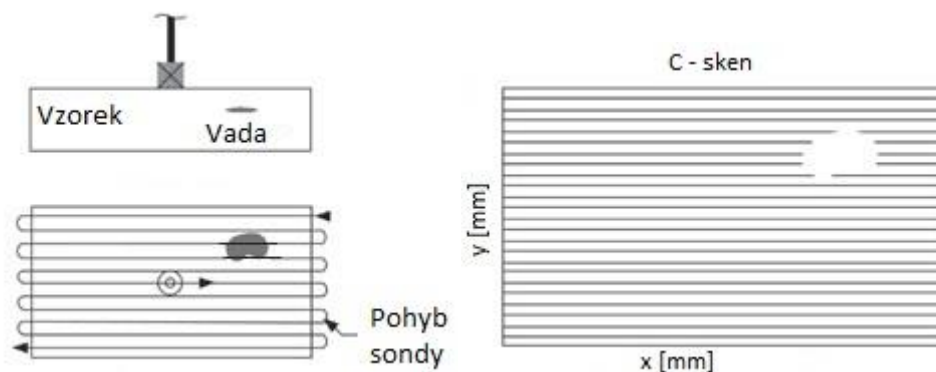
Data shromážděná ultrazvukovou kontrolou jsou vykreslena jako řez součásti, který je kolmý ke zkoušenému povrchu. U tohoto typu zobrazení jedna souřadnice představuje stejně jako u A – zobrazení dobu průchodu signálu materiálem, druhá souřadnice prezentuje polohu sondy v linii. [17]



Obr. 26: B-zobrazení (upraveno podle [26])

C – zobrazení

Výsledkem C - zobrazení je půdorysný obraz kontrolované součásti. Horizontální a vertikální osy představují polohu v rovině x a y, barevná stupnice sílu odrazu ultrazvukového vlnění v určitém bodě. Nevýhodou C – zobrazení je, že neudává vzdálenost vady od čela sondy.[17]



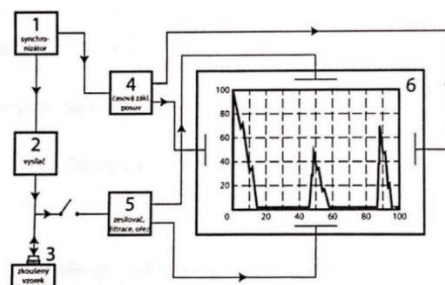
Obr. 27: C - zobrazení (upraveno podle [26])

4.2.10 Ultrazvukové zařízení a vybavení

Běžně používané zařízení pro metodu impulsně odrazového zkoušení se skládá z těchto součástí:

- synchronizátoru
- zdroje napětí – vysílač sloužící k aktivaci měniče
- generátoru – zdroj časové základny
- přijímacího zesilovače a zobrazovacího systému – interpretuje přijaté ultrazvukové impulsy
- obrazovky [17]

Všechny operace jsou řízené synchronizátorem spouštějícím náležité obvody. Generátor vysílá vysokofrekvenční napěťové impulsy, které jsou v sondě pomocí měniče přeměněny na ultrazvukové vlnění, jež prochází do prozvučované součásti. Odražené vlnění je sondou opět přijato. Vlivem ztrát mají odražené vlny malou amplitudu a je nutno tento impuls zesílit pomocí zesilovače. Ultrazvukové impulsy se na vstupním zesilovači zesilují jako impulsy vysokofrekvenční a výstupu zesilovače jako impulsy usměrněné. Díky odřezávacím obvodům je možné odstranit signály, které mají nízkou úroveň. Tyto signály jsou způsobeny strukturou materiálu, jsou také nazývány šum. Přijaté signály se často zpracovávají pomocí filtrů z důvodu ulehčení jejich interpretace. Zesílené a upravené signály se přivádějí na obrazovku, kde se zobrazují jako echa, se kterými dále pracuje operátor, nebo software zařízení. [17]



a) Zjednodušené schéma zapojení

b) Přístroj Sitescan D10

Obr. 28: Ultrazvukový defektoskop (převzato z [17])

4.2.11 Typy sond pro ultrazvukové zkoušení

Sond pro ultrazvukovou defektoskopii je mnoho různých tvarů a typů podle účelu použití. Nejčastěji jsou využívány sondy, které disponují zdrojem podélných vln. Pokud je požadované zkoušení příčnými vlnami, generují se vlnovou transformací (dopadem šikmo na rozhraní). [17]

Přímé sondy

Sondy tohoto typu obsahují měnič sloužící k transformaci elektrické energie na mechanickou (mechanické vlnění) a naopak. Měnič generuje podélné vlny, které dopadají na materiál v kolmém směru. Z obou stran je pokoven, nejčastěji stříbrem, aby na něj mohlo být přivedeno napětí z ladící cívky, která slouží k frekvenčnímu přizpůsobení na vyžadovanou frekvenci. Další důležitou součástí je tlumící tělísko, které má za úkol mechanicky tlumit měnič a absorbovat všechny části vlnění, které jsou vysílány směrem do sondy. Všechny zmíněné součásti jsou zavřené v ochranném krytu, který chrání sondu před nárazem, nebo poškrábáním. Vyrábějí se varianty pro imerzní i kontaktní zkoušení. [17]



Obr. 29: Přímé imerzní sondy Olympus (upraveno podle [27])

Úhlové sondy

Základní princip je podobný jako u přímých sond, slouží však k šikmému prozvučování podélnými nebo příčnými vlnami. Transformací a změnou úhlu dopadu podélných vln se získá nový požadovaný typ vln. Kontaktní prozvučování využívá klín z plexiskla různých úhlů, imerzní prozvučování využívá naklonění (vyosení) sondy. Podle typu vln šířících se prozvučovaným materiálem lze rozdělit úhlové sondy na:

- úhlové sondy příčných vln
- úhlové sondy podélných vln. [17]

Úhlové sondy s vyměnitelným klínem

Nejčastěji se jedná o přímé sondy spojené s vhodným klínem z plexiskla. Úhel prozvučování je dán úhlem sklonu klínu. Součástí plexi klínu může být tlumící tělíčko, které způsobuje tlumení vlny odražené zpátky do sondy, nebo je k utlumení vlny uzpůsoben jeho tvar. Nevýhodou těchto sond je menší amplituda signálu od materiálu, způsobená rozhraním mezi klínem a sondou (jedná se o rozebíratelný spoj), které způsobuje přechodové ztráty. [17]



Obr. 30: Úhlové sondy s vyměnitelným klínem Sonatest (převzato z [28])

Úhlové sondy s trvalým spojením měniče s klínem

Tyto sondy mají měnič trvale spojený (nejčastěji přilepený) s klínem z plexiskla, uzavřený v ochranném krytu. Pro každý požadovaný úhel je nutné použít různou sondu. [17]



Obr. 31: Uhlové sondy s trvale připojeným klínem Sonatest (převzato z [28])

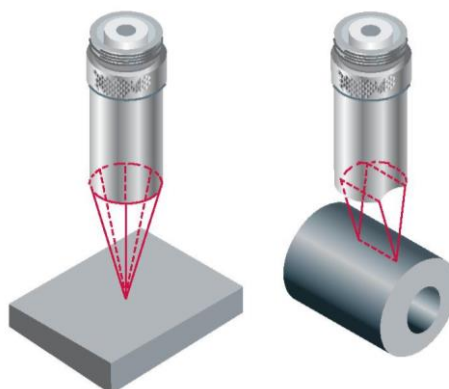
Fokusující imerzní sondy

Tyto sondy využívají čočky, pomocí kterých vytváří svazek soustředěný v bodě nebo přímce. Fokuse ultrazvukového vlnění se v NDT využívá k zvýšení citlivosti v oblasti ohniska. Materiálem, ze kterého jsou čočky vytvořeny, může být epoxid nebo jiné plasty. Poloměr zakřivení určuje velikost fokuse. Délka blízkého pole sondy určuje maximální ohniskovou vzdálenost.

Výhody fokusujících sond:

- zvýšená citlivost ve fokusačním pásmu
- menší úroveň šumu
- lepší stranová rozlišovací schopnost (snadnější odhad velikosti a tvaru)

[17]



Obr. 32: Fokusující imerzní sondy – bodově a přímkově fokusovaná (převzato z [27])



Sondy phased array

Tyto sondy se vzhledem ke své univerzálnosti nejčastěji používají v automatizovaném zkoušení. Jednotlivé elementy měniče phased array sondy jsou poskládány jako mozaika, lze je budit jednotlivě v různých časových posloupnostech, nebo jako celek.

Pokud jsou budící impulzy vhodně načasovány, mohou sondy phased array dosáhnout přímkového pole s řiditelným úhlem svazku, nebo mohou být použity jako sondy s proměnnou fokusací. [17]

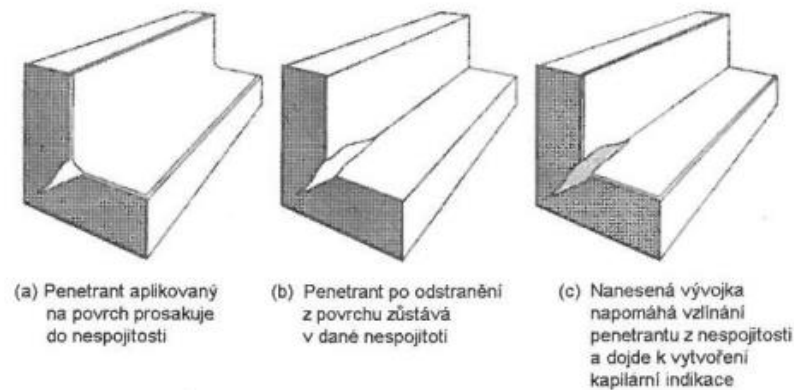
4.3 Kapilární metoda

Kapilární nebo často nazývaná penetrační metoda slouží k odhalení trhlin nebo jiných nespojitostí pronikajících na povrch součástí, které nelze vizuální kontrolou odhalit. Používá se na neporézní materiály. Porozita by totiž mohla způsobit velké množství falešných chyb. Důležitou podmínkou pro úspěšné vyhodnocení kontroly je zvolení vhodného penetrantu, který musí prosáknout do trhliny a vyplnit ji. [15], [16]

Pro povrchové vady je kapilární metoda díky moderním penetrantům vhodnější než například metoda prozáření. Penetranty mají dobrou zabíhavost a zároveň schopnost udržet se v širších dutinách a po zkoušce je lze velmi snadno z trhliny vymýt. Důležitou vlastností penetrantů, především při kontrolování kompozitů, je jejich vhodné chemické složení, díky kterému nedochází k žádné chemické reakci, která by mohla poškodit strukturu zkoušené součásti. [16]

Postup kontroly:

Před tím než nanese penetrant, musí být součást řádně očištěna. Lze jej aplikovat například štětcem, nebo sprejem. Po nanesení média trvá několik minut, než penetrant prosáknout do trhlín a nespojitostí. Přebytek je z povrchu součásti odstraněn. Pokud se na kontrolovaném povrchu vyskytuje vada, penetrant začne z trhlíny vzlínat a dojde k vytvoření kapilární indikace. [15], [16]



Obr. 33: Princip kapilární metody (převzato z [15])

Mezi výhody kapilární metody patří:

- přesnost
- citlivost na velmi malé vady
- rychlá proveditelnost – 30 minut nebo méně
- požadovaná minimální dovednost

Nevýhody jsou následující:

- pouze pro místní povrchové vady
- porézní a drsný povrch brání provedení zkoušky
- příprava dílu (odstranění laků tmelů, atd.)
- požadovaný vysoký stupeň čistoty
- požadovaná přímá vizuální detekce výsledků [15]

4.4 Metoda prozářením

Metoda prozářením se používá k detekci objemových vad, jako jsou plynové póry a inkluze. Má však obecně nízkou schopnost detekovat ploché defekty. Využívá záření s krátkými vlnovými délkami k zachycení obrazu defektů ve svaru nebo v základním materiálu na film nebo digitální detektor. Vada absorbuje méně záření než okolní materiál, a díky tomu je na filmu rozpoznána. Zdrojem záření je obecně rentgenová lampa nebo paprsky gama z radioaktivního izotopu. Pro ochranu personálu



před nebezpečím záření je vyžadováno zvláštní opatření. Pro tloušťky materiálu nad 25 mm by radiografické testování mělo být doplněno ultrazvukovou metodou. [29]

Množství absorbované radiografické energie závisí na hustotě materiálu. Pokud jsou dva bloky, ocelový a hliníkový, o stejné velikosti vystaveny stejné intenzitě radiografického záření, hliník absorbuje méně energie a způsobí tmavší obraz kvůli nižší hustotě než má ocel. [30]

Povrch kontrolované součásti není ve většině případů nutné upravovat. Výjimkou jsou povlaky nebo povrchové vady, které kontrole mohly bránit. Kontrola se provádí v posledním úseku výroby (po broušení, tepelném zpracování, atd.), není-li stanoveno jinak. Vnitřní vady, jako například porozita, nebo struska ve svaru se na filmu projeví jako tmavší oblast. Při hodnocení těchto indikací je třeba postupovat opatrně. Falešné indikace vad mohou být způsobeny nečistotami, statickou elektřinou nebo vadou filmu, což by mohlo vézt k chybnému závěru. [30]

4.4.1 Zdroje záření:

Rentgenové záření (záření X)

Rentgenové záření je pronikající forma vysokoenergetického elektromagnetického záření o vysokých frekvencích a krátkých vlnách. Rentgenové vlnové délky jsou kratší než vlnové délky UV paprsků a obvykle delší než vlnové délky gama paprsků. [38]

Záření gama

Gama záření je pronikající elektromagnetické záření vznikající z radioaktivního rozkladu atomových jader. Skládá se z nejkratších vlnových délek elektromagnetických vln, a tak dodává nejvyšší fotonovou energii. [39]

4.4.2 Filmová radiografie

Klasický způsob záznamu rentgenového obrazu je na film. Výběr filmu a doba expozice jsou dva hlavní faktory ve filmové radiografii. Výběr rentgenového filmu pro konkrétní aplikaci je obecně kompromisem mezi požadovanou kvalitou rentgenového snímku a náklady na dobu expozice. Kvalita rentgenového snímku závisí hlavně



na hustotě filmu, gradientu a zrnitosti. Doba expozice závisí hlavně na rychlosti filmu a intenzitě záření.

Rychlost filmu

Citlivost fotografického média (např. rentgenového snímku) na světlo nebo záření. Rychlost filmu je ovlivněna velikostí krystalů halogenidu stříbra, viskozitou emulze a přítomností radiocitlivých barviv. Filmy jsou popisovány jako „rychlé“, pokud film vyžadují malé množství záření k vytvoření obrazu, a „pomalé“, pokud potřebují větší dávku záření. [31]

4.4.3 Počítačová radiografie

Počítačová radiografie (Computed radiography) je jednou z radiografických technik, které využívají opakovaně použitelný detektor skládající se z fotostimulovatelných luminiscenčních fosforů. Tyto detektory se nazývají luminescenční paměťové zobrazovací folie (IP) a používají se k získání rentgenového snímku. Digitální obraz se získá naskenováním obrazu zachyceného v citlivé vrstvě zobrazovací fólie příslušným skenerem. Obecně má systém počítačové radiografie přiměřeně nízké náklady a mnohem méně odpadu než filmový systém. Kromě toho je výstupem systému digitální obrázek uložený v počítači a dostupný pro analýzu i ze vzdálených míst. [31]

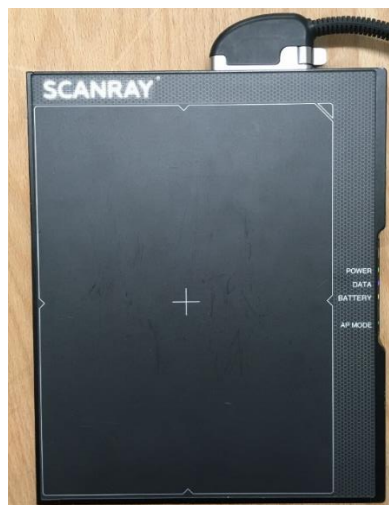


Obr. 34: Kazeta a zobrazovací fólie (převzato z [33])

4.4.4 Digitální radiografie

Digitální radiografie je jednou z technik metody prozářením, která využívá opakovaně použitelný digitální detektor (DDA). Digitální detektor je elektronické zařízení, které přeměňuje ionizující nebo pronikající záření na pole analogových signálů, které je postupně digitalizováno a přeneseno do počítače. Výsledkem je digitální obraz odpovídající vzoru energie záření dodávaným na vstupní oblast přístroje. [31]

Digitální radiografie poskytuje výhody, díky kterým je technikou volby pro prozařování rentgenovým i gama zářením. Digitální radiografické systémy se používají pro nedestruktivní testování v kusové i sériové výrobě. DDA jsou také k dispozici jako přenosná ruční zařízení, která jsou užitečná pro inspekce v terénu, například potrubí. Výstupem je stejně jako u počítačové radiografie digitální obraz uložený v počítači, který v některých případech umožňuje i automatické rozpoznávání defektů. [31]



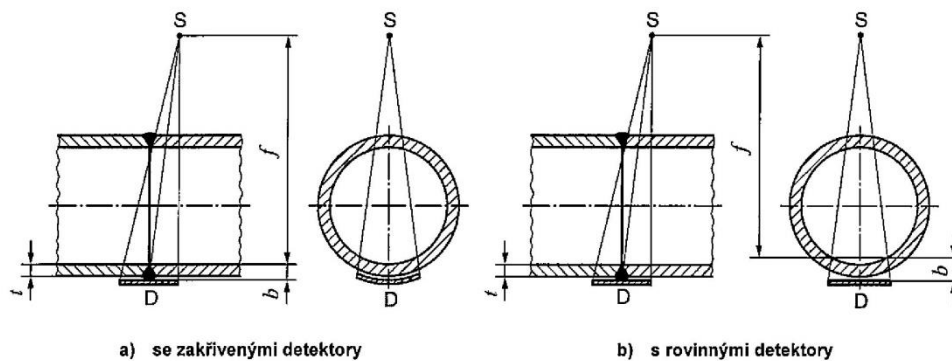
Obr. 35: Digitální detektor ScanRay

4.4.5 Doporučené techniky snímkování

Podle normy ČSN EN ISO 17636-2 (051150), *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 2: Metody rentgenového a gama záření využívající digitální detektory* se techniky snímkování dělí do dvou skupin:

- eliptická technika (dvě stěny a dva obrazy)
- kolmá technika [32]

Eliptická technika se využívá pro kontrolu svarů trubek s vnějším průměrem (D_e) menším než 100 mm, tloušťky stěn $t > 8$ mm a šířky svarů $D_e/4$. Obraz svaru se skládá ze dvou snímků vzájemně pootočených o 90° , tři snímky jsou potřeba, pokud je poměr mezi tloušťkou stěny a vnějším průměrem trubky t/D_e menší než 0,12. Sklon svazku musí být co nejmenší, ale zároveň dostatečně velký, aby nedošlo k překrytí dvou obrazů. Vzdálenost zdroj – objekt (f) by se měla udržovat co nejmenší. [32]

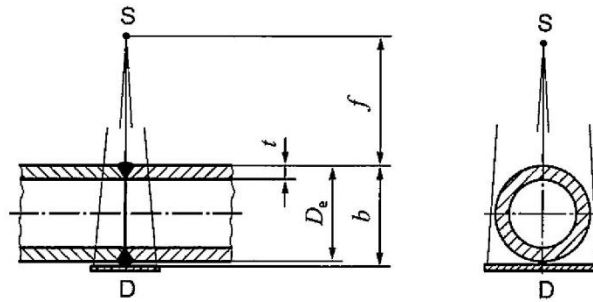


Obr. 36: Uspořádání zkoušky k eliptickému prozařování (převzato z [32])



Obr. 37: Snímek svaru technikou eliptického prozařování

Druhým způsobem prozařování je technika kolmého snímání, kterou se prozařují svary trubek do průměru 100 mm, v případě kdy je obtížné použít eliptický způsob. Tato technika vyžaduje tři snímky navzájem pootočené o 120° nebo 60° . [32]



Obr. 38: Uspořádání zkoušky ke kolmému prozařování (převzato z [32])



Mezi výhody metody prozáření patří:

- vhodná pro povrchové i vnitřní vady
- lze kontrolovat i skrytá místa
- nenáročná příprava zkoušené součásti

Nevýhody metody:

- přísná bezpečnostní opatření
- cena
- citlivost na směr vad
- požadovaná vysoká zručnost a zkušenost při expozici a vyhodnocení vad
- chybí informace o hloubce vady [15]

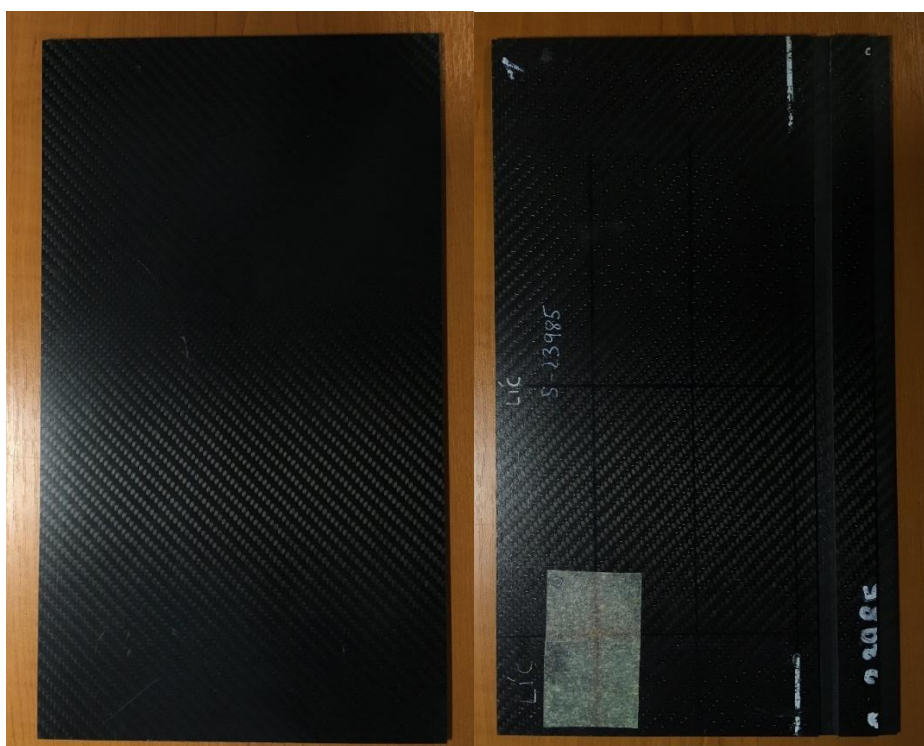


EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5 Cíle experimentální části

Tato kapitola se zabývá problémem celé práce. Porovnávají jsou zde dvě odlišné defektoskopické metody, ultrazvuková a metoda prozářením. Hlavním cílem je potvrdit hypotézu, že neexistuje univerzální metoda, která by dokázala s jistotou odhalit jakýkoliv typ vady.

Nedestruktivní zkoušky proběhly na vzorku kompozitu vyztuženým uhlíkovými vlákny (CFRP) s označením S – 23985. Ve vzorku byly uměle vytvořené vady typu delaminace a vyfrézované dvě drážky. Kontrola proběhla z rubové strany.



Obr. 39: Kompozitní vzorek S-23985, rubová a lícová strana

5.1 Schéma vad vzorku

Na tomto schématu je zobrazeno rozmístění, tvar a velikost vad. Vzorek je rozdělen do tří částí, v každé je osm uměle vytvořených delaminací různých velikostí a tvarů znázorněných na obr., vady s číselným označením 1, 3, 5 se nacházejí v hloubce

2 mm, vady označené 2, 4, 6 v hloubce 4 mm. V první části jsou delaminace dvouvrstvé s přídavným cizím materiálem, druhá část kompozitu obsahuje dvouvrstvé delaminace bez cizího materiálu a třetí část obsahuje jednovrstvé delaminace. Vyfrézované drážky mají šířku X mm a hloubku Y mm.

RUB		Kompozitový vzorek tl. 5 mm					
		Vady 2 - vrstvé + přídavný materiál		Vady 2 – vrstvé		Vady 1 - vrstvé	
		2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm
A		Φ6 mm 		Φ6 mm 		Φ6 mm 	
B		3x3 mm 		3x3 mm 		3x3 mm 	
C		6x6 mm 		6x6 mm 		6x6 mm 	
D		10x10 mm 		10x10 mm 		10x10 mm 	

Obr. 40: Schéma vad vzorku S - 23985

5.2 Použité defektoskopické metody

První zkouška proběhla metodou prozáření, konkrétně metodou digitální radiografie, která má oproti filmové radiografii výhodu v okamžitém získání výsledku. Viditelnost vad získaného snímku se dá dále upravovat za pomoci softwaru.

Pro zkoušení ultrazvukem byla zvolena impulzně odrazová technika s imerzní vazbou za použití přímé sondy. Vazebním prostředkem byla v tomto případě voda, která zde slouží k přenosu akustického signálu. Využitím přesného manipulátoru a přípravku pro sondu je zaručena neměnná vzdálenost sondy od zkoušeného vzorku. Zobrazení bylo zvoleno typu „C“. Výsledkem kontroly je tedy půdorysný průmět.

5.3 Metoda prozářením

5.3.1 Použité zařízení

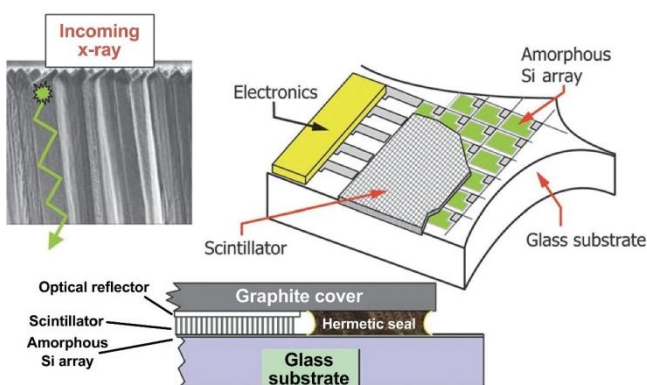
Jako zdroj záření byla použita rentgenová lampa BALTOSPOT CERAM 235 značky Balteau NDT ve společnosti ATG s.r.o., která se nejčastěji používá pro kontroly standardních, případně větších tlouštěk. Rozsah napětí má 70 kV až 235 kV a rozsah proudu 0,1 mA až 5 mA. Zdroj je ovládán pomocí bezdrátového ovladače Hand-X.

Zkouška proběhla na dvou odlišných detektorech:

- TestXRay – GW
- ScanRay

5.3.2 Digitální detektor (DDA)

Digitální detektory se v průmyslu objevují čím dál více, obzvláště díky možnosti okamžitého vytvoření snímku a opakovatelnému použití detektoru. Oproti filmům a paměťovým fóliím mohou být digitální detektory vystaveny záření po delší dobu. Tyto detektory mají ve srovnání s lineárními detektory (LDA) výhodu v množství dat zaznamenaných za jednu expozici. Digitální detektory dokážou za jednu expozici zaznamenat celou oblast zájmu, zatím co lineární pouze přímku, pro vytvoření obrazu celé oblasti zájmu lineárními detektory je zapotřebí pořídit sérii snímků. [31]



Digitální detektor (převzato z [31])

Digitální detektory však mají oproti lineárním vyšší poměr signál-šum (SNR), který určuje poměr střední hodnoty linearizovaných hodnot šedi ke směrodatné odchylce

linearizovaných hodnot šedi v dané oblasti zájmu digitálního obrazu – citováno z [37].
Lineární detektory mají značně tlustější scintilační detektor, díky kterému stačí menší dávka radiace ve srovnání s digitálními. [31]



Obr. 41: Rentgenová lampa BALTOPSPOT CERAM 235 a ovládací panel Hand-X (převzato z [34])



Obr. 42: Detektor TestXRay – GW a ScanRay



Stanovení kvality obrazu se provádí pomocí drátkových měrek dle níže uvedených norem.

ISO 19232-5:2018 Non-destructive testing — Image quality of radiographs — Part 5: Determination of the image unsharpness and basic spatial resolution value using duplex wire-type image quality indicators

Dvojdírkové měrky se používají ke stanovení základního prostorového rozlišení SR_b a SR_b^{detector} . Dvojdírková měrka umístěná na detektoru nebo kazetě stanovuje základní prostorové rozlišení detektoru SR_b^{detector} , měrka umístěná na kontrolované součásti určuje základní prostorové rozlišení obrazu SR_b . [32]

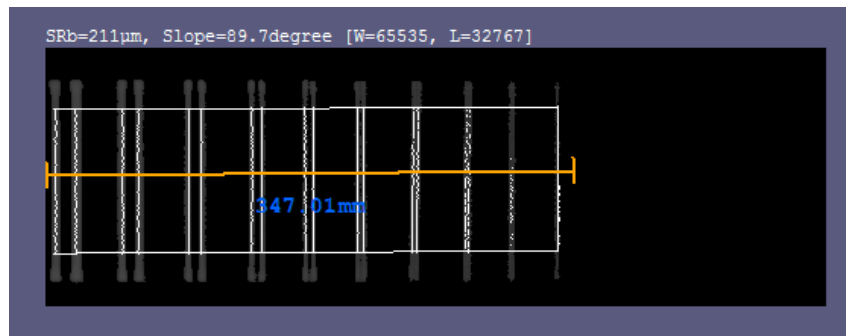


Obr. 43: Dvojdírková měrka

Dvojdírková měrka se umísťuje pod úhlem 2° až 5° ke směru řádků nebo sloupců pixelů. Pomocí měrky se stanoví vnitřní neostrost obrazu u_i a základní prostorové rozlišení je následně spočítáno pomocí vzorce:

$$SR_b = \frac{1}{2} u_i \quad (1)$$

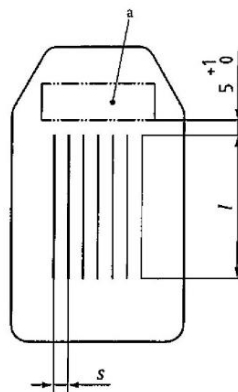
Hodnota základního prostorového rozlišení lze také určit pomocí vhodného softwaru obr. [32]



Obr. 44: Měření SRb v softwaru XVu

ČSN EN ISO 19232-1 (015031) Nedestruktivní zkoušení - Kvalita obrazu radiogramů – Část 1: Stanovení hodnot kvality obrazu drátkovými měrkami

Tato část normy uvádí prostředky a techniku k určení kvality obrazu radiogramu pomocí drátkových měrek.



Legenda

- l* délky drátků
- s* rozteč středových os drátků
- ^a místo pro identifikační označení

Obr. 45: Drátková měrka kvality obrazu (převzato z [36])

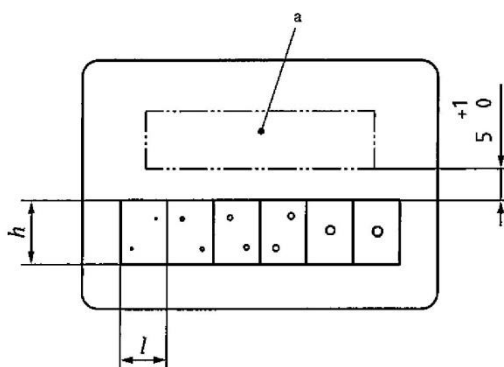
Drátky měrky jsou ze stejného materiálu a vloženy do ochranného obalu z materiálu, který nesmí ovlivnit výslednou hodnotu měrky.

Po dobu expozice musí být měrka umístěna na stranu kontrolované součásti odvrácenou od detektoru. Musí být umístěna na předmět, například svar, v oblasti zájmu, kde je nejrovnoměrnější tloušťka.

Hodnotu kvality určuje číslo nejtenčího zřetelně viditelného drátku na snímku. Délka drátku musí být na radiogramu nepřerušovaná nejméně 10 mm, aby byl snímek přijatelný. [36]

ČSN EN ISO 19232-2 (015031) Nedestruktivní zkoušení - Kvalita obrazu radiogramů – Část 2: Stanovení hodnot kvality obrazu měrkami typu stupeň/otvor

Druhá část normy také uvádí prostředky a techniku k určení kvality obrazu radiogramu avšak pomocí měrek typu stupeň/otvor.



Legenda

	Číslo měrky kvality obrazu			
	H 1	H 5	H 9	H 13
<i>h</i>	10 mm	10 mm	10 mm	15 mm
<i>l</i>	5 mm	7 mm	7 mm	15 mm
^a	místo pro identifikační značku			

Obr. 46: Obr. Měrka kvality obrazu – typ stupeň/otvor (převzato z [37])

Stupně tloušťky menší než 0,8 mm obsahují dva otvory se stejným průměrem, které mají tloušťku rovnou nebo větší 0,8 mm mají jeden. Otvory musí být kolmé vzhledem k povrchu měrky a nesmí mít sražené hrany.

Měrky se vybírají podle materiálu kontrolované součásti a její tloušťky. V ideálním případě by měrka měla mít materiál shodná s prozařovanou součástí. Umístění měrky je obdobné jako u první části této normy.

Hodnota kvality obrazu je určena podle čísla nejmenšího otvoru, který je jasně viditelný. Obsahuje-li stupeň dva otvory, musí být viditelné oba. [37]

5.4 Postup skenování

Nejdříve je potřeba zahřát zdroj rentgenového záření po dobu dvanácti minut, poté je připraven na pracovní zátěž. Vzorek je větší než snímací pole detektoru, proto je potřeba jej snímat vícekrát. Kvůli lepší přehlednosti je vzorek polepen olověnými značkami.

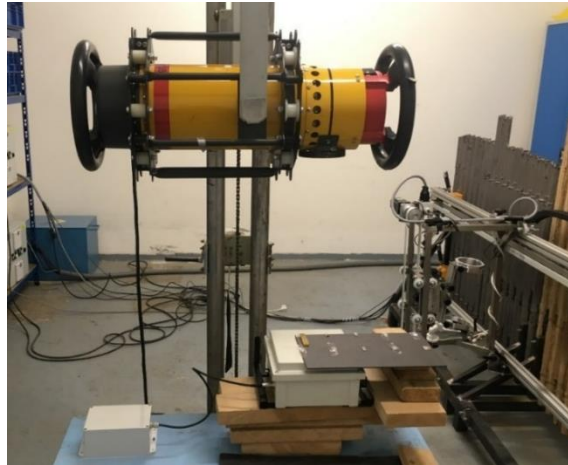
Detektor byl umístěn pod zdroj rentgenového záření a na něj položen skenovaný vzorek. Vzdálenost detektoru od zdroje záření je 620 mm. Na ovládacím panelu byly nastaveny parametry zdroje uvedené v tab. 1, poté nastalo samotné snímání vzorku.

Tabulka 1: Parametry nastavené na zdroji

Napětí na zdroji U [kV]	90
Proud na zdroji I [mA]	0,8
Vzdálenost zdroj – objekt f [mm]	620



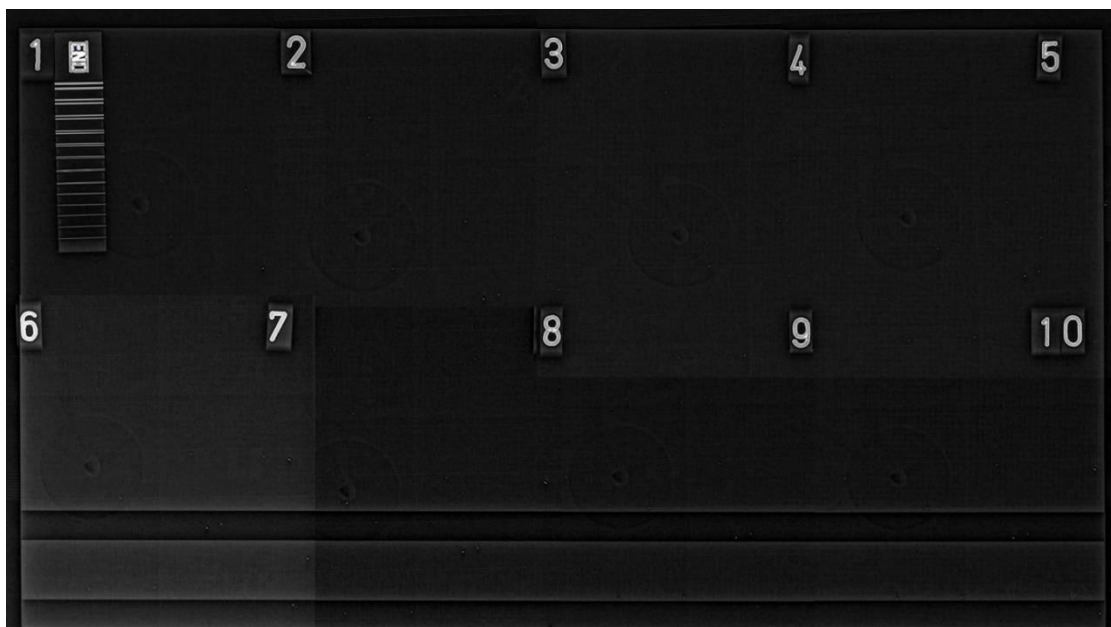
Obr. 47: Vzorek s číselným označením a dvojdřátkovou měrkou



Obr.: 48: Postup snímkování

Snímek pořízený na digitálním detektoru TestXRay – GW

Z hledaných vad na obrázku složeném z osmi snímků jsou vidět pouze vyfrézované drážky, delaminace detektor TestXray – GW nezaznamenal. Dvojdírková měřka se běžně nepoužívá pro kompozitní materiály, mnou byla zvolena kvůli stanovení orientační kvality obrazu. Dále je na snímcích vidět tzv. burn-in-effect (česky duch), který patří do nemechanických artefaktů zobrazení. Tento jev je způsobený zbytkovým signálem z předchozího snímání, přetrvává i po ukončení expozice.



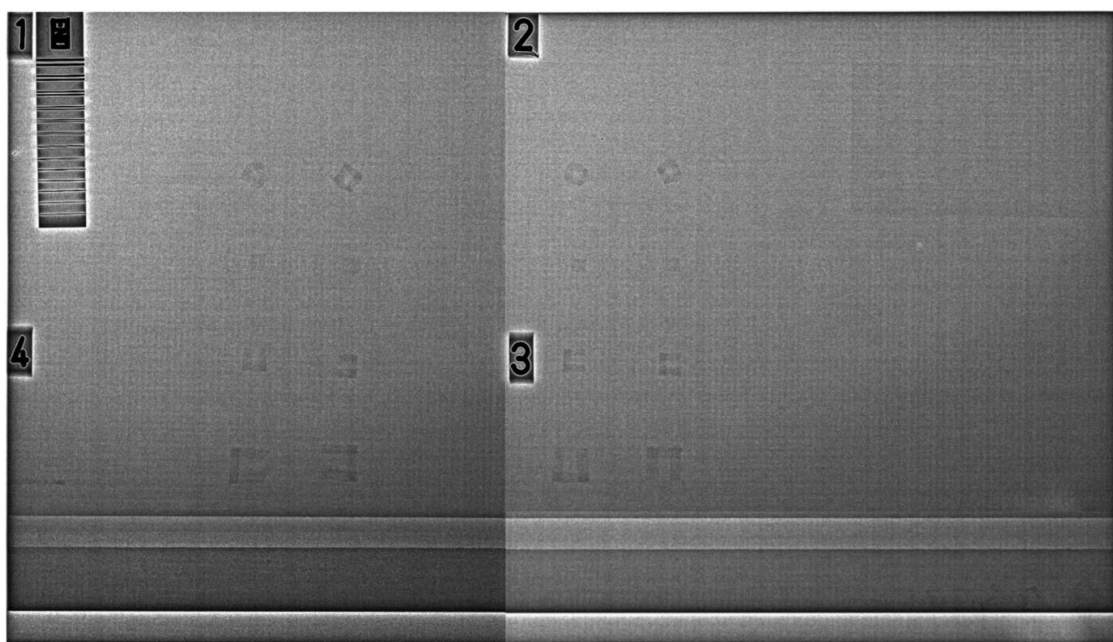
Obr. 49: Snímek pořízený detektorem TestXRay – GW



Druhé skenování metodou digitální radiografie bylo provedeno se stejným zdrojem RTG záření a stejnými parametry, avšak na detektoru ScanRay, který má lepší prostorové rozlišení, typ scintilátoru Gd₂O₂S:Tb (Gadolinium oxysulfide) a větší pole snímání, které umožnilo vzorek skenovat pouze na čtyři snímky. Skenování probíhalo obdobně jako na detektoru TestXRay – GW.

Snímek pořízený na digitálním detektoru ScanRay

Na těchto snímcích pořízených na detektoru ScanRay lze vidět vyfrézované drážky a obě části kompozitu s dvouvrstvými delaminacemi, u kterých je i zřetelně vidět jejich velikost a tvar, jednovrstvé nebyly detektorem zachyceny. Lze tedy říct, že pro kompozitní materiály je vhodnější detektor ScanRay.



Obr. 50: Snímek pořízený detektorem TestXRay – GW



5.5 Ultrazvuková metoda

5.5.1 Použité zařízení

Prozvučování proběhlo ve společnosti ATG s.r.o., pomocí manipulátoru určeného k ultrazvukovým zkouškám. Zařízení je schopné pohybu sondy s přesností setin milimetru ve třech souřadnicích x, y, z.



Obr. 51: Ultrazvukový manipulátor

Ke kontrole vzorku byla použita přímá imerzní sonda společnosti SONATEST. Tato sonda je vysoce tlumená a obsahuje kruhový měnič z olovnatého metaniobátu a čelo z epoxidové pryskyřice.

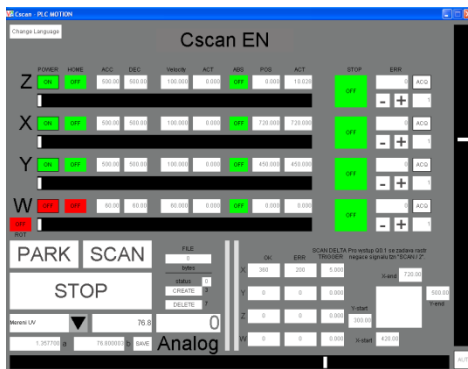


Obr. 52: Imerzní sonda SONATEST SLIH5 – 20

Tabulka 2: Parametry použité sondy

Sonda	Frekvence f [MHz]	Průměr d [mm]
SLIH5-20	5	20

K ovládání manipulátoru byl použit software Cscan-PLC MOTION. Pomocí kterého byla nastavena rychlost pohybu sondy, a souřadnice hran vzorku. Dále byl použit program společnosti ATG s.r.o., ve kterém lze nastavit zesílení, nastavení bran, sampling, barevné rozhraní vad, aj.

Obr. 54: Ovládací program Cscan-
PLC MOTION

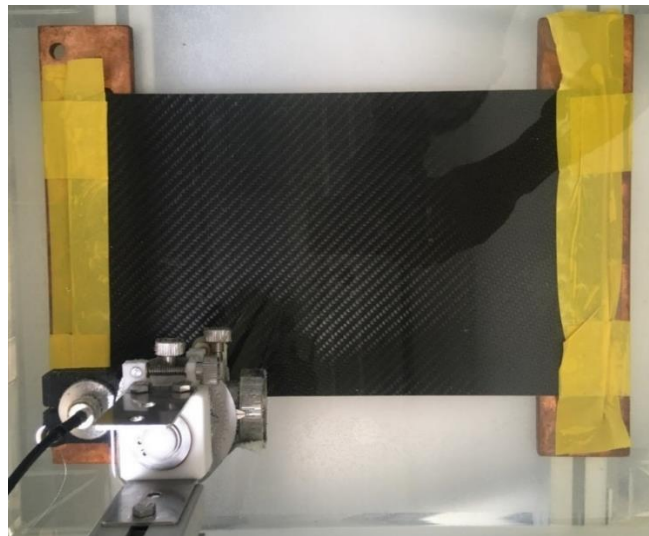
Obr. 53: Ovládací program společnosti ATG s.r.o.

5.5.2 Postup skenování

Do nádoby, ve které byla napuštěna kohoutková voda, byl vložen kompozit přichycený ke dvěma měděným deskám. Sonda byla upevněna do přípravku manipulátoru a následně byla zkontrolována její kolmost vůči vzorku. Dále byly nastaveny brány:

- Vstupního echa – žlutá barva
- Výstupního echa – modrá barva
- Vadového echa – červená barva

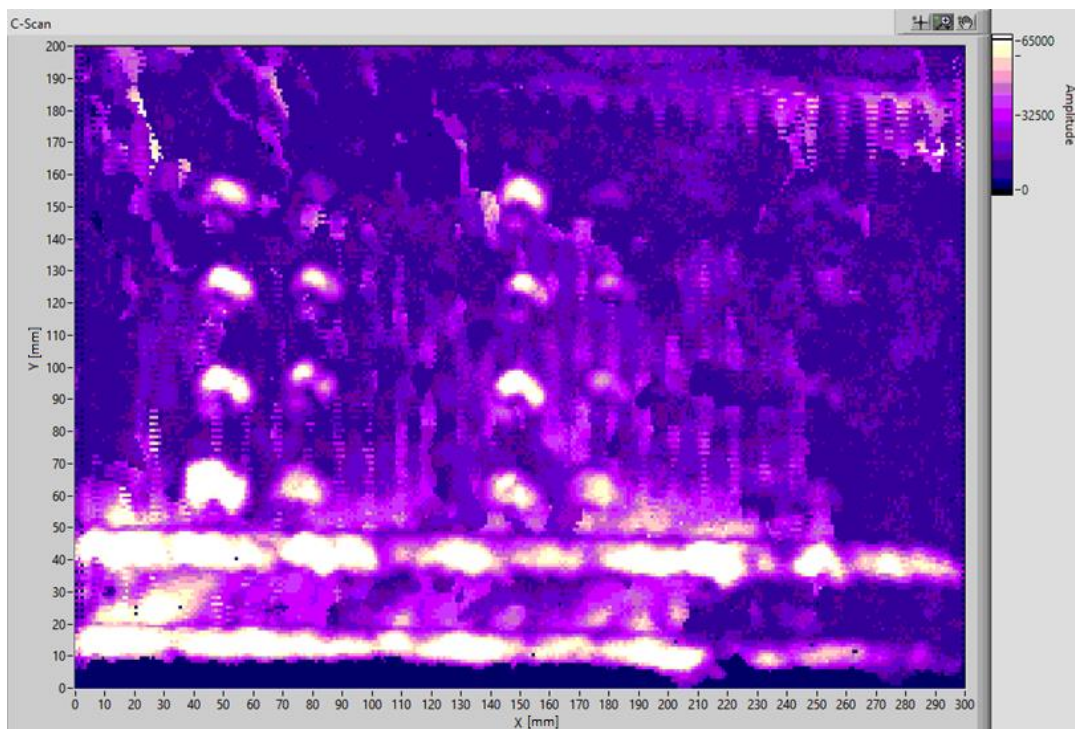
Poté bylo nastaveno zesílení a funkce sampling, která určuje vzdálenost mezi snímky pořízenými programem.



Obr. 55: Sestava UT zkoušení

5.5.3 Výsledek prvního skenování

Na snímku lze vidět drážky a částečně dvouvrstvé delaminace, jednovrstvé nebyly při tomto měření odhaleny. Kromě vad je na snímku velké množství šumu, který je způsoben vzduchovými bublinami zachycenými na sondě a vzorku, protože voda nebyla dostatečně dlouho odstátá.



Obr. 56: Výsledek prvního prozvučování za přítomnosti vzduchových bublin

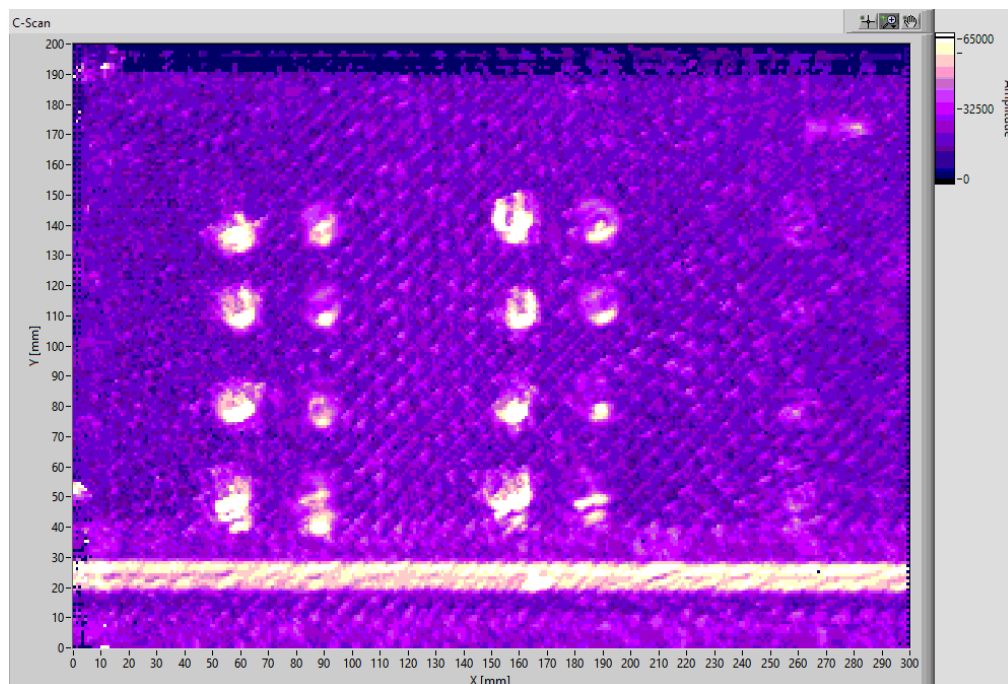
Vzduchové bubliny byly ze sondy i kompozitového vzorku štětcem setřeny a měření proběhlo ještě jednou se stejně nastavenými parametry.



Obr. 57: Vzduchové bubliny na sondě a vzorku

5.5.4 Výsledek druhého skenování

Na druhém snímku lze už zřetelně vidět polohu dvouvrstvé delaminace a drážka. Jednovrstvé delaminace lze vidět pouze nepatrně. Tvar a velikost jednotlivých vad je zobrazen neuspokojivě. Míra šumu je po setření vzduchových bublin značně menší.



Obr. 58: Výsledek prozvučování po setření vzduchových bublin



5.6 Vyhodnocení experimentu

Cílem experimentu bylo porovnání dvou různých defektoskopických metod, kterými se kontroloval vzorek z kompozitního materiálu s polymerní matricí vyztužen uhlíkovými vlákny (CFRP). Pro metodu prozářením byly použity dva digitální detektory, TestXray-GW a ScanRay a pro ultrazvukovou metodu byla použita sonda SONATEST SLIH5-20.

Ačkoli je metoda prozářením velice využívána pro různé druhy svarů, zde lze vidět, že pro kompozitní materiály není ideální volbou, hlavně pro plošné vady jako jsou delaminace. Detektor TestXray-GW nedokázal zaznamenat žádnou z uměle vytvořených delaminací, zatím co na snímcích detektoru ScanRay jsou vidět alespoň dvouvrstvé vady. Avšak oproti ultrazvukové metodě je u vad jasně vidět jejich tvar i velikost. Jednovrstvé delaminace však nebyly nalezeny ani jedním detektorem, v praxi by to znamenalo přehlédnutí závažné vady, což by mohlo vézt k destrukci dílu. Byla by metoda prozářením zvolena ke kontrole kompozitních dílů, měla by být použita jako doplňková metoda.

Metodou ultrazvukovou byly nalezeny všechny dvouvrstvé a částečně i jednovrstvé delaminace. Z důvodu nedostatečného vybavení není obraz jednovrstvých vad zřetelně viditelný. Dalším důvodem neuspokojivého výsledku prvního prozvučování je zvolení nedostatečně odstáté kohoutkové vody místo demineralizované. Na vzorku a na sondě se tvořily vzduchové bubliny, které ve výsledku vyvolávaly dojem šumu nebo vady. V praxi by vzduchové bubliny mohly indikovat vadu i v dílu bez defektu. Po setření bublin byl obraz prozvučování uspokojivější. Vady byly jasně rozeznatelné od základního materiálu.

Kompozitní díly by tedy nemohly být kontrolovány samostatně metodou ultrazvukovou nebo prozářením. Vhodnou kombinací metod by mohla být metoda vizuální nebo kapilární k odhalení povrchových vad společně s metodou ultrazvukovou, pomocí které by se našly vady vnitřní. Avšak jak lze vidět na prvním prozvučování, je nutné, aby personál vyhodnocující zkoušku měl dostatek znalostí a zkušeností. Mohlo by dojít k záměně vzduchových bublin nebo jiných nečistot za vady.



Závěr

V rešeršní části by popsány kompozitní materiály s polymerní maticí vyztužené vlákny nebo částicemi, výrobní vady, vady vzniklé při provozu a způsoby namáhání, které tyto vady způsobují. Dále se tato část zabývala defektoskopickými metodami vhodnými pro zkoušení kompozitních materiálů a jejich podrobnější popis. V experimentální části bylo provedeno snímání metodou prozáření na dvou digitálních detektorech (TestXray-GW a ScanRay) a ultrazvukovou metodou, impulzně odrazovou technikou v imerzi, tedy ve vodě, zobrazením typu C. Prozvučování proběhlo pomocí přímé imerzní sondy SLIH5-20. Výsledkem byly dva snímky z metody prozáření a jeden z ultrazvukové metody, které mezi sebou byly porovnávány.

Z výsledných snímků se ukázalo, že ultrazvuková metoda je vhodnější pro kontrolování kompozitů, konkrétně plošných vad, více než metoda prozáření. Pro tenké díly, kde nejčastějším typem vady je delaminace, není metoda prozáření vhodná. Avšak ultrazvuková metoda nestačí jako jediný způsob kontroly. Ideálním stavem by bylo použít ultrazvukovou metodu v kombinaci s vizuální nebo kapilární zkouškou. Dále jsem dospěl k závěru, že obě metody vyžadují zručný a zkušený personál, jelikož by mohlo dojít k falešné indikaci vady vlivem lidského faktoru (neotření vzduchových bublin vytvořených na vzorku a sondě).

V praxi se pro tenké díly o větších plochách, například lopatky letadlových motorů, používá právě ultrazvuková metoda s úplným ponořením v imerzi. Pro díly, které nesmí být ponořeny do vody, se používá prozvučování ostřikem, nebo bezkontaktně. Vzhledem k dostupnému vybavení a podmínkám prozvučování byl výsledek druhého skenování ultrazvukovou úspěšným. Pro příští skenování by bylo vhodné zvolit více sond různých parametrů a porovnat výsledky měření.



SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KORÍNEK, Zdeněk. Kompozity: Matrice [online]. 2016 [cit. 2020-07-27].
Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz>
- [2] PAPER PRESENTATION TOPICS FOR MECHANICAL ENGINEERING [online]. In: .
[cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://mechpapers.blogspot.com/>
- [3] Fillers in PVC - A Review of the Basics [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné
z: <https://www.scribd.com/document/385349450/Fillers-in-PVC-A-Review-of-the-Basics-pdf>
- [4] SPIE [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z:
<https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-Astronomical-Telescopes-Instruments-and-Systems/volume-1/issue-03/034003/Studies-of-the-moisture-absorption-of-thin-carbon-fiber-reinforced/10.1117/1.JATIS.1.3.034003.full?SSO=>
- [5] HAYES, S BRIAN, GAMMON a M LUTHER. Introduction— Composite Materials and Optical Microscopy. Optical Microscopy of Fiber-Reinforced Composites. 1. Ohio: ASM International, 2010, s. 5. ISBN 978-1-61503-044-6.
- [6] MILITARY HANDBOOK. MILITARY HANDBOOK: FOR STRUCTURAL COMPOSITES NONDESTRUCTIVE ACTIVE TESTING TECHNIQUES [online]. U.S. Department of Defense: U.S. Department of Defense, 1989, s. 1-4 [cit. 2020-07-12]. ISBN 978-1-59124-187-4. Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00579M81/military-handbook-mil-6/composite-materials>
- [7] TMR Research Blog: Increase of End-Use Applications Boosts the Glass Fiber Textile Market [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z:
<https://tmrresearchblog.com/increase-of-end-use-applications-boosts-the-glass-fiber-textile-market/>



- [8] PRIM ORIGINAL: PRIM Carbon Fiber [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://prim-hodinky.cz/prim-carbon-fiber/>
- [9] VEBA: Materiály [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/materialy>
- [10] MANRAL, Ankit, Vijay CHAUDHARY a Pramendra Kumar BAJPAI. A review on composite defects, remedies and its detection techniques [online]. G.L. Bajaj Institute of Technology & Management, Greater Noida (U.P) India: ICCEMME, 2017 [cit. 2019-12-05]. ISBN 978-93-86171-85-6. Dostupné z: www.conferenceworld.in
- [11] SMITH, Roland A. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: COMPOSITE DEFECTS AND THEIR DETECTION [online]. 3. EOLSS Publications [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-36-04-03.pdf>
- [12] KADLEC, Matrin. Fraktografie vláknových kompozitů na bázi epoxid/uhlík pro letecké aplikace. Transfer [online]. 2012, 2012(17), 35 - 38 [cit. 2020-03-02]. ISSN 1801 - 9315. Dostupné z: <file:///E:/ATG/BP/PDF/TRANSFERInekFraktografie2012.pdf>
- [13] Greenhlagh E.S.: Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites. 1st. ed. Cambridge, Woodhead Publishing, 2009. 608 s. ISBN 978-1845692179.
- [14] ASCE LIBRARY: Macromechanical Approach to Modeling Barely Visible Damage in Braided Composites [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29AS.1943-5525.0000375>
- [15] NDT Welding Bulletin: Rešerše NDT metod používaných v letectví [online]. 2011, 2011(3) [cit. 2020-06-16]. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.vzlu.cz/download.php?file=684>
- [16] DA SILVA, António José Ramos. Detection and Characterization of Defects in Composite Materials Using Thermography. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, 2016. Disertační práce. FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.



- [17] Žbánek, P.; Blahušek, J.; Matoušek, J.; Zavadil, T. ULTRAZVUKOVÁ METODA STUPEŇ I, II; ATG s.r.o.: Praha, 2017.
- [18] ČSN EN 13018 (015037): Nedestruktivní zkoušení - Vizuální zkoušení - Obecné zásady. 1. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [19] NON DESTRUCTIVE TESTING: Ultrasonic Testing [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html
- [20] ENVIROMENTÁLNÍ HROZBY A RIZIKA: ZEMETŘESENÍ [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: https://sites.google.com/site/zemetreseni01/seismicke_vlny
- [21] RESEARCHGATE: ZEMETŘESENÍ [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Lamb-wave-mode-shapes_fig1_270579433
- [22] NOVOTEST: BASICS OF ACOUSTICS: Attenuation And Interaction Of Waves With The Boundary Between Two Media [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://novotest.biz/basics-of-acoustics-1-5-attenuation-and-interaction-of-waves-with-the-boundary-between-two-media/>
- [23] Zkoušky bez porušení materiálu: Nedestruktivní zkoušky [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_5_SPU-zkousky_bez_poruseni_materialu.pdf
- [24] OVMT Zkoušky bez porušení materiálu [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4239328-Ovmt-zkousky-bez-poruseni-materialu.html>
- [25] KREIDL, M., ŠMÍD, R. Technická diagnostika. 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-KREIDL, M., ŠMÍD, R. Technická diagnostika. 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-66
- [26] INTRODUCTION TO NDT [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://engineeringinfo.co.za/engineer-technical-handbook-archive/plant-process-maintenance-archive/ndt-p-9/>



- [27] OLYMPUS: ULTRASONIC TRANSDUCERS [online]. In: . [cit. 2020-07-27].
Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/cs/.downloads/download/?file=285213009&fl=en_US
- [28] SONATEST: TRANSDUCERS [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z:
<https://sonatest.com/>
- [29] INGE. Fabrication page. LOTSBERG a INGE. Fatigue Design of Marine Structures. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2016, s. 336. ISBN 978-1-107-12133-1.
- [30] Principles of Radiographic Testing. Nondestructive Testing Methods. 1. Ohio: Hobart Institute of Welding Technology, 2009, s. 30-33. ISBN 978-1-107-12133-1.
- [31] Radiography. ASM Handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation of Materials. 17. Ohio: ASM International, 2018, s. 338-349. ISBN 978-1-62708-152-8.
- [32] ČSN EN ISO 17636-2 (051150): Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 2: Metody rentgenového a gama záření využívající digitální detektory. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [33] DUR NDT: IMAGING PLATES [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z:
<https://www.duerr-ndt.com/downloads/imaging-plates.html>
- [34] BALTEAU NDT [online]. In: . [cit. 2020-07-27]. Dostupné z:
<https://www.balteau-ndt.com/>
- [35] ASTM E2736 - 17: Standard Guide for Digital Detector Array Radiography. 1. Spojené státy americké: ASTM International, 2018.
- [36] ČSN EN ISO 19232-1 (015031): Nedestruktivní zkoušení - Kvalita obrazu radiogramů - Část 1: Stanovení hodnot kvality obrazu drátkovými měrkami. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.



- [37] ČSN EN ISO 19232-2 (015031): Nedeštruktivní zkoušení - Kvalita obrazu radiogramů - Část 2: Stanovení hodnot kvality obrazu měrkami typu stupeň/otvor. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [38] MACDONALD a A CAROLYN. Introduction. Introduction to X-ray Physics, Optics, and Applications. 1. Princeton: Princeton University Press, 2017, s. 1-9. ISBN 978-0-691-13965-4.
- [39] KENNEDY a MARTIN. Spectral Gamma Ray page. Developments in Petroleum Science, Volume 62: Practical Petrophysics. 62. Amsterdam: Elsevier, 2015, s. 101-105. ISBN 978-0-444-63270-8.



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Kompozit vyztužený vlákny (upraveno podle [2])	10
Obr. 2: Kompozit vyztužený částicemi (upraveno podle [2])	11
Obr. 3: Aspektivní poměr (upraveno podle [3])	12
Obr. 4: Skladba vrstev kvazi – izotropního laminátu (převzato z [5]).....	14
Obr. 5 Skleněná vlákna (převzato z [7])	15
Obr. 6: Uhlíková vlákna (převzato z [8])	15
Obr. 7: Polymerní (aramidová) vlákna (převzato z [9])	16
Obr. 8: Snímek pórovitosti na kompozitním vzorku	17
Obr. 9: Typy mechanismů poruch podle polohy ve vrstvách laminátu (převzato z [13])	20
Obr. 10: Barely – visible impact damage a visible impact damage (převzato z [14]).....	22
Obr. 11: Lom vláken způsobený tahovým zatížením a rozdělení vláken ve svazku způsobené příčnými mikrotrhlinami (převzato z [12])	22
Obr. 12: Mikrozborcení vláken a vznik dutiny ve svazku (převzato z [12])	23
Obr. 13: Diagonální mikrotrhliny rozdělující vlákna ve svazku (převzato z [12])	23
Obr. 14: Pozorování povrchu při přímé vizuální kontrole (převzato z [15]).....	26
Obr. 15: Princip ultrazvukové metody (převzato z [19])	28
Obr. 16: Podélná vlna (převzato z [20])	29
Obr. 17: Příčná vlna (převzato z [20])	29
Obr. 18: Rayleighova vlna (upraveno podle [20]).....	30
Obr. 19: Lambova symetrická a asymetrická vlna (převzato z [21]).....	30
Obr. 20: Rozptyl akustické vlny (upraveno podle [22])	31
Obr. 21: Ultrazvukové zkoušení průchodovou technikou (upraveno podle [23]).....	32
Obr. 22: Ultrazvukové zkoušení impulzně odrazovou technikou (upraveno podle [24])	33
Obr. 23: Základní typy akustických vazeb Z_a – akustický odpor vzduchu, Z_m – akustický odpor materiálu (upraveno podle [24], [25])	Chyba! Záložka není definována.



Obr. 24: Přejchodové ztráty ultrazvuku na různých jakostech povrchu (převzato z [17])	36
Obr. 25: A-zobrazení, IP – počáteční puls, BW – koncové echo (upraveno podle [26]).	36
Obr. 26: B-zobrazení (upraveno podle [26])	37
Obr. 27: C - zobrazení (upraveno podle [26])	37
Obr. 28: Ultrazvukový defektoskop (převzato z [17])... Chyba! Záložka není definována.	
Obr. 29: Přímé imerzní sondy Olympus (upraveno podle [27])	39
Obr. 30: Uhlové sondy s vyměnitelným klínem Sonatest (převzato z [28])	40
Obr. 31: Uhlové sondy s trvale připojeným klínem Sonatest (převzato z [28])	41
Obr. 32: Fokusuující imerzní sondy – bodově a přímkově fokusovaná (převzato z [27]).	41
Obr. 33: Princip kapilární metody (převzato z [15])	43
Obr. 34: Kazeta a zobrazovací fólie (převzato z [33])	45
Obr. 35: Digitální detektor ScanRay	46
Obr. 36: Uspořádání zkoušky k eliptickému prozařování (převzato z [32])	47
Obr. 37: Snímek svaru technikou eliptického prozařování	47
Obr. 38: Uspořádání zkoušky ke kolmému prozařování (převzato z [32])	48
Obr. 39: Kompozitní vzorek S-23985, rubová a lícová strana	50
Obr. 40: Schéma vad vzorku S - 23985	51
Obr. 41: Rentgenová lampa BALTOSPOT CERAM 235 a ovládací panel Hand-X (převzato z [34])	53
Obr. 42: Detektor TestXRy – GW a ScanRay	53
Obr. 43: Dvojdrtková měřka	54
Obr. 44: Měření SRb v softwaru XVu	55
Obr. 45: Drátková měřka kvality obrazu (převzato z [36])	55
Obr. 46: Obr. Měřka kvality obrazu – typ stupeň/otvor (převzato z [37])	56
Obr. 47: Vzorek s číselným označením a dvojdrtkovou měrkou	57
Obr.: 48: Postup snímkování	58
Obr. 49: Snímek pořizený detektorem TestXRy – GW	58
Obr. 50: Snímek pořizený detektorem TestXRy – GW	59
Obr. 51: Ultrazvukový manipulátor	60



Obr. 52: Imerzní sonda SONATEST SLIH5 – 20.....	60
<i>Obr. 53: Ovládací program společnosti ATG s.r.o.</i>	Chyba! Záložka není definována.
<i>Obr. 54: Ovládací program Cscan-PLC MOTION.....</i>	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 55: Sestava UT zkoušení	62
Obr. 56: Výsledek prvního prozvučování za přítomnosti vzduchových bublin.....	62
Obr. 57: Vzduchové bubliny na sondě a vzorku	63
Obr. 58: Výsledek prozvučování po setření vzduchových bublin	63