



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH METODIKY ULTRAZVUKOVÉHO TESTOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH VRTULÍ

METHODOLOGY DESIGN OF ULTRASOUND TESTING OF COMPOSITE PROPELLERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Horňák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Katrňák

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Pavel Horňák**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Katrňák**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh metodiky ultrazvukového testování kompozitních vrtulí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ultrazvuková zkouška je jednou ze základních metod nedestruktivního testování materiálů, která umožňuje zjistit přítomnost vnitřních vad materiálu. Její uplatnění je významné zejména při zkoušení nekovových kompozitních materiálů. Práce je zaměřena na zpracování obecného přehledu metod nedestruktivního testování laminátů, klasifikaci typů vad a návrh praktické metodiky pro zkoušení vrtulí ultrazvukem, tedy popis vzorku, testovacího zařízení, návrh postupu měření, kalibrace a vyhodnocení dat.

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod do konstrukčních a materiálových řešení vrtulí.
2. Přehled metod nedestruktivního testování laminátů a typů vad.
3. Návrh metodiky pro zkoušení vrtulí ultrazvukem.
4. Návrh postupu kalibrace a vyhodnocení dat.

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook. Volume 21, Composites. Materials Park: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-703-9.

KOPEC, Bernard a Bohumil BRODSKÝ. Nedestruktivní zkoušení: Defektoskopie. 2. doplněné vydání. Brno: Česká společnost pro nedestruktivní testování, 2015. ISSN 1213-3825.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Nedestruktivní testování je v oblasti leteckých kompozitů velkým pojmem. Zvláště pak metoda ultrazvukové defektoskopie, jejíž aplikace na laminátové letecké vrtule je hlavním zájmem této práce. Úvodní kapitoly seznamují s leteckými vrtulemi a materiálem používaným pro jejich výrobu. Zaměřeno je pak na proces výroby laminátových vrtulí z uhlíkových a skleněných vláken. Z výběru nedestruktivních metod je následně sestavena doporučená metodika spoléhající zejména na ultrazvukovou defektoskopii. Vybrané zařízení Dolphicam 2+ je zde se svými funkcemi představeno a jeho nastavení kalibrováno na vyrobeném testovacím vzorku obsahujícím předem definované umělé vady struktury. Zhodnocení ukazuje značné zlepšení viditelnosti jednotlivých defektů umístěných v různých hloubkách využitím kalibrovaného nastavení. Zlepšení je kvantifikováno přírůstkem amplitudy přijímaného signálu v porovnání s nastavením výchozím. Výsledným výstupem jsou specifická doporučení jak pro změny v nastavení, tak metodiky ultrazvukového testování vrtulí společně s reálnou aplikací. Práce tak slouží jako šablona postupu ultrazvukové defektoskopie laminátových vrtulí nejen zmíněným zařízením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ultrazvuková defektoskopie, vrtule, metodika nedestruktivního testování, laminát, kompozit

ABSTRACT

Non-destructive testing is a big concept in the field of aerospace composites. In particular, the ultrasonic defectoscopy method, the application of which to laminate aircraft propellers is the main interest of this paper. The introductory chapters introduce the propellers and the material used for their manufacturing. The focus is then on the process of manufacturing laminate propellers from carbon and glass fibre. From a selection of non-destructive methods, a recommended methodology relying mainly on ultrasonic defectoscopy is compiled. The selected Dolphicam 2+ device is described with its features and its settings calibrated on a manufactured test specimen containing predefined artificial structure defects. The evaluation shows a significant improvement in the visibility of individual defects located at different depths by using the calibrated setup. The improvement is quantified by the amplitude gain of the received signal compared to the signal captured using the default setting. The resulting output are specific recommendations for both setup changes and propeller ultrasonic testing methodologies along with real-world application. The work thus serves as a template for ultrasonic defectoscopy of laminate propellers not only for the device mentioned.

KEY WORDS

Ultrasonic defect detection, propeller, non-destructive testing methodology, laminate, composite

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Návrh metodiky ultrazvukového testování kompozitních vrtulí* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 25. května 2023

Pavel Horňák

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORŇÁK, Pavel. *Návrh metodiky ultrazvukového testování kompozitních vrtulí* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149272>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Tomáš Katrňák.

PODĚKOVÁNÍ

Mé díky patří firmě Mejlík Propellers s.r.o., která mi umožnila využití jejich prostředků pro zpracování této práce. Dále děkuji svému vedoucímu panu Ing. Tomáši Katrňákovi za jeho vstřícnost, připomínky a rady. V poslední řadě děkuji přátelům, kteří mě doprovázeli studiem a mé rodině za veškerou podporu při studiu.

**OBSAH**

1. ÚVOD	3
2. ÚVOD DO KONSTRUKČNÍCH A MATERIÁLOVÝCH ŘEŠENÍ LETECKÝCH VRTULÍ.....	4
2.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	4
2.1.1 Základní pojmy	4
2.1.2 Druhy vrtulí	4
2.1.3 Síly působící na vrtuli	5
2.2 MATERIÁLOVÉ ŘEŠENÍ.....	6
2.2.1 Dřevěné vrtule	6
2.2.2 Vrtule z hliníku a jeho slitin.....	7
2.2.3 Kompozitní vrtule	7
3. PŘEHLED METOD NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ LAMINÁTŮ	13
3.1 ÚVOD DO NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ.....	13
3.2 PŘEHLED TYPŮ VAD LAMINÁTŮ	13
3.3 VIZUÁLNÍ METODA	15
3.4 LOKÁLNÍ AKUSTICKÁ SPEKTROSKOPIE.....	15
3.5 ELEKTROMAGNETICKÁ METODA.....	16
3.6 INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE	17
3.7 RADIOGRAFIE	18
3.8 ULTRAZVUKOVÁ DEFEKTOSKOPIE	18
4. NÁVRH METODIKY NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ LAMINÁTOVÝCH VRTULÍ	21
4.1 VÝBĚR METOD NDT	21
5. NÁVRH POSTUPU KALIBRACE A VYHODNOCENÍ DAT ULTRAZVUKOVÉ METODY.....	23
5.1 POPIS ZAŘÍZENÍ A SONDY	23
5.2 POPIS ZOBRAZOVACÍHO PROGRAMU A JEHO FUNKCÍ	23
5.2.1 A–sken	24
5.2.2 B–sken	25
5.2.3 C–sken	25
5.2.4 Digitální přírůstek a časově korigovaný digitální přírůstek.....	26
5.2.5 Průměrování signálu	27
5.2.6 Digitální FIR filtr.....	27
5.3 NÁVRH A VÝROBA TESTOVACÍHO VZORKU	28



5.4	POSTUP KALIBRACE A VÝSLEDKY	32
5.4.1	<i>Kalibrace nastavení</i>	32
5.4.2	<i>Výsledky kalibrace na testovacím vzorku</i>	35
5.4.3	<i>Zhodnocení</i>	38
6.	DOPORUČENÁ METODIKA TESTU LAMINÁTOVÝCH VRTULÍ ULTRAZVUKOVOU DEFEKTOSKOPIÍ	39
6.1	NASTAVENÍ ZAŘÍZENÍ	39
6.2	POSTUP TESTOVÁNÍ.....	39
7.	REÁLNÝ TEST VRTULE	42
8.	ZÁVĚR	47
9.	POUŽITÁ LITERATURA	48

1. ÚVOD

Kompozity jsou v letectví hojně využívaným materiálem pro nejrůznější aplikace. To zvláště díky značné úspoře na hmotnosti součásti bez ztráty tuhosti a dalších důležitých mechanických vlastností. Jedním z mnoha výrobků, který je dnes vyráběn z kompozitních materiálů, a to převážně z uhlíkových a skleněných vláken, jsou letecké vrtule. Ty jsou označovány podle základního druhu výroby také jako laminátové. Ruční výroba má však mnoho nedostatků, a tak není možno dosáhnout stoprocentně stejných a bezchybných výrobků. Proto je v zájmu každého výrobce zajistit vhodné metody kontroly kvality pro zaručení bezpečnosti při přepravě osob a nákladu.

Nedílnou součástí této kontroly kvality je nedestructivní testování, které nabízí široké spektrum metod pro hodnocení stavu a hledání defektů testovaného kusu. Ne každá je však použitelná pro aplikaci na kompozitních materiálech a na složité geometrii vrtulí. Proto je nutno zvolit vhodnou kombinaci metod, což vyžaduje dostatek znalostí a zvážení mnoha proměnných. Mezi ty nejpoužívanější metody pro testování leteckých kompozitů se řadí metoda ultrazvukové defektoskopie, jejíž metodika a využití pro testování vrtulí musí být blíže specifikována.

Úvodní část práce se okrajově věnuje konstrukci a materiálům využívaných pro výrobu leteckých vrtulí, se zaměřením na kompozitní materiály a možnostem v oblasti nedestructivního testování. Dále je popsána cesta při volení metodiky nedestructivního testování vrtulí na základě schopnosti odhalit různé typy vad jednotlivými metodami.

Praktická část je soustředěna na zařízení Dolphicam 2+ od norského výrobce Dolphitech, jehož výchozí nastavení je vhodné pro mnoho aplikací na kompozitech, avšak nedokonalé pro specifické požadavky testování vrtulí. Jedním z cílů je analyzovat vlivy jednotlivých nastavitelných hodnot zařízení a ty korigovat na testovacím vzorku tak, aby došlo k nejlepšímu možnému zobrazení vad struktury. Po kalibraci je nutné zhodnotit data, navrhnout metodiku zkoušení vrtulí zmíněným zařízením, definovat doporučené postupy a prakticky ověřit správnost postupů na reálné aplikaci.

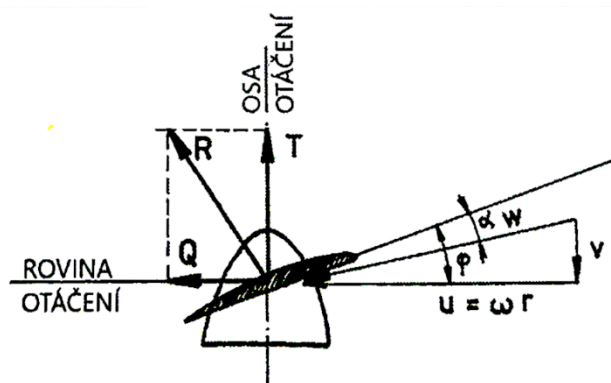
2. ÚVOD DO KONSTRUKČNÍCH A MATERIÁLOVÝCH ŘEŠENÍ LETECKÝCH VRTULÍ

2.1 Konstrukční řešení

2.1.1 Základní pojmy

Letecké vrtule jsou lopatkové součásti pohonných jednotek, které zajišťují dopředný pohyb letadla proti odporu prostředí. Vrtule je jasně definována základními parametry. Velikostí, která je dána průměrem kružnice opsané špičkou listu, stoupáním, což udává axiální posunutí během jedné otáčky, dále specifickým počtem listů a směrem otáčení.

Vztlak vzniká rotačním pohybem kolem osy otáčení a podobným mechanismem jako vztlak u křídla, kdy rychlejší proud vzduchu obtékající list shora vytvoří oblast s nižším tlakem, a tím i vztakovou aerodynamickou sílu. Tato celková síla R se dá rozložit na dvě složky – tahovou sílu T a odporovou sílu proti otáčení vrtule Q . Celková rychlost obtékání vzduchem v daném průřezu w je vektorovým součtem dopředné rychlosti letu v a rotační rychlosti vzhledem k ose otáčení u . Tento vektor pak určuje úhel α , pod kterým na list proudí vzduch. Úhel φ udává nastavení stoupání listu (obrázek 1) [1].



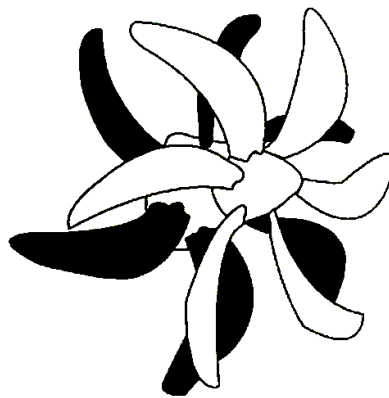
Obrázek 1. Vznik tahu a specifické úhly listu vrtule [1].

2.1.2 Druhy vrtulí

Celková účinnost závisí na několika faktorech. Na rychlosti otáčení, na velikosti rychlosti letu a na úhlech nastavení listů. Tyto úhly lze nastavovat buď na zemi u OGA (on ground adjustable) vrtulí, anebo přímo za letu u stavitelných pro využití specifického nastavení při daných letových podmínkách. Tyto vrtule můžeme dále rozdělit na plynule stavitelné, kdy pilot manuálně volí úhel nastavení v celém rozpětí a vrtule konstantních rychlostí, u kterých se úhel nastavení mění současně s výkonem motoru při zachování stálých otáček [1].

Každý list je tvořen kořenem, špičkou, odtokovou a náběžnou hranou. Tvar listů je většinou velmi komplexní. Kvůli různým oběžným rychlostem v závislosti na vzdálenosti od osy rotace je list zkroucený tak, aby kompenzoval rozdíly působících sil na jednotlivé průřezy. Největší stoupání má list hned u kořene a dále se tento úhel zmenšuje směrem ke špičce, kde je největší tečná rychlost.

U malých pomalu letících letadel se nejčastěji používají dvoulisté nebo třílisté OGA nebo vrtule s pevným úhlem nastavení. Pro dosažení vyšších rychlostí letu, blížících se rychlosti zvuku, je potřeba provést značné změny při konstrukci. Takové vrtule se vyznačují vysokým počtem listů pro snížení namáhání v jednotlivých listech, vysokými provozními otáčkami, specifickým tvarem a stavitelností za letu (obrázek 2) [1].



Obrázek 2. Moderní transsonická vrtule se dvěma protiběžnými řadami se šesti listy. Specifický tvar listu je využíván u rychle se otáčejících vrtulí pro snížení hlučnosti [2].

2.1.3 Síly působící na vrtuli

Při konstrukci je třeba brát ohled na všechny působící síly, kterými je vrtule cyklicky namáhána. Je mezi nimi krut, ohyb, vibrace a odstředivé síly.

Odstředivé síly jsou reakcí na rotační pohyb kolem osy a vytvářejí tahové napětí v závislosti na počtu otáček za jednotu času. Tyto síly jsou velké a dosahují i tisícinásobků hmotnosti vrtule.

Vibrace jsou způsobeny jakýmkoliv narušením aerodynamiky při letu. Fluktuací obtékajícího vzduchu nebo změnami ve výkonu motoru.

Ohybové napětí vzniká při vytváření vztlaku a ohýbá list směrem nahoru. Zdrojem ohybu je také odpor vzduchu, který ohýbá list proti směru otáčení.

Krut je dalším důsledkem aerodynamických sil působících na list, který je jimi kroucen do většího úhlu stoupání. Proti těmto silám působí odstředivý kroučící moment, který se snaží, aby všechny části vrtule rotovaly ve stejné rovině [3].

2.2 Materiálové řešení

Materiálové požadavky pro výrobu vrtulí jsou vždy velmi náročné. Klade se velký důraz na hmotnost, tuhost, tvarovou stálost a odolnost materiálu proti otěru. Například při letu za deště či v prašných podmínkách. Nejčastěji se dnes používají lehké slitiny, hliník, kompozitní materiály a výjimečně i dřevo.

2.2.1 Dřevěné vrtule

Dřevo bylo využíváno jako první materiál pro výrobu leteckých vrtulí, ale jeho vlastnosti již nejsou dostatečné pro mnohá dnešní uplatnění. Často ho nalezneme na starých lehkých letounech. Hojně využívaným je dřevo mahagonové, ořechové či dubové pro jejich vysokou pevnost a tuhost (obrázek 3).

Výroba takové vrtule spočívá ve slepení několika vrstev dřeva lepidlem. Obvykle se jedná o 5 až 10 vrstev pro zvýšení pevnosti a prevenci proti kroucení a dalších změn tvaru. Takto slepené vrstvy se nechají zaschnout a dále se tvarují pomocí nástrojů na opracování dřeva. Dnes se pro výrobu také využívá CNC strojů. Finální tvar je dosažen broušením na požadované rozměry. Následně je vrtule opatřena ochranným nátěrem nebo potahem a ochranou náběžné hrany. Tato ochrana je vyrobena z niklu, oceli nebo jiného vhodného kovu. Pro upevnění do unašeče se vyvrtají potřebné otvory a po vyvážení je vrtule připravena k provozu [3].

Vady struktury, které se mohou u tohoto typu objevit, jsou delaminace jednotlivých spojených vrstev, zkroucení dřeva vlivem vlhkosti při špatné ochraně, praskliny a další povrchové defekty.



Obrázek 3. Dvoulistá dřevěná vrtule používaná na letadle BH25 s konstantním úhlem nastavení a mosaznou ochranou náběžné hrany. Vystavena ve Vrbasově muzeu ve Ždánicích.

2.2.2 Vrtule z hliníku a jeho slitin

Hliník je jedním z nejrozšířenějších materiálů používaných v lehkých konstrukcích aut, lodí a letadel. Jeho značně lepší pevnostní vlastnosti ve srovnání s dřevem umožňují výrobu odolnějších a zároveň lehčích vrtulí, které splňují i náročnější požadavky moderních letounů. Jsou také velmi rozměrově a tvarově stálé. Ke změnám dochází převážně jen vlivem teplotní roztažnosti použitého materiálu.

Vlastnosti jsou dále zlepšovány slitinami s mědí, hořčíkem či křemíkem. Nejpevnější jsou pak slitiny se zinkem, hořčíkem a titanem.

Výroba probíhá převážně na CNC strojích, které polotovary přesně obrobí do požadovaného aerodynamického tvaru. Následně je list obroušen od nedokonalostí a ošetřen chemikáliemi pro uzavření povrchu a zvýšení odolnosti proti korozi. Po důkladné kontrole kvality je na listy nanesen finální protikorozní nátěr a probíhá další testování na vibrace, vyvážení a finální kontrola geometrie.

V budoucnu bude prostor k dalšímu zdokonalení výrobou dutých listů pomocí nejnovějších technologií svařování laserem či třením a vývojem nových lehkých slitin.

K defektům přítomným u tohoto typu vrtulí se řadí, stejně jako u vrtulí dřevěných, různé poruchy materiálové struktury. Jedná se o koncentrátoři napětí vzniklé při nedokonalém kování polotovarů, poškození korozi při špatném nanesení ochranné vrstvy nebo trhliny a oděrky způsobené například letem v prašném prostředí. Opravy těchto vrtulí jsou možné, ale v praxi je při zjištění poškození spíše nahrazena novým kusem pro zajištění bezpečnosti letu.

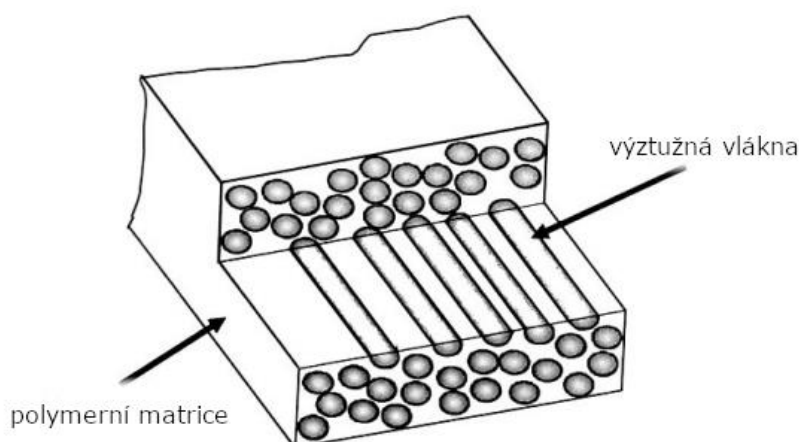
2.2.3 Kompozitní vrtule

2.2.3.1 Kompozitní materiály

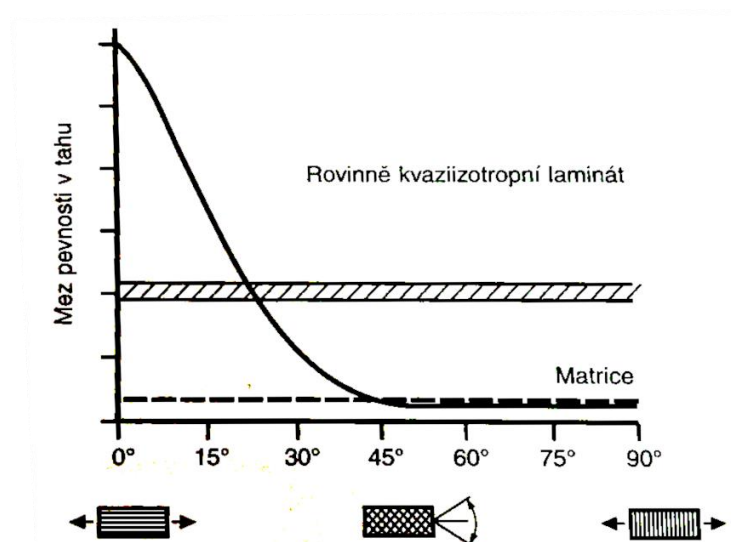
V leteckém průmyslu jsou kompozity stále více využívaným materiálem pro jejich unikátní vlastnosti a variabilitu použití. Na začátku tisíciletí dosahoval podíl kompozitních materiálů použitých na komerčních letounech okolo 15 %, dnes se dostává až k 80 %, například u letadla Boeing 787. Tyto materiály se skládají z matrice, která slouží jako pojivo pro zajištění geometrické stálosti a zároveň pro přenos zatížení na vlákna, jimiž je vyztužena (obrázek 4) [2].

Mechanické vlastnosti se odvíjejí hlavně od pevnosti a tuhosti výztužných vláken, která jsou anizotropní¹, a tudíž velmi záleží na úhlu, pod kterým je kompozit zatěžován (obrázek 5). Kvůli velkým rozdílům těchto pevnostních charakteristik jsou v kompozitech často velmi složité stavy napjatosti. I proto je předvídaní chování těchto materiálů nelehká disciplína [4].

¹ Anizotropní materiál má jiné fyzikální vlastnosti v různých směrech.



Obrázek 4. Základní struktura kompozitního materiálu vyztuženého jednosměrným vláknem [4], upraveno.

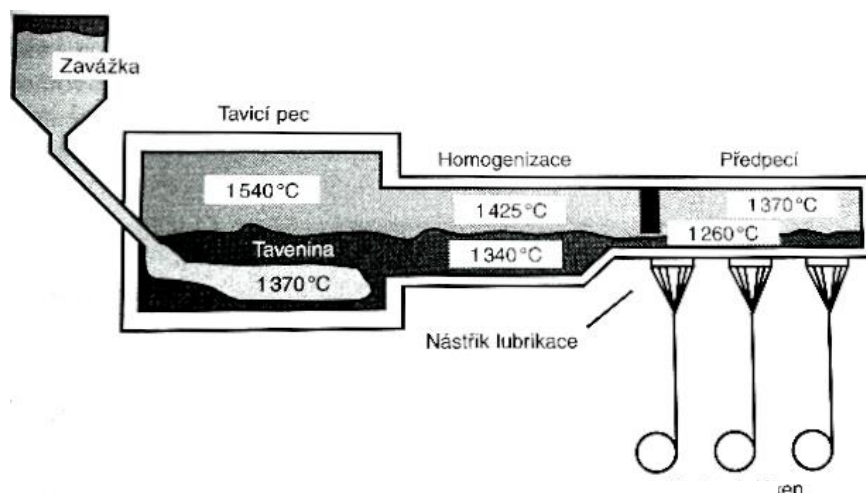


Obrázek 5. Závislost meze pevnosti v tahu jednosměrně vyztuženého laminátu na úhlu orientace vláken [4].

Jako matrice jsou využívány epoxidové a polymerní pryskyřice nejrůznějších chemických a pevnostních vlastností pro požadovanou funkci. Tyto matrice jsou nejčastěji vyztuženy vláknem kevlarovým, skleněným, boronovým či uhlíkovým. Každé vlákno má své charakteristické vlastnosti a hodí se pro jiné aplikace. Obecně jsou kompozitní materiály velmi odolné únavě, téměř nekorodují (pouze uhlíková vlákna při kontaktu s hliníkem korodují elektrochemicky), jsou odolné vůči široké škále maziv, hydraulických kapalin, rozpouštědům a paliv, mají dobrou teplotní odolnost a poměrově k hmotnosti výborné pevnostní charakteristiky. Pro výrobu leteckých vrtulí se nejčastěji využívá vlákno uhlíkové a skleněné.

2.2.3.2 Skleněné vlákno

Skleněná vlákna jsou vyráběna metodou tažení roztavené směsi z pece pomocí speciálních trysek. Zavážka obsahující křemičitý písek (SiO_2), kaolin ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$), vápenec (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), kyselinu boritou ($\text{B}(\text{OH})_3$) a kazivec (CaF_2) je roztavena při teplotě $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Dále je směs homogenizována a vedena do předpeci a výstupových trysek vyrobených ze slitiny platiny. Tryskami proudící směs vytváří tlusté vlákno, které je velkou rychlostí namotáváno na buben. Změnami rychlosti navíjení se vlákno požadovaně natáhne, a tak změní svůj průměr z původních 2 mm na $10 - 20\text{ }\mu\text{m}$. Rychlosti navíjení se pohybují okolo 50 m/s . Vlákna, která budou dále zpracována do formy tkaniny, jsou opatřena lubrikací, která má za úkol chránit povrch, sjednotit jednotlivá tažená elementární vlákna do rovingu² a také zlepšit adhezi mezi tkaninou a matricí kompozitu, jehož bude součástí [4]. Pevnostní charakteristiky standartního skleněného vlákna jsou shrnuty v tabulce 1.



Obrázek 6. Výroba skleněných vláken [4].

2.2.3.3 Uhlíkové vlákno

Uhlíková vlákna jsou vyráběna podobným víceetapovým principem, jako skleněná. Primární organické sloučeniny jako celulóza, polyakrylonitril (PAN) nebo smola³ jsou nejprve přetvořeny do vláknité struktury a dále zpracovávány. Vlákna vyrobená z celulózy mají nízkou kvalitu pro využití v leteckém průmyslu, a proto se využívají převážně jako vysokoteplotní izolace. Ze smoly pak vznikají vlákna s vysokým

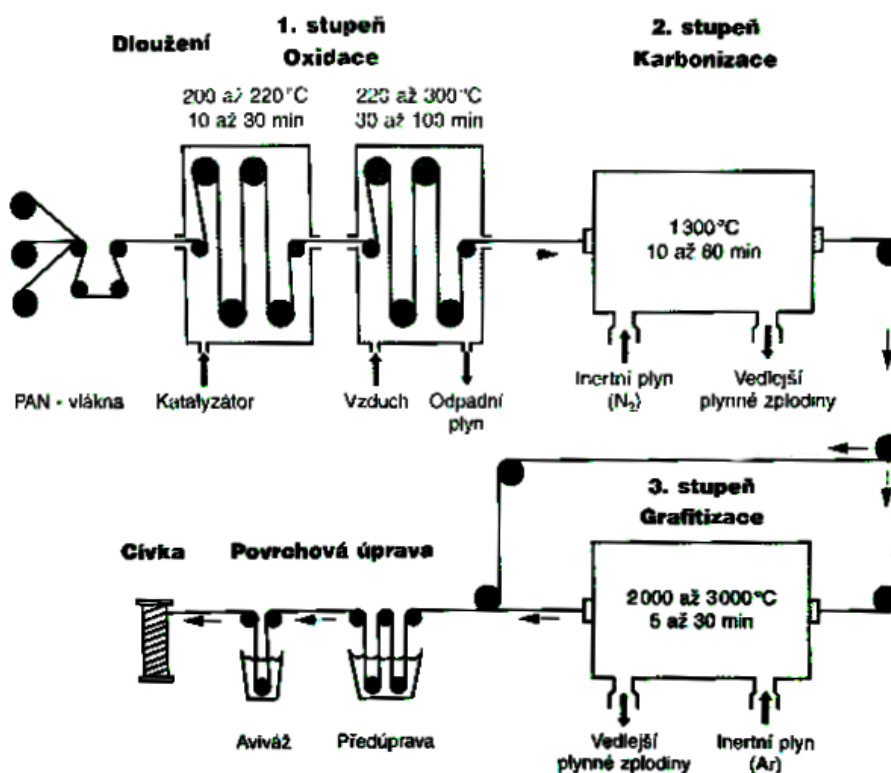
² Dlouhé sružení základních pramenců spojené nástřikem pojiva – až 50 000 základních pramenců (označení 50K).

³ Dehtový koncentrát a vedlejší produkt destilace ropy.

modulem pružnosti a vysokou pevností pro speciální účely. Dnes naprosto převažuje výroba z PAN-vláken, které se označují jako normální [4].

V první fázi výroby, který se nazývá oxidace, jsou tato velmi tažná vlákna za zvýšené teploty a přístupu katalyzátoru dlužena na požadovaný průměr. Při této operaci dochází k orientaci molekul ve směru tažení vlákna, což podstatně ovlivňuje výslednou pevnost výrobku. Dále se v procesu karbonizace v inertní atmosféře mění polymerická struktura na grafitickou. Karbonizace probíhá za vysokých teplot dosahujících až 1600 °C. Vlákna vzniklá tímto procesem mají standární mechanické vlastnosti uvedené v tabulce 1 [4].

Pro výrobu vysokopevnostních a vysokomodulových uhlíkových vláken je potřeba, aby byla podrobena třetímu stupni výroby, který je označován jako Grafitizace. V tomto kroku jsou standární vlákna tažena vysokoteplotní komorou při teplotě 2000 – 3000 °C po dobu až 30 min za přítomnosti inertního plynu. Všechny pevnostní typy vláken jsou pak vlečeny nádobami s pojivem a chemickou úpravou pro snadnější útek do tkanin, zlepšení soudržnosti a snížení křehkosti (obrázek 7) [4].



Obrázek 7. Výroba standární a vysokomodulových uhlíkových vláken [4], upraveno.

Vlákno	Hustota [gcm ⁻³]	Pevnost v tahu [N mm ⁻²]	Modul pružnosti v tahu [kNmm ⁻²]	Tažnost [%]	Součinitel teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Měrný el. Odpor [Ωcm]
Skleněné	2,6	2400	73	3	5	10 ¹⁴
Uhlíkové	1,77	4700	295	1,6	-1,2	10 ⁻³

Tabulka 1. Vlastnosti standartních skleněných a uhlíkových vláken [4], upraveno.

2.2.3.4 Výroba

Dnes existuje několik způsobů pro výrobu kompozitních vrtulí. Všechny využívají vlákna ve formě rovingů a tkanin s různými druhy vazeb, které mohou být jednosměrné, dvouosé a tříosé. Nejzákladnější je tzv. mokrá laminace, při které se do formy vloží právě jedna vrstva tkaniny, která je předpřipravená do požadovaného tvaru podle šablony. Tato vrstva je důkladně prosycena matricí ve formě epoxidu. Tento proces je opakován podle výrobního postupu k dosažení požadované vnitřní struktury. Jednotlivé vrstvy jsou kladeny pak tak, aby anizotropní tkaniny vytvořily kompozit, který se svými vlastnostmi co nejvíce přibližuje izotropnímu materiálu. Při výrobě z prepregu⁴ je proces značně urychlen. Místa středu, náběžné a odtokové hrany jsou dodatečně vyztužena rovingy pro lokální zpevnění struktury.

Před uzavřením je do formy vložen dřevěný nebo sklotextitový⁵ střed a pěnové jádro, které se využívá k vyztužení vnitřní struktury a výrobu nosných struktur. Jádra jsou nejčastěji vyráběna z polyuretanových pěn.

V dalším kroku je pod tlakem forma zahřáta na požadovanou vytvrzovací teplotu matrice a po určitou dobu na této teplotě udržována. Po vytvrzení a vyjmutí z formy jsou listy ořezány, obroušeny a povrch je zbaven větších nedokonalostí. Takto připravené vrtule jsou vyváženy a tím i připraveny pro provoz.

Laminát vytvořený ruční laminací je velmi náchylný k chybám struktury. Bubliny, delaminace, nedostatečný kontakt vnější vrstvy s pěnovým jádrem, špatný objemový poměr tkaniny s matricí a narušená skladba jsou často se vyskytujícími defekty. Zmetkovost nad 15 % není výjimkou i v nejlepších výrobních zařízeních.

⁴ Tkanina předsycená matricí podle požadovaného objemového nebo hmotnostního poměru.

⁵ Odolný kompozitní materiál vyroben ze skelných vláken.



Kvůli povaze těchto nedokonalostí je při podezření několik možností, jak zjistit jejich přítomnost. Jako první se nabízí vrtuli rozřezat a vyhodnotit stav struktury vizuálně. Tento způsob je však velmi nákladný a při výrobě je takto zničeno velké množství vrtulí, které by jinak mohly být využity v provozu. Zde nachází velké uplatnění nedestruktivní testování, čímž lze odhalit vady a detaily o vnitřní struktuře, jak název napovídá, bez potřeby zničení testovaného kusu.

3. PŘEHLED METOD NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ LAMINÁTŮ

3.1 Úvod do nedestruktivního testování

Nedestruktivní testování (NDT) je způsob kontroly kvality, široce používaný ve všech průmyslových odvětvích, při kterém nedochází k jakémukoliv zásahu do tvaru, struktury, vlastností a celkového stavu testovaného vzorku v celém průběhu testu. Při testování výrobků z laminátu se nejčastěji využívá:

- Vizuální kontrola
- Lokální akustická spektroskopie
- Elektromagnetismus
- Infračervená termografie
- Radiografie
- Ultrazvuková defektoskopie

Díky své specifické fyzikální povaze přináší každá ze zmíněných metod svá pozitiva a negativa. Proto nelze využít právě jedné pro odhalení všech vad a nedokonalostí vyskytujících se ve struktuře laminátů. Aplikace nedestruktivních metod tedy vyžaduje velkou znalost jak struktury a materiálových vlastností zkoumaného vzorku, tak metod samotných.

3.2 Přehled typů vad laminátů

Kvůli značně nehomogenní povaze a metodě výroby se u laminátových struktur objevují nedokonalosti odlišné než například u kovů. Je potřeba brát v potaz různé chování laminátů v tahu a tlaku, složité stavy napjatosti v místech koncentrace napětí, a to vše ještě v závislosti na orientaci vláken ve struktuře. Průběh výroby, namáhání v tahu, tlaku či ohybem, cyklické zatěžování a provoz za zvýšené teploty tedy dávají za vznik následujícím poruchám:

- Delaminace spojených vrstev (obrázek 8)
- Bubliny vzduchu vytvářející dutiny (obrázek 9)
- Trhliny
- Nespojení povrchové vrstvy laminátu s materiálem jádra (anglicky debond)
- Zvlnění tkaniny
- Poškození nárazem

- Nečistoty ve struktuře (větší prachové částice, ochranný papír prepregu apod.)
- Vady povrchové vrstvy (dírký, nedostatečné prosycení tkaniny, puchýře apod.)

Bezchybný výrobek z laminátu však vyrobit nelze, a proto je při NDT vždy stanovena určitá mez přípustnosti. Tyto meze se liší pro každý druh nedokonalosti a zohledňují velikost, rozestup mezi jednotlivými vadami, závažnost a také polohu u součástí s kritickými místy. Nejprísněji jsou hodnoceny lamináty využívané v letectví a kosmonautice, kdy musí být výskyt některých vad naprosto vyloučen. Výrobci a zákazníci si mohou určit své vlastní požadavky, ale povětšinou se řídí normami pro využívaný způsob NDT a následný účel použití laminátu.



Obrázek 8. Značná delaminace vrstev u listu vyrobeného z uhlíkových vláken.

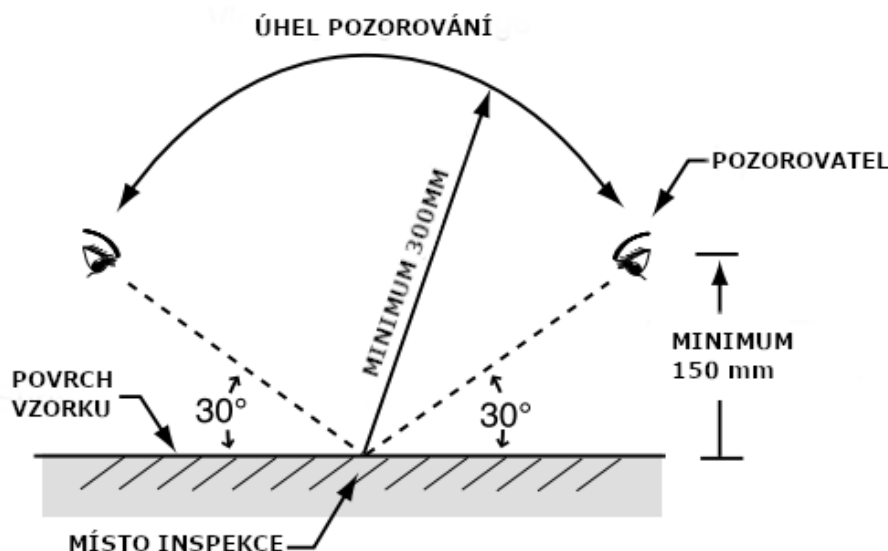


Obrázek 9. Bubliny ve struktuře listu vyrobeného ze skleněných vláken bez využití pěnového jádra.

3.3 Vizuální metoda

Vizuální kontrola je nejzákladnější a nejdéle používanou metodou NDT, která je vhodná ke zkoumání povrchových nedokonalostí laminátu. Tedy k odhalení prasklin, pokrčených vláken, porozity povrchu, nesprávného prosycení tkaniny, vypouklin a jiných odchylek od požadovaného tvaru. Kontrola je prováděna vyškoleným personálem za jasného světla, o vlnové délce vhodné pro lidské oko, a při vhodném pozorovacím úhlu (obrázek 10).

Dnes je také využíváno kamer a senzorů trojrozměrné deformace, které zároveň snímají povrch a vyhodnocují změny mezi kontrolovanými oblastmi laminátu při mechanickém zatěžování. Výstup této metody je celoplošná mapa napjatosti zkoumaného vzorku, která pomáhá odhalit vady struktury [6].



Obrázek 10. Doporučené úhlové pole pro vizuální inspekci [5], upraveno.

3.4 Lokální akustická spektroskopie

Někdy také označována jako tap test (z anglického tap – klepnout) díky specifickému postupu vykonávání této metody, kdy je speciálním kladívkem postupně poklepáván celý povrch vzorku. Každým úderem kladívka laminát vydá určitý tón zvuku, kdy je při souvislé a spojitě struktuře bez vad tento tón vyšší než u oblastí, které obsahují delaminace nebo nespojení s materiálem jádra. I zde, jako u vizuální metody, hraje velkou roli subjektivní vnímání tónu vydaného laminátem, a tudíž digitalizace značně zlehčuje a zrychluje rozlišovací schopnosti obsluhy, kdy přístroj sám rozeznává vlnovou charakteristiku úderu a na obrazovce se objeví odpovídající referenční hodnota (obrázek 11).

Akustická spektroskopie slouží primárně k odhalení velkých bublin, delaminací a nespojení laminátu s jádrem. Nejčastěji se využívá u tenkých laminátů o tloušťce do 1 mm [6].

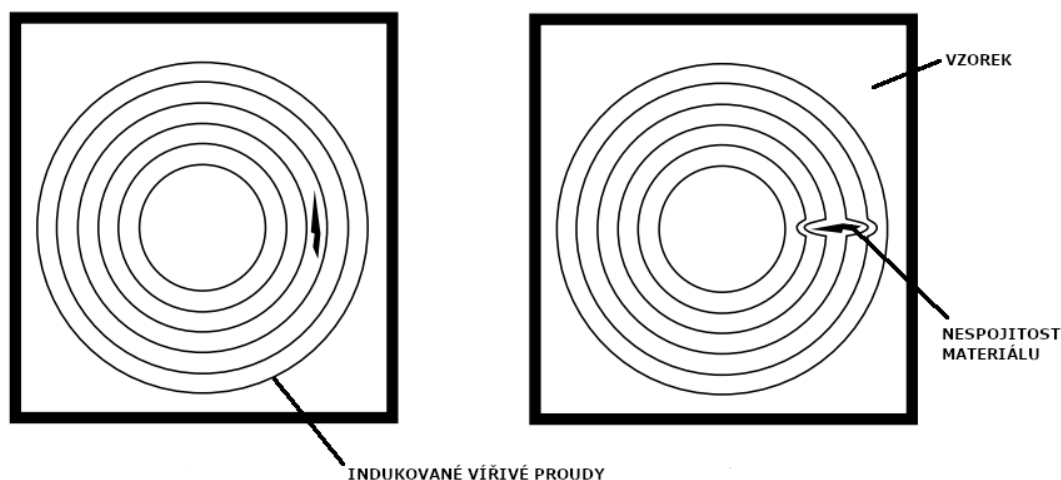


Obrázek 11. Digitální měřič pro lokální akustickou spektroskopii se speciálním kladívkem.

3.5 Elektromagnetická metoda

Vytvářením indukovaných proudů ve vzorku pomocí střídavého napětí lze díky známým vlastnostem zkoušeného materiálu vyhodnocovat stav jeho struktury. Metoda nalézá využití při hledání poruch blízkých povrchu laminátu. Vířivé proudy nemají totiž dostatečnou prostupnost do materiálu a tím je zamezena hloubková analýza. Proto se tato metoda ve zkoušení laminátů využívá jen zřídka, a to pro velmi tenké vrstvy [5].

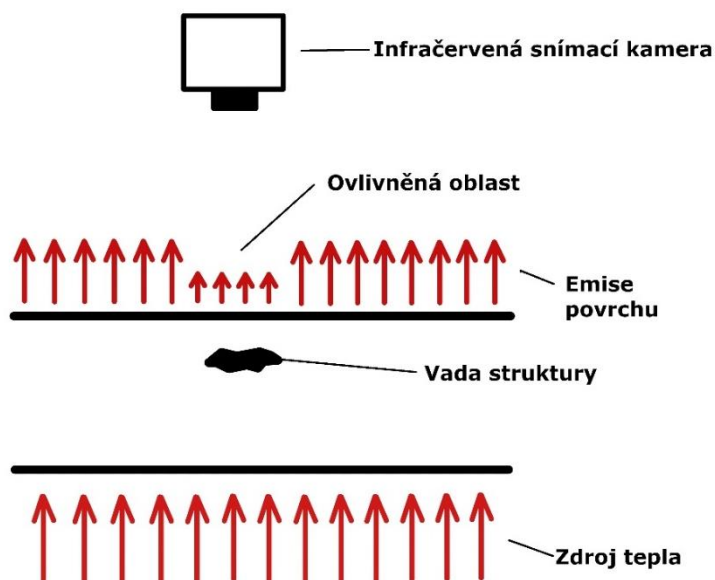
Způsob detekce chyb spočívá v procesu, kdy proudy procházejí vzorkem po kruhových drahách cestou nejmenšího odporu. Při narazení na nespojitost materiálu je proud nucen tuto vadu „obejít“ a tak umožní její detekci. Orientace chyby kolmo na směr proudění detekci značně ulehčuje, a proto je potřeba vzorek zkoumat pod více směry (obrázek 12) [5].



Obrázek 12. Vliv orientace vady na detekci pomocí elektromagnetické metody [5], upraveno.

3.6 Infračervená termografie

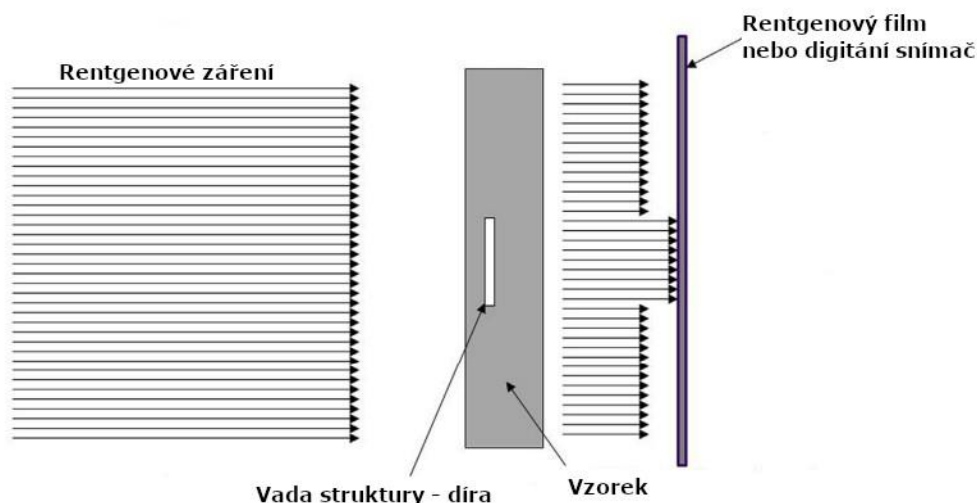
Metoda termografie využívá tepelné vodivosti a emisivity laminátu pro zjištění zejména přítomnosti delaminací, velkých bublin, cizích nečistot v laminátu a nespojení s materiálem jádra. Lze ji také využít při inspekci sendvičových struktur při podezření na přítomnost vody v jádře. Při testování se vzorek zahřeje a následně je pozorován infračervenou kamerou. Správně vyrobený laminát by měl vyzařovat teplo jednotně, a tudíž by měla kamera zaznamenat jednotnou mapu emisivity celého vzorku. Zmíněné vady a nečistoty ovlivňují svými vlastnostmi rozptřeni a vedení tepla, a tím vzniknou jasně viditelné anomálie v mapě teplotního záření (obrázek 13) [5] [6].



Obrázek 13. Schéma infračervené termografie.

3.7 Radiografie

Rentgenové záření je také využíváno pro vyhodnocování stavu struktury laminátových dílů. Toto pronikavé záření při průchodu vzorkem ztrácí svou intenzitu a následně vstupuje do digitálního senzoru, jenž vyhodnotí intenzitní pole celého vzorku a sestaví tak obraz (obrázek 14). Jedna vrstva laminátu odpovídá poklesu zhruba o 1,2 % z původní intenzity záření, a proto lze této metody využít i u tlustších vrstev. Jelikož je radiografie velmi senzitivní na objemové vady, ale méně na vady rovinné (delaminace), hodí se tedy na odhalení děr, bublin a při vhodném natočení u sendvičových struktur i k hledání nespojitosti laminátu s jádrem. Další výhodou je schopnost rozlišit změny hustoty materiálu a tím odhalit místa přesycená/nenasycená matricí, což je značným přínosem pro případné úpravy technologických postupů a další výrobu. Tloušťka testovaného laminátu by se měla ideálně pohybovat okolo 5 mm [6].



Obrázek 14. Schéma radioskopického testování vzorku [6], upraveno.

3.8 Ultrazvuková defektoskopie

Nejrozšířenější metodou NDT laminátů je bezkonkurenčně ultrazvuková defektoskopie. Jako ultrazvuk je obecně označována zvuková vlna s frekvencí nad 20 kHz, která se pohybuje vzorkem rychlostí zvuku, specifickou pro daný materiál. Rychlost zvuku v laminátu vyztuženém uhlíkovými vlákny se pohybuje okolo 3100 m/s a frekvence zvukových vln nejčastěji leží v intervalu 0,5 MHz až 20 MHz. Frekvence přímo ovlivňuje vlnovou délku, kdy 1 MHz odpovídá vlnové délce kolem 3 mm a 10 MHz asi 0,3 mm. Z toho plyne, že čím větší frekvence zvukových vln, tím lépe jsme schopni rozlišit malé nedokonalosti. S rostoucí budící frekvencí a několika dalších faktorech pak rapidně klesá prostupnost vlny do materiálu. Například pro laminát o tloušťce 3 mm a minimální rozlišitelnou vadou o velikosti 1 mm využijeme sondy vyzařující vlny

o frekvenci 5 MHz a vyšší. Velký vliv na odhalení vady má také porozita laminátu. Ta úzce souvisí s výrobním procesem vakuového balení vzorku při vytvrzování pryskyřice. Při větším podtlaku ve vakuovém pytli se značně snižuje porozita laminátu a tím zlepšuje prostupnost zvukových vln, což značně zvyšuje schopnost detekce vad a tím i kvalitu provedené zkoušky [6].

Princip detekce chyb spočívá ve změně akustického rozhraní, na kterém dojde k průchodu a odrazu části vlny. Sonda pak odražený signál zachytí a podle doby, jakou signál letěl zpět k sondě, vyhodnotí hloubku, ve které se rozhraní nachází (obrázek 13). Každý materiál má svou specifickou akustickou impedanci Z , která je definována jako součin materiálové hustoty (ρ) a specifické rychlosti šíření zvukových vln (v) :

$$Z = v\rho \quad \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \text{s} \right] \quad (\text{Rovnice 1 [7]})$$

Koeficient průchodu vlny na rozhraní je definován jako:

$$P = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad [1] \quad (\text{Rovnice 2 [7]})$$

Koeficient odrazu (reflexe) na rozhraní je pak

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad [1] \quad (\text{Rovnice 3 [7]})$$

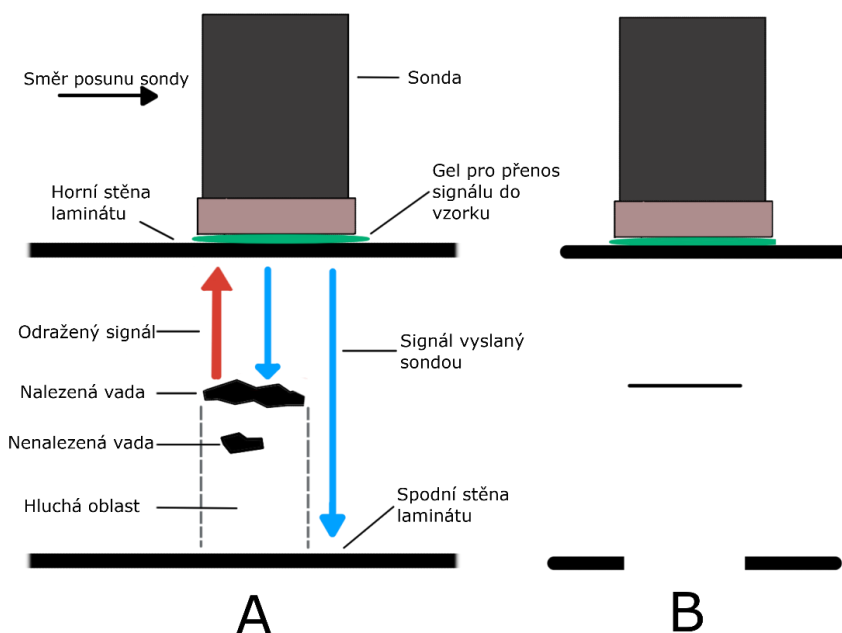
kde u obou rovnic Z_1 akustická impedance laminátu a Z_2 akustická impedance materiálu vady.

Využitím rovnic 1–3 můžeme tedy vypočítat, jaký odraz a průchod signálu můžeme očekávat od rozhraní uhlíkový laminát (L)/vzduch (VZ), tedy u delaminace nebo bubliny následovně:

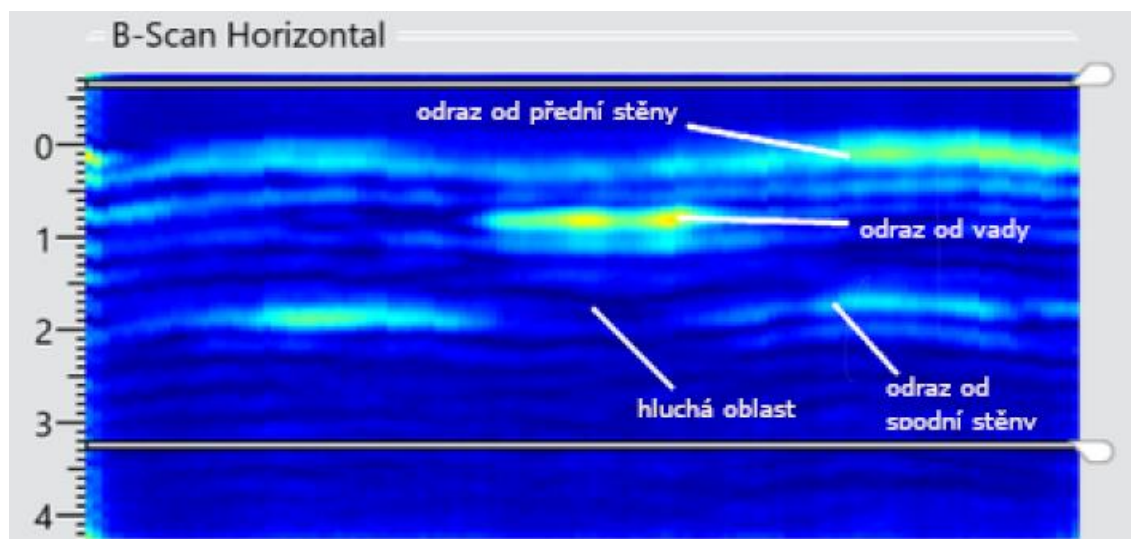
$$\begin{aligned} Z_L &= 5,89 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \text{s} & Z_{VZ} &= 0,00041 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \text{s} \\ P &= 0,00014 & & (\text{Rovnice 4}) \\ R &= 0,99986 \end{aligned}$$

Je tedy zřejmé, že můžeme očekávat téměř totální reflexi signálu od tohoto rozhraní. Díky této skutečnosti je jasné, že ultrazvukovou defektoskopií lze snadno odhalit delaminace a díry. Cizí nečistoty v laminátech pak pod podmínkou velkého rozdílu v akustických impedancích. Odraz většiny signálu na jednu stranu ulehčuje hledání vad typu delaminace a bublina, avšak znemožňuje nález vady, nacházející se hlouběji ve vzorku, přímo pod již objevenou vadou (obrázek 15 a 16). Proto je někdy nutné prozkoumat vzorek z obou stran nebo metodou TTU (through transmission ultrasound) se sondou na horní stěně a přijímačem na spodní.

Je důležité také zvolit správné médium pro přenos signálu ze sondy do vzorku a nazpět. Využívá se především speciálních gelů na vodní bázi, které obsahují protikorozní a smáčecí přísady pro snadnou aplikaci bez rizika poškození vzorku. Média také vyplňují nerovnosti povrchu což dále zlepšuje prostupnost signálu do vzorku a zamezuje vzniku hluchých míst.



Obrázek 15. Schéma ultrazvukové defektoskopie se dvěma vadami pod sebou (A) a obraz vygenerovaný softwarem po testování vzorku (B).



Obrázek 16. Snímek reálné vady v laminátu odpovídající schématu na obr. 15.

4. NÁVRH METODIKY NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ LAMINÁTOVÝCH VRTULÍ

4.1 Výběr metod NDT

Rychlost, cena a schopnost zaručeně determinovat stav testovaného kusu jsou největšími faktory ovlivňující výběr metod NDT využívaných výrobcí. Řada metod vyžaduje někdy nemalé počáteční investice pro nákup zařízení, školení personálu, vyhrazení speciálních prostor pro výkon práce (například u radiografie), a proto nemusejí být vhodné pro specifické použití při testování vrtulí. Složitá geometrie, nemalá velikost a vnitřní struktura pak také značně omezuje nebo znemožňuje využití některých metod. S poznatky z předchozí kapitoly lze posoudit vhodnost jednotlivých metod pro nalézání specifických vad (tabulka 2).

Tabulka 2. Aplikace metod NDT pro nalezení vad laminátů. V – vhodné, O – omezené použití [6].

	Delaminace	Porozita	Debond jádra	Povrchové vady	Trhliny	Nečistoty struktury
Vizuální				V		
Akustická	O		V			
Elektromagnetická	O				O	
Termografie	V	O	V			
Radiografie	O	V			V	O
Ultrazvuková	V	V	O		V	V

Pro řádné provedení NDT je třeba zvolit takové metody, kterými jsme schopni hledat nejlépe všechny vyskytující se vady. Nejširší použití vykazuje dle tabulky 2 metoda ultrazvuková, která je vhodná pro odhalení většiny vad a nedokonalostí. V kombinaci s vizuální a akustickou metodou pokrýváme celé pole chyb, a tudíž dostáváme ideální posloupnost nedestruktivních metod pro testování laminátových vrtulí.

Přednostně by měla být provedena vizuální zkouška, díky její rychlosti a schopnosti vyřadit poškozené (závažné poškození nárazem, praskliny povrchové vrstvy matrice apod.) nebo nevyhovující kusy (poškozená tkanina povrchové vrstvy, zkřivení listu, puchýř apod.). Povrchové vady bývají často přímým důsledkem vad vnitřní struktury listu, a proto je vizuální metoda vhodná k určení míst zájmu pro následnou kontrolu metodou akustickou a ultrazvukovou.

Následuje vyšetření metodou akustickou, která je rychlá, finančně nenáročná a vhodná k odhalení delaminací jednotlivých vrstev vrtule. Testovaný kus je systematicky poklepáván akustickým kladívkem a označen dle hodnot zobrazovaných na displeji zařízení. Každé zařízení má však jiné měřítko a způsob zachycování signálu kladívka. Proto je třeba dbát na předpisy výrobce a zkušenosti obsluhy. Větší pozornost je věnována místům zájmu nalezených předešlou vizuální kontrolou. Nalezené abnormality signálu jsou označeny jako oblast zájmu pro poslední test vnitřní struktury metodou ultrazvukovou.

Testování listu vrtule je zakončeno využitím ultrazvukové defektoskopie. Ta může být provedena několika způsoby. Nejrychlejší a nejvyužívanější je test kritických míst listu vrtule, jako je kořen, přechodové plochy geometrie, místa koncentrace napětí (určené simulací), místa potenciálně náchylná k tvorbě vad z důvodu použitého výrobního procesu (oblasti složité vnitřní struktury) a místa zájmu určené předchozími metodami. Tento způsob je vhodný pro ušetření času při testování sériově vyráběných listů s velkou plochou. Dalším způsobem je test celé vrtule. Toto řešení je časově zdlouhavé při testování velkoplošných vrtulí a často tak i zbytečné. Při použití speciálních zobrazovacích metod a zařízení lze sestrojít mapu testované plochy pro jednodušší analýzu. Při výrobě prototypů je tak celoplošný test zásadní pro nalezení možností vylepšení vnitřní struktury a nalézání chyb té stávající. Malé vrtule štíhlého profilu mohou být takto testovány díky šířce sondy, která je schopna na některých zařízeních prozkoumat celý list jen několika přechody (např. zařízení od firmy Dolphitech, jehož sonda má rozměry 32x32 mm). Zakřivení těchto užších listů vytváření map velmi ztěžuje a v některých případech znemožňuje.

5. NÁVRH POSTUPU KALIBRACE A VYHODNOCENÍ DAT ULTRAZVUKOVÉ METODY

5.1 Popis zařízení a sondy

Velké množství výrobců a druhů zařízení pro ultrazvukové nedestruktivní testování zamezuje navržení obecně použitelného postupu kalibrace. Proto je tato část zaměřena na zařízení Dolphicam 2+ od norského výrobce Dolphitech.

Technologie využívaná tímto zařízením je nazývána phased array, což znamená, že je sonda přijímačem i vysílačem signálu. Zároveň obsahuje velké množství elementů uspořádaných do čtvercové plochy, což značně urychluje postup a zlepšuje představu o celkovém stavu zkoumané struktury oproti bodovým vysílačům. Paprsek vysílaného signálu vychází ze sondy kolmo díky úpravě povrchu piezoelektrickým polymerním filmem [8].

Pro lamináty leteckých vrtulí z uhlíkových tkanin, které se tloušťkou pohybují do 15 mm je vhodné použít sondu vysílající signál o střední frekvenci 5 MHz. Tato frekvence zajišťuje potřebnou prostupnost ultrazvukové vlny a schopnost odhalit vady od velikosti 1 mm [9].

Specifikace sondy [8]:

- Plocha vysílajícího prvku – 32x32 mm.
- Počet elementů na ploše – 16 384 (128x128 elementů).
- Vzorkovací frekvence – 50 Hz.
- Střední frekvence signálu– 5 MHz.
- Efektivní prostupná hloubka – až 30 mm.
- Nejmenší odhalitelná velikost vady – 1 mm.

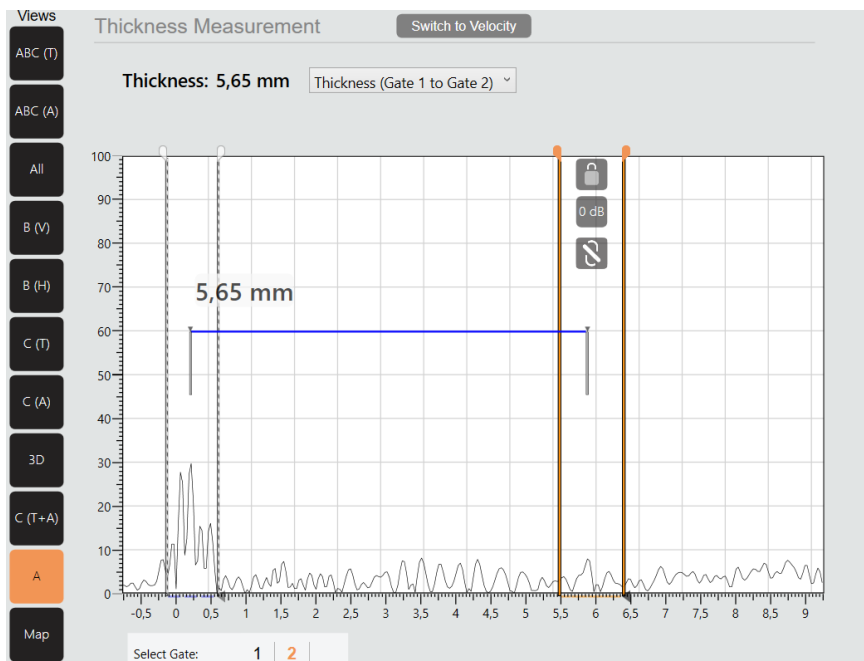
5.2 Popis zobrazovacího programu a jeho funkcí

Software od firmy Dolphitech obsahuje celou řadu funkcí, možností zobrazení a úprav nastavení pro specifické aplikace testování ultrazvukovou defektoskopií. Pro správné použití a modifikaci nastavení je potřebná znalost těchto jednotlivých funkcí, zobrazení a využívaných veličin.

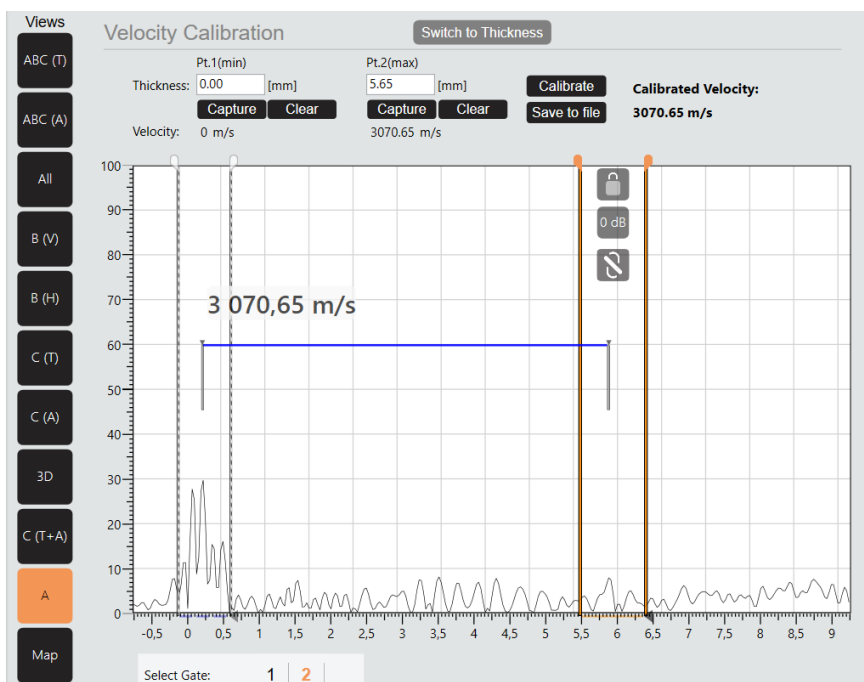
5.2.1 A–sken

Nejzákladnější pohled na testovaný vzorek je A–sken. Zobrazuje amplitudu odraženého signálu v závislosti na hloubce, ve které byl tento odraz zachycen. Je využíván pro měření tloušťky a kalibraci rychlosti zvukového signálu ve vzorku.

Rychlost je kalibrována pomocí známé naměřené tloušťky materiálu. Tu můžeme změřit buď teoreticky, nebo také pomocí funkce A–skenu (obrázek 17). Tloušťka je pak zadána do pole nad A–skenem a rychlost je po kliknutí na kalibrovat automaticky nastavena (obrázek 18).



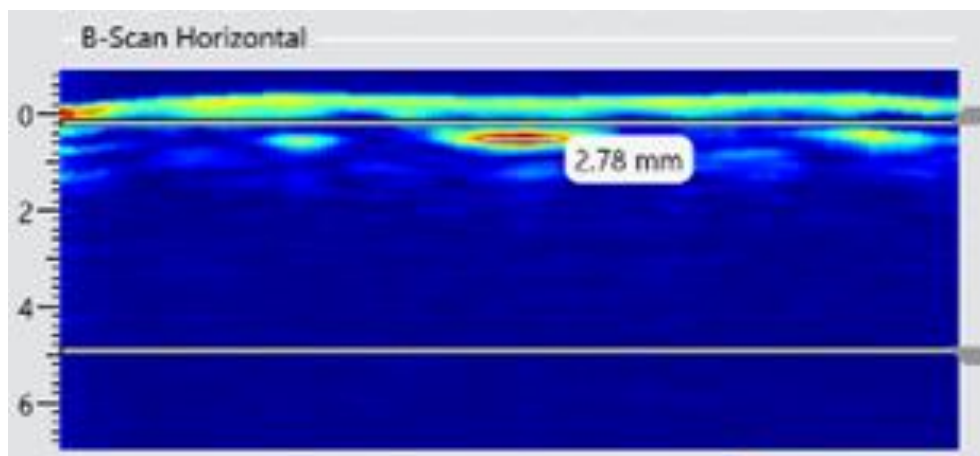
Obrázek 17. Měření tloušťky stěny vzorku pomocí A–skenu.



Obrázek 18. Kalibrace rychlosti signálu pomocí A–skenu.

5.2.2 B–sken

Složením A–skenů z jednotlivých elementů sondy dostáváme B–sken. Tento obraz ukazuje jak horizontální, tak vertikální průřez vzorkem (obrázek 19). Oblastem s vysokou amplitudou odraženého signálu je přiřazena barva pro rozlišení od okolního šumu s nízkou amplitudou a postupně je skládán obraz. Je obzvláště užitečný pro určení tloušťky vady, polohy (hloubky) ve vzorku a příčných rozměrů. Brány lze manuálně posouvat a tím zobrazit pouze signál z určité hloubky. Toho je využíváno například pro odstínění silného odrazu od přední stěny laminátu. [10].

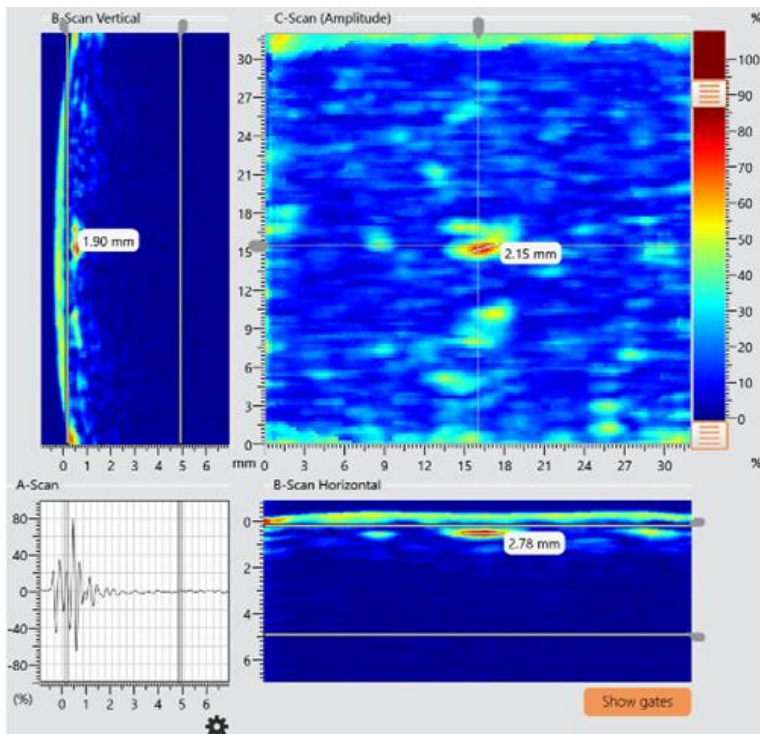


Obrázek 19. Horizontální B–sken vzorku. Viditelná jsou místa s největší amplitudou odraženého signálu – přední stěna laminátu a 2,78 mm dlouhá vada ležící 0,75 mm pod povrchem.

5.2.3 C–sken

Podobně, jako je B–sken složen z jednotlivých A–skenů, je C–sken složen z jednotlivých B–skenů do jednotného pohledu na povrch testovaného vzorku. Dodává celkový pohled na testovaný vzorek a dotváří tak představu o vnitřní struktuře, která je evaluována.

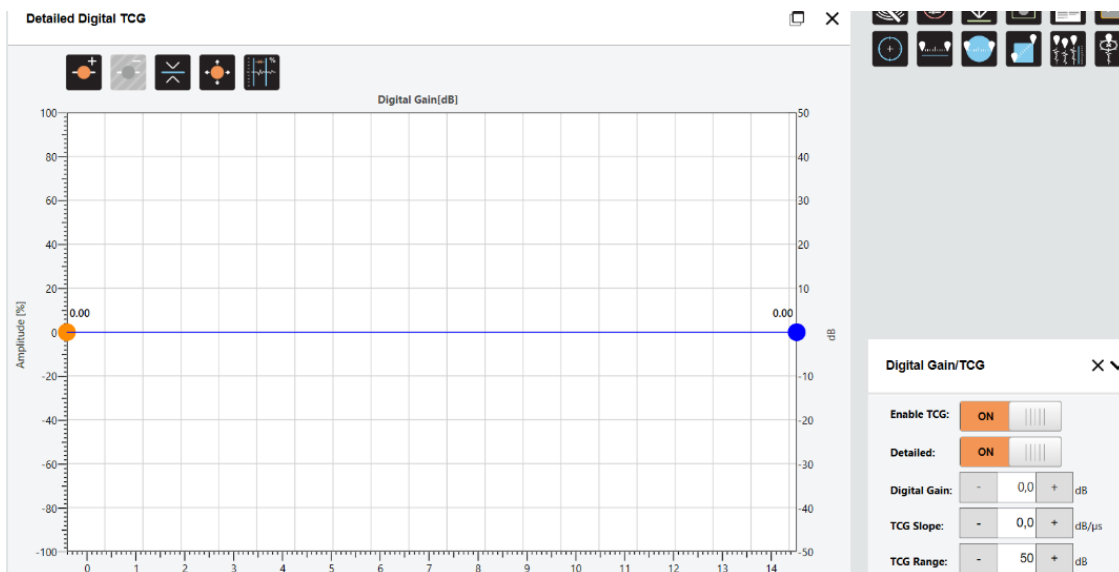
Na obrázku 20 lze vidět zobrazení všemi typy skenů, což ukazuje kompletní obraz vnitřní struktury. Poloha vady a její velikost lze určit s velkou přesností, což je klíčovým faktorem při nedestruktivním testování ultrazvukovou defektoskopií.



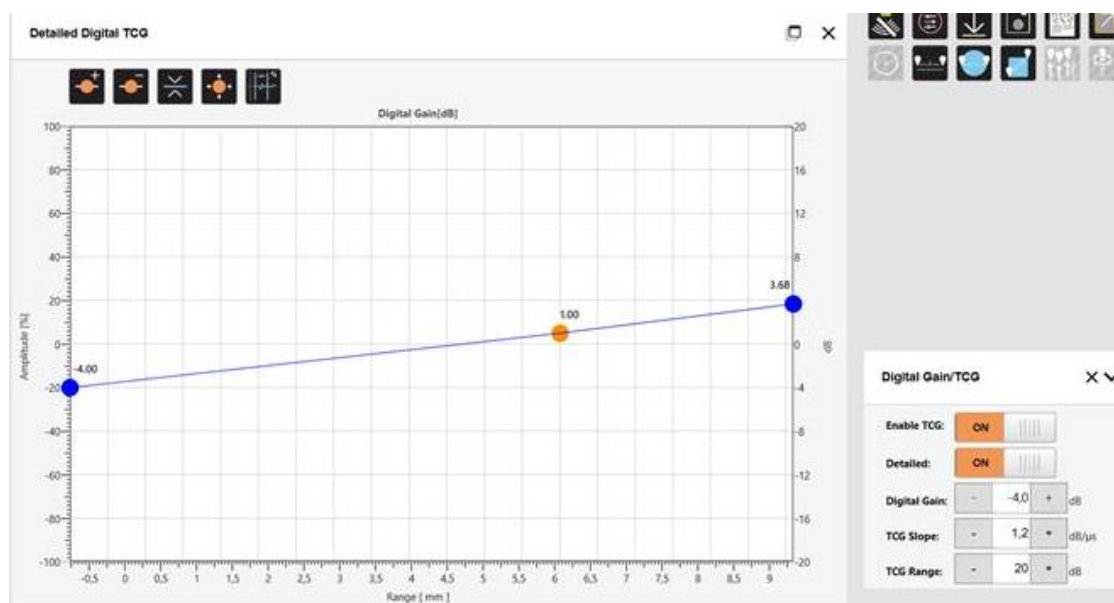
Obrázek 20. Zobrazení A, B a C – skenu vzorku s vadou struktury.

5.2.4 Digitální přírůstek a časově korigovaný digitální přírůstek

Korekce digitálního přírůstku umožňuje měnit ve zpracování dat softwarem hodnotu amplitudy signálu v závislosti na hloubce, odkud byl odražen. Nastavení umožňuje fixovat přírůstek signálu na jedné hodnotě nebo zvolit libovolnou křivku (obrázek 21 a 22). Umělé zvýšení amplitudy výrazně pomáhá při hledání vad hlubokých nebo z materiálu, který špatně odráží ultrazvukový signál (tj. materiál mající podobnou akustickou impedanci jako laminát). Zesílení je pak nutno brát v ohled při evaluaci vad.



Obrázek 21. Výchozí nastavení digitálního přírůstku – bez zesílení signálu.



Obrázek 22. Manuálně upravené hodnoty digitálního přírůstku. Signál od přední stěny v nulové hloubce je snižen na -4 dB a postupně je tento časový přírůstek zvyšován lineárně až na hodnotu $+1$ dB ve hloubce 6 mm ve vzorku.

5.2.5 Průměrování signálu

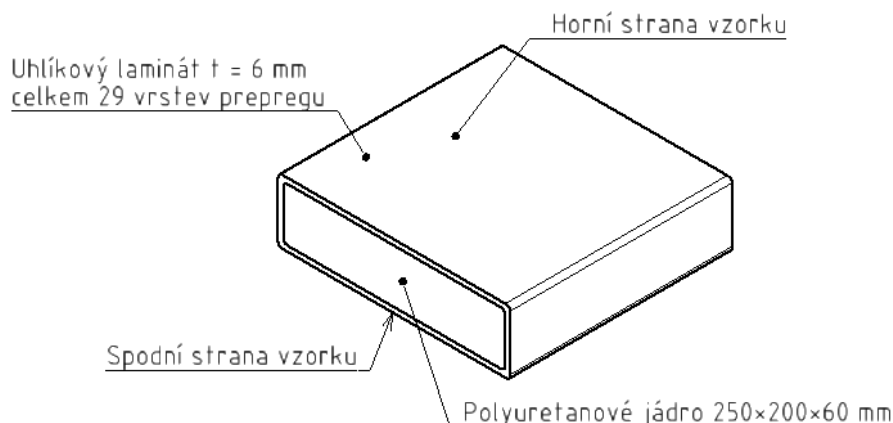
Nastavení průměrování signálu udává, kolikrát je signálový pulz (vyzáření a přijetí signálu) z jednotlivých elementů průměrován. To znamená, že každý element průměruje právě zvolený počet signálových pulzů a ten se stává výstupem. Takto lze omezit šum signálu, avšak značně se prodlužuje doba zpracování dat a tedy snižuje počet snímků za vteřinu.

5.2.6 Digitální FIR filtr

Obecná vlastnost šumu je velká frekvence změny hodnoty amplitudy. To znamená, že za určitý čas změní několikrát amplitudu odraženého signálu a tím znehodnocuje výsledný obraz. Digitální FIR filtr umožňuje tyto vysokofrekvenční komponenty signálu odstínit a zásadně snížit množství šumu.

5.3 Návrh a výroba testovacího vzorku

Testovací vzorek pro zkoušku a následnou kalibraci nastavení zařízení byl zhotoven dle schématu na obrázku 23. Pěnové jádro z polyuretanu bylo obaleno celkem 29 vrstvami uhlíkového prepregu, čímž bylo docíleno požadované tloušťky laminátu 6 mm.

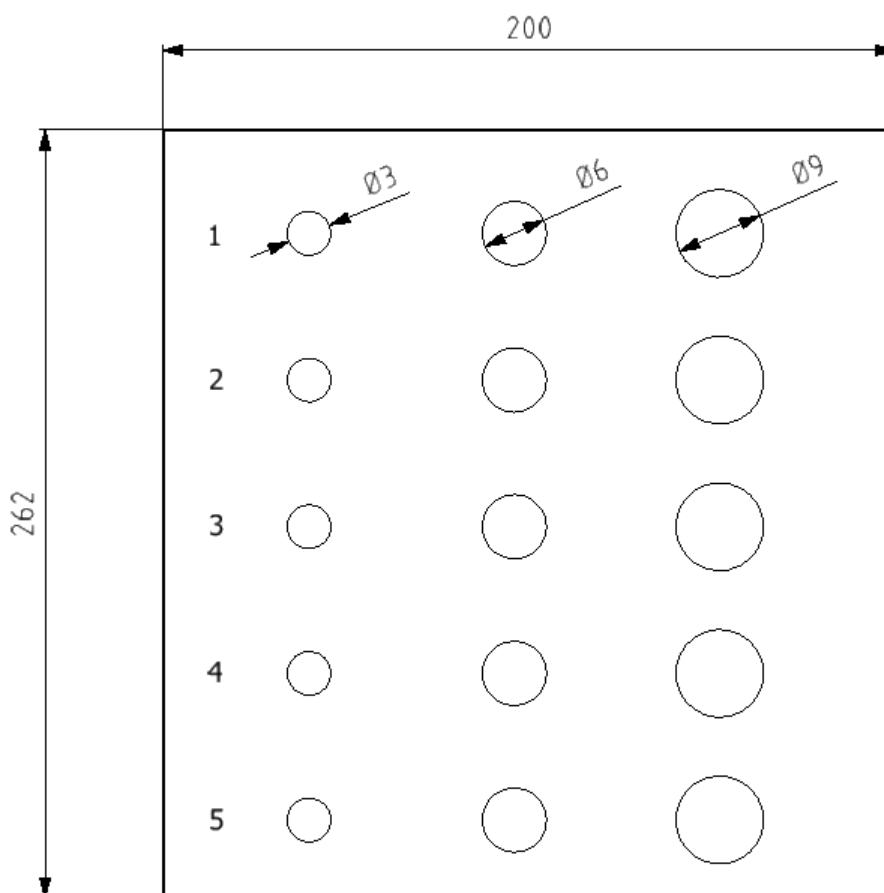


Obrázek 23. Schématický výkres pro výrobu testovacího vzorku.

Ke zvolení správného nastavení pro hledání vad v různých hloubkách laminátu byly do testovacího vzorku umístěny celkem tři sady umělých vad. Každý set obsahuje vady pěti typů, každý typ pak tři kruhové vady o velikosti 3, 6 a 9 mm v průměru (obrázek 24).

Typy umělých vad:

- Typ 1 – Podkladový papír prepregu. Využíván při výrobě prepregů. Tloušťka 0,15 mm.
- Typ 2 – Teplotně odolná páska. Obvykle využívána při pečení laminátových dílů ve vakuových pytlích. Tloušťka 0,1 mm.
- Typ 3 – Voskový ochranný papír. Stejně jako typ 1 využíván při výrobě prepregů. Tloušťka 0,15 mm.
- Typ 4 – Plastová folie vakuového pytle. Tloušťka 0,1 mm.
- Typ 5 – Polštářové vady. Dvě vrstvy kancelářského papíru přelepené maskovací páskou [9]. Nejširší typ vady o tloušťce 0,25 mm.

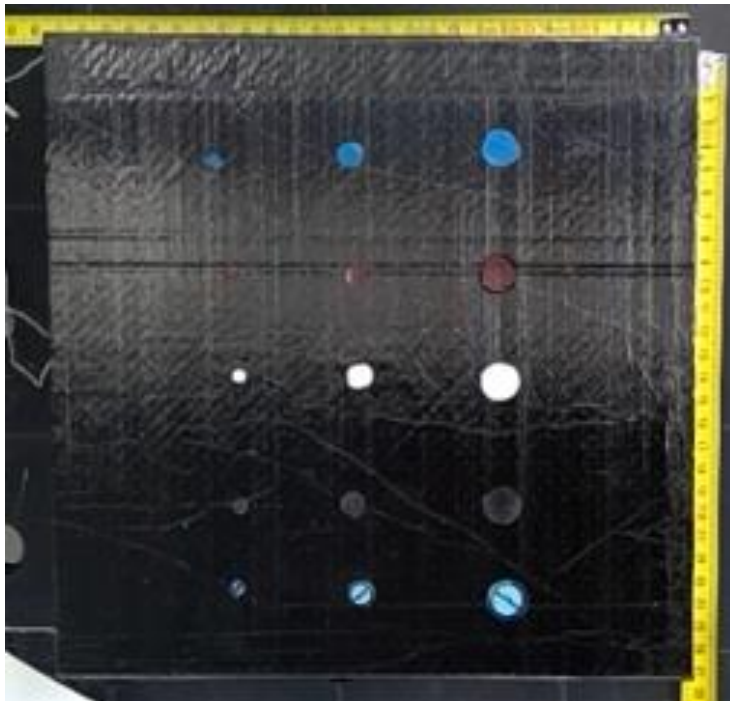


Obrázek 24. Schématický nákres rozložení typů a velikostí jednotlivých umělých vad v jedné sadě. Rozměry v milimetrech.

Pokud by byly všechny sady umístěny na jednu stranu vzorku, nebylo by možné při testu vidět ty, které jsou umístěné hlouběji z důvodu odstínění signálu vadami ležícími nejbližší povrchu.

Proto jsou hloubky a umístění jednotlivých sad následovné (obrázek 25):

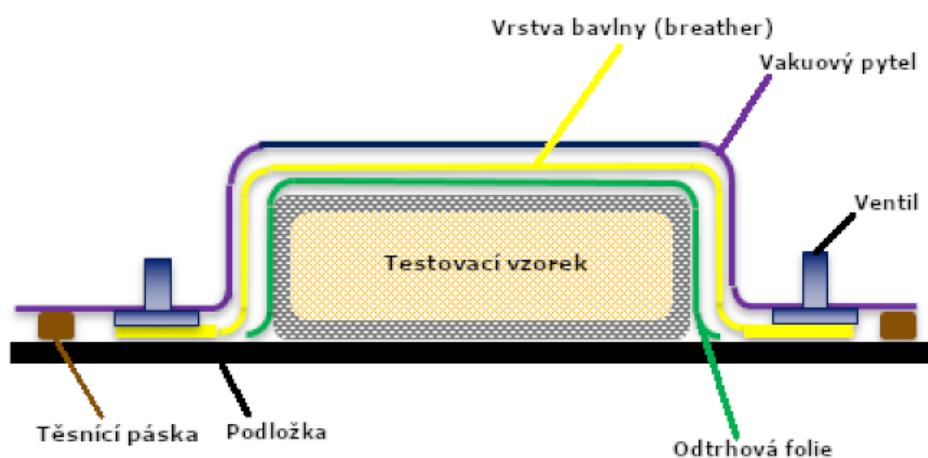
- Sada A – Uložená na 6. vrstvě prepregu a tudíž leží nejhluběji v laminátu. Teoretická hloubka je 4,6 mm. Leží na horní straně vzorku.
- Sada B – Uložená na 20. vrstvě. Teoretická hloubka je 1,8 mm. Leží na spodní straně vzorku.
- Sada C – Uložená těsně pod povrchem na 28. vrstvě. Teoretická hloubka je 0,2 mm. Leží na horní straně vzorku. Oproti sadě A je sada C posunuta asi o 10 mm do levé strany tak, aby nedocházelo k odstínění signálu.



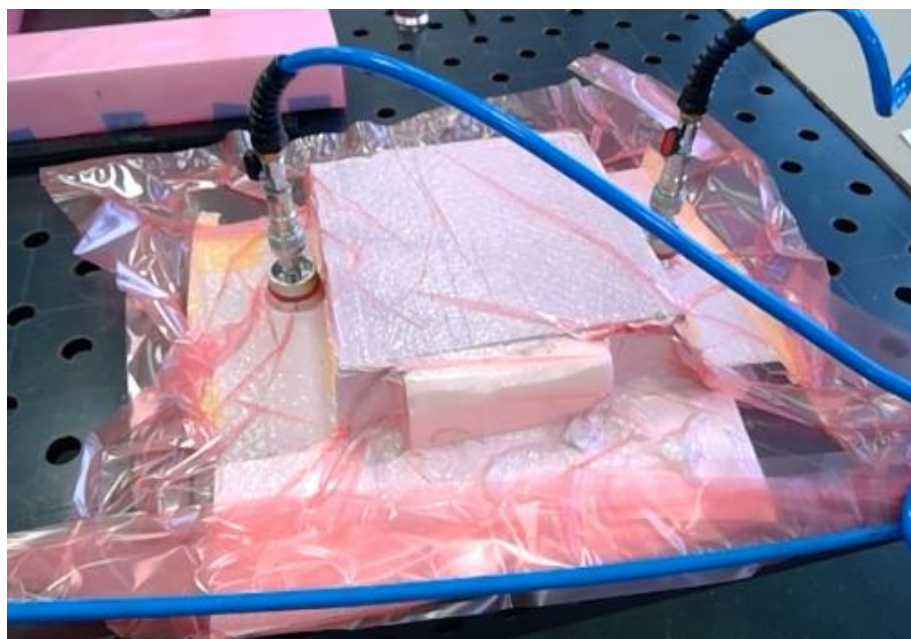
Obrázek 25. Rozložení umělých vad na testovacím vzorku. Stejně pořadí a orientace dodržována u všech sad.

Vzorek byl podroben celkem pěti procesům zhutňování, obvykle označovaných jako debulk. Jedná se o vakuové zabalení výrobku pro zhutnění vrstev, narovnání pokrčených vláken, snížení porozity a celkové zlepšení kvality laminátu. Na vzorek je ve vakuovém pytli položena odtrhová tkanina pro zamezení nežádoucího přilepení a obvykle několik vrstev bavlněné tkaniny umožňující odsátí vzduchu skrze ventily. Podtlak vytvořen v pytli se pohyboval blízko 1 Bar pro co nejlepší odvedení uvězněných bublin plynu z laminátu. Schéma této operace je zobrazeno na obrázku 26.

Proces byl opakován po položení šesté (obrázek 27), jedenácté, patnácté, dvacáté a dvacáté šesté vrstvy prepregu. Pečení vzorku probíhalo podle teplotního schématu doporučeného výrobcem prepregu. Teplota byla snímána pomocí teplotních čidel umístěných na pěnovém jádře pomocí teplotně odolné pásky.



Obrázek 26. Schéma debulku testovacího vzorku.



Obrázek 27. Debulk prvních šesti vrstev prepregu.

5.4 Postup kalibrace a výsledky

Vytvrzený vzorek byl testován ultrazvukovou defektoskopií metodou TTU zařízením Dolphicam 2+ popsáném v části 4.1. Kalibrace byla provedena pro jednu vybranou vadu pro co nejjasnější vyobrazení bez značného zkreslení. Pro přehledné zobrazení a analýzu výsledků celého vzorku byla využita metoda sešívání obrazu, kdy je sonda systematicky posouvána o definovanou vzdálenost a jednotlivé obrazy se skládají do celkového 2D pohledu. Pro snadné a přesné posuny sondy byla na vzorek nakreslena síť bodů (obrázek 28).



Obrázek 28. Testová sestava – Zařízení Dolphicam 2+, sonda se střední frekvencí signálu 5 MHz a testovaný vzorek s vodící sítí.

5.4.1 Kalibrace nastavení

Primárně byl proveden test s výchozím nastavením sondy a zařízení, který slouží jako referenční a zároveň výchozí pro následné modifikace nastavení. Kalibrace byla uskutečněna pro vadu typu 1 o průměru 9 mm v nejhloběji položené sadě A. Nastavení pro zbylé sady a velikosti vad by mělo stejné parametry, pouze by byly brány zobrazení zúženy na pozorovanou hloubku k odstínění šumu a nechtěných signálů. Změny byly prováděny na základě znalostí technologie, zařízení a materiálových vlastností vzorku.

Obraz výchozího nastavení vykazoval malý kontrast mezi oblastmi vady a čistého laminátu, což velmi zhoršuje viditelnost a schopnost odhalit vadu. Procesy debulku a využití silného vakuového balení při výrobě zaručili velmi malou porozitu laminátu, a tudíž i dobrou prostupnost signálu. Šum, který pozorování narušoval byl nejspíše

vyvolán odrazy signálu od zakřivení vláken v látce. Jeho filtrace by pozorování měla zlepšit. Velikost vady byla výrazně zkreslena, bylo naměřeno až 16 mm v průměru. Výrobní odchylka nebyla zanedbatelná, kvůli ruční výrobě se pohybovala u každé vady v rozmezí 1-3 mm. Zkreslení reálných rozměrů způsobuje nejspíše rozptýl signálu na okrajích. Naměřené hloubka se pohybovala okolo 4,5 mm. To zhruba odpovídá teoretické, avšak použitá rychlost zvuku v materiálu by měla být kalibrována pro přesnější měření hloubky pomocí funkce A-skenu. Obraz získaný tímto nastavením je zobrazen na obrázku 30a.

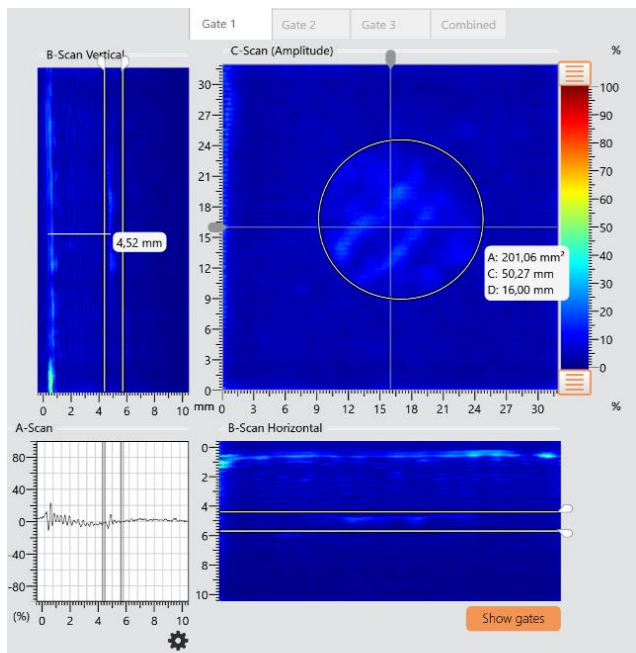
Následovala úprava základního nastavení, pro zlepšení všech aspektů zobrazení popsaných v předchozím odstavci. Pomocí časově korigovaného digitálního přírůstku (TCG) byla uměle zvýšena amplituda signálu odraženého v hloubce pro větší kontrast vady v laminátu. To mělo za důsledek zvýšení amplitudy již silného odrazu od přední stěny, který musel být pomocí posunu přímky do záporných hodnot zeslaben. Porovnání normálního i časově korigovaného digitálního přírůstku lze vidět na obrázku 30c a 30d. Pro omezení šumu byl filtr frekvenčního šumu (FIR) byl upraven pro filtraci vysokých frekvencí a signálové průměrování zdvojnásobeno. Tímto byl šum lehce omezen, avšak díky velmi malé porozitě tyto operace nebyly klíčové. Rychlost zvukového signálu byla upravena dle doporučení funkce programu pro přesnější měření hloubky. Obraz získaný modifikovaným nastavením (obrázek 29b) je zřetelnější a umožňuje lehce nalézt a měřit chyby v hloubce 4–6 mm. Je ale nutno brát v potaz umělé zesílení signálu při evaluaci vady. Ten byl zesílen z výchozí amplitudy 8 dB na 20 dB což lze vidět na A-skenu na obrázku 29a a 29b. Jako obecná hranice rozlišitelnosti je udávána hodnota 6 dB [9].

Jako médium pro přenos signálu ze sondy byl použit Sonotech Ultragel II. Tento gel je navržen pro užití s leteckými kompozity.

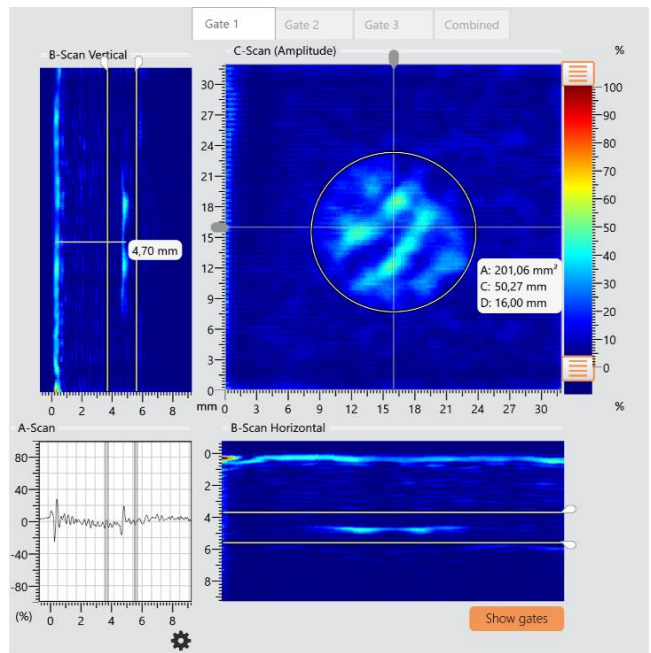
Hodnoty upravovaných veličin obou nastavení jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3. Hodnoty vybraných veličin výchozího a upraveného nastavení.

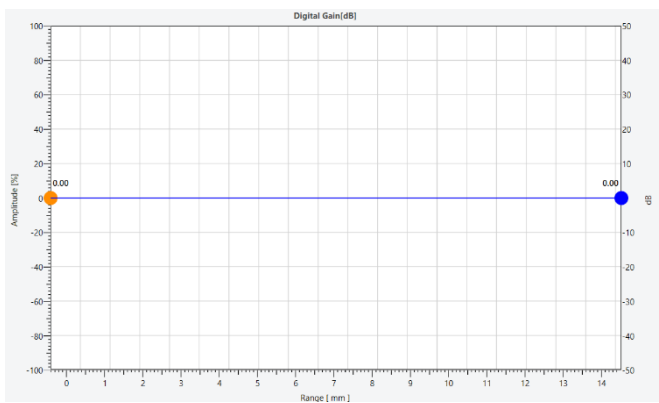
Veličina a jednotka	Nastavení	
	Výchozí	Upravené
Viditelná hloubka [mm]	10	8
Rychlost zvuku v materiálu [m/s]	3000	3070
Digitální přírůstek [dB]	0	-4
Časově korigovaný digitální přírůstek [dB/μs]	0	1,2
Počet průměrování signálu [1]	2	4
FIR Filtr [MHz]	8	11



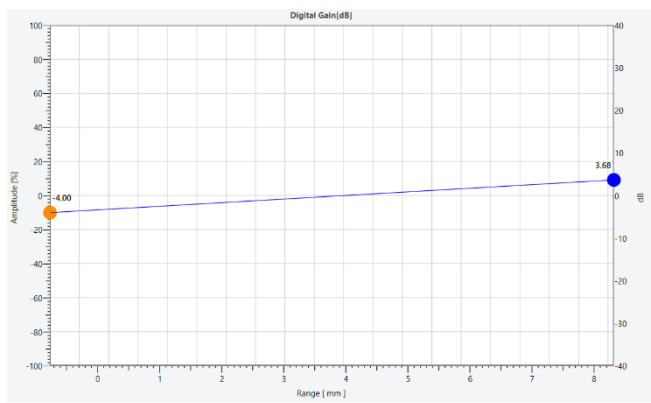
a



b



c



d

Obrázek 29. Srovnání obrazů a křivek digitálního přírůstku signálu výchozího (a, c) a modifikovaného nastavení (b, d).

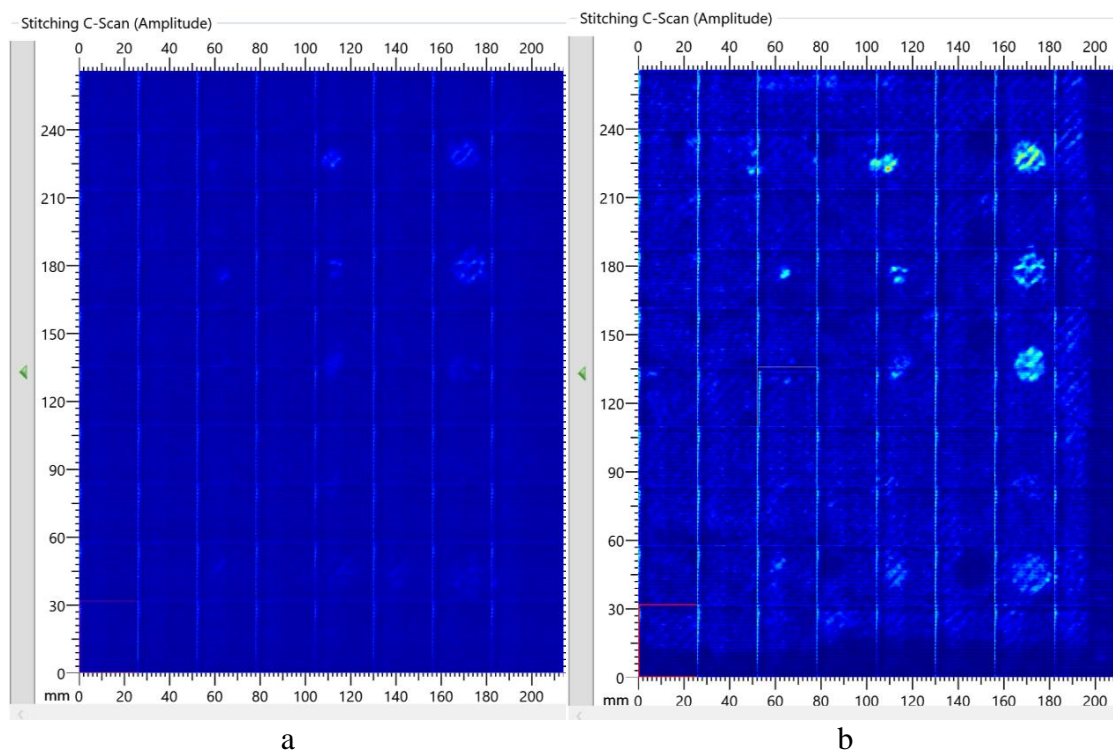
5.4.2 Výsledky kalibrace na testovacím vzorku

Testování vyrobeného vzorku modifikovaným nastavením bylo provedeno celkem třikrát. Jednou ze spodní strany pro sadu B (obrázek 31) a dvakrát ze strany horní pro sady A (obrázek 30) a C (obrázek 32). Účel testu bylo nejen posoudit kvalitu nastavení pro různé hloubky, ale také zjistit, které typy vad uvedené v kapitole 4.2 jsme metodou schopni odhalit. Pro znázornění, jak pozitivně změny ovlivnili kvalitu obrazu, je každá sada vyobrazena výchozím i upraveným nastavením.

5.4.2.1 Sada A

Nejhluběji položená sada vykazovala velmi slabý signál při využití výchozího nastavení. Vady typu 1 a 2 byly z části viditelné, avšak zbylé typy by při normálních podmínkách nebyly nalezeny.

Upravené nastavení zvýšilo kontrast a tím i rozlišitelnost vad od pozadí. Typy 4 a 5 se zdají být málo odrazivé pro ultrazvukový signál a tím i hůře detekovatelné. Typy 1, 2 a 3 byly úspěšně lokalizovány. Občasné světlé pásy jsou způsobeny nedokonalým přiložením sondy na povrch vzorku což se stává zejména na okrajích, kde se ztrácí kontakt kvůli nedostatku přenosového média (gelu). Signál manuálně omezen na hloubku 3 – 6 mm aby nedošlo k zobrazení vad třetí sady. To omezuje také zobrazení signálu od přední stěny, který by jinak značně znehodnotil test. Vady třetí sady však signál nepropustí a zanechají po sobě slepá místa, která jsou viditelná na obrázku 31b. Reálná naměřená hloubka byla 4,7 mm, což je jen minimální odklon od teoretické zmíněné v kapitole 4.2.



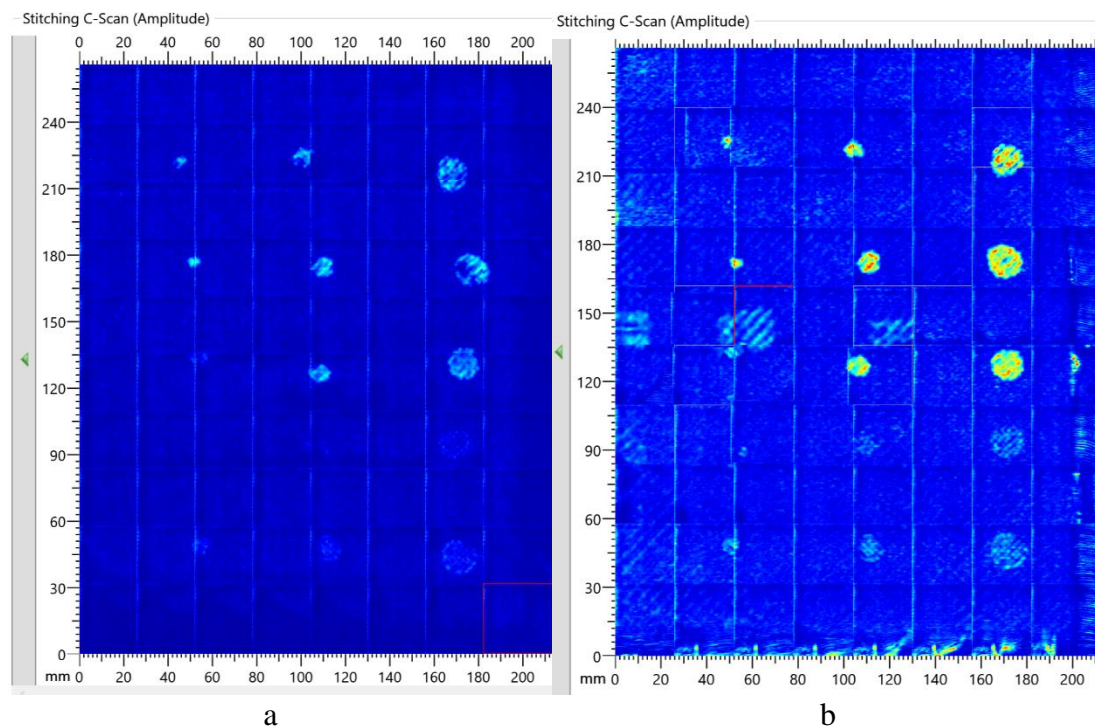
Obrázek 30. Sada A vyobrazená výchozím (a) a modifikovaným nastavením (b).

5.4.2.2 Sada B

Znatelně nižší hloubka sady B umožnila její zobrazení již výchozím nastavením díky menšímu rozptylu signálu při průchodu skrze vlákna. Obraz vad typů 3 a 4 byly opět velmi nezřetelné a jen těžko měřitelné (obrázek 31a).

I zde upravené nastavení dokázalo zásadně zlepšit vyobrazení. Všechny typy vad byly rozlišitelné od pozadí a jejich průměry změřitelné. Bylo možno vidět i všechny velikosti čtvrtého typu vady. Brány byly posunuty do hloubky 1–7 mm opět z důvodu odstínění signálu přední stěny. Reálná hloubka sady byla 1,78 mm. Na obrázku 32b je jasně vidět různá odrazivost signálu jednotlivými typy vad.

Uprostřed obrázku 32b lze vidět pásku přidržíjící termočlánek, kterým byla při výrobě monitorována teplota na přechodu laminátu a jádra. Tento úkaz se nacházel pod zadní stěnou laminátu v hloubce 6 mm.



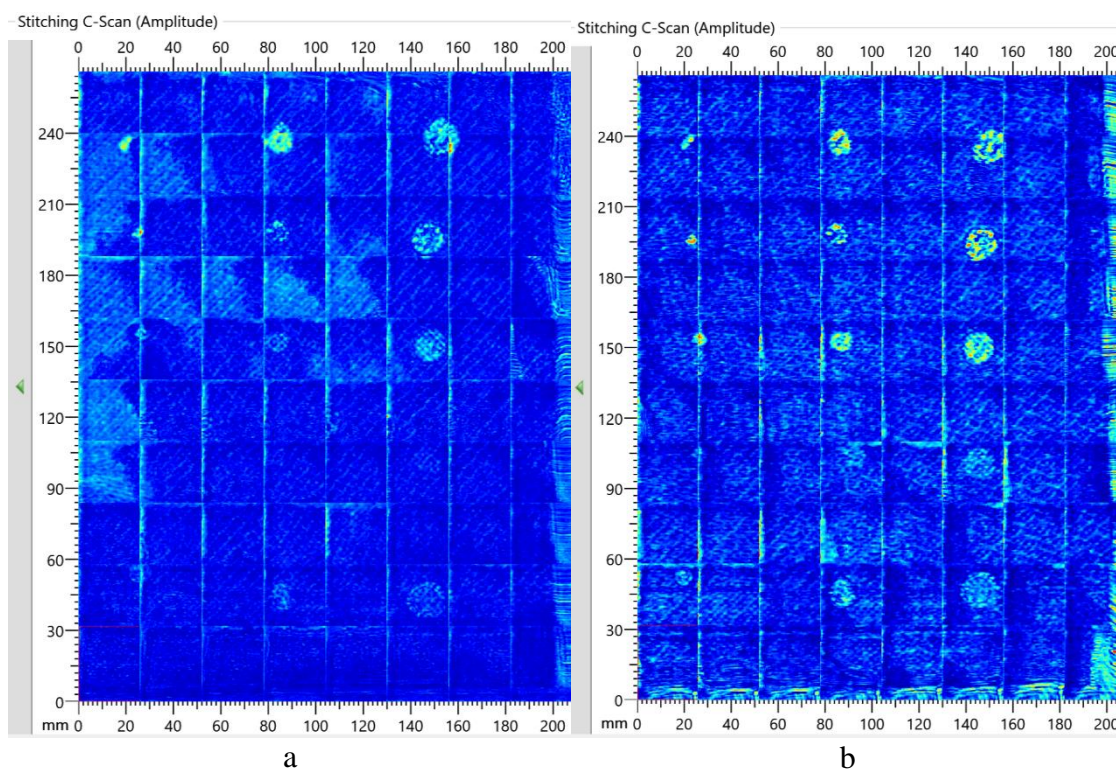
Obrázek 31. Sada B vyobrazená výchozím (a) a modifikovaným nastavením (b).

5.4.2.3 Sada C

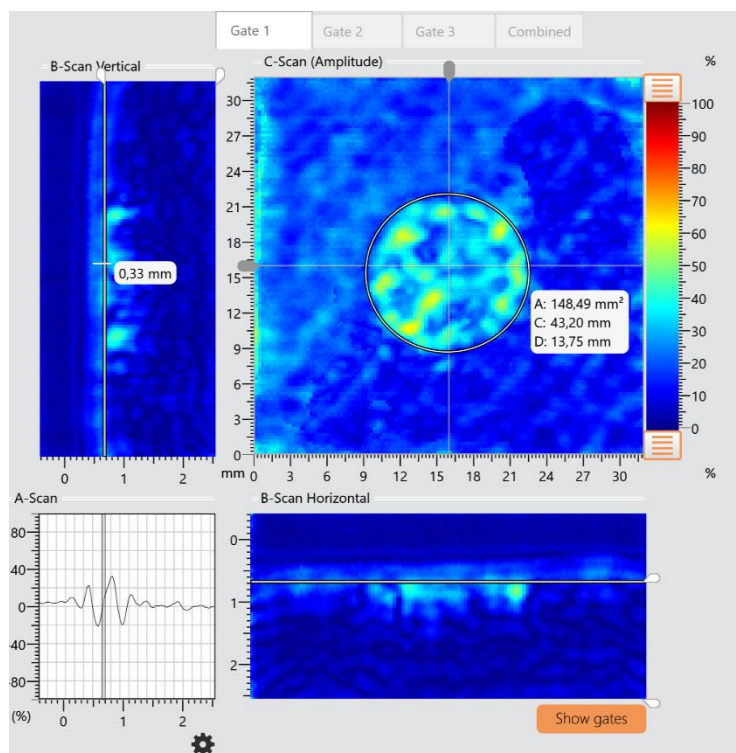
Povrchu blízka sada C leží v hloubce asi 0,33 mm. Kvůli poloze neměl obraz znatelné a ostré přechody, což značně ztěžovalo měření hloubky (obrázek 33) a způsobilo relativně velkou odchylku od hloubky teoretické.

Modifikované nastavení umožnilo odhalení všech typů a velikostí vad. Slabý signál vad typů 4 a 5 potvrdil již předešle zjištěnou malou odrazivost ultrazvukového signálu materiálem vad těchto typů. Nejmenší vada typu 4 a průměru 3 mm byla chybně zobrazena z důvodu překrývání jednotlivých snímků při skládání celkového obrazu.

Velký šum mezi jednotlivými vadami byl způsoben již zmíněnou malou hloubkou sady. Ten byl tvořen povětšinou odrazem od přední stěny laminátu, který byl jen obtížně filtrován.



Obrázek 32. Sada C vyobrazená výchozím (a) a modifikovaným nastavením (b).



Obrázek 33. Zobrazení největší vady typu 2 v sadě C. Velké přiblížení, odraz a rozptyl signálu ztěžuje přesné změření hloubky.

5.4.3 Zhodnocení

Testovací vzorek s umělými vadami byl otestován pomocí modifikovaného nastavení pro určení míry zlepšení viditelnosti jednotlivých vad oproti nastavení výchozímu. To ukázalo celkové zlepšení viditelnosti u sady ve velmi malé, střední a velké hloubce v laminátu. Zlepšení je kvantifikováno pomocí velikosti amplitudy odraženého signálu v tabulce 4.

Tabulka 4. Procentuální průměrné zvětšení amplitudy odraženého signálu jednotlivých sad. Postupné zvyšování s hloubkou v laminátu je primárně způsobeno křivkou digitálního přírůstku (obrázek 29d). Vypočteno na základě A

Sada (hloubka)	Průměrná změna amplitudy
A (4,7 mm)	+125%
B (1,78 mm)	+68%
C (0,33 mm)	+48%

Změny amplitudy uvedené v tabulce 4 výrazně pomohly k odhalení vad s malou odrazivostí ultrazvukového signálu. Větší kontrast pak zajistil přesnější měření rozměrů, které však byly mírně zkresleny ve srovnání se skutečnými. Metoda skládání obrazů se ukázala jako vhodná pro tvoření přehledné mapy rovinných vzorků s minimálním zakřivením.

Signál sady C částečně splýval se signálem přední stěny, a proto je jeho přesná hloubka jen těžce změřitelná. Pro použitou sondu o střední frekvenci 5 MHz se tedy nejmenší rozlišitelná hloubka vady pod povrchem pohybuje okolo 0,2 mm.

6. DOPORUČENÁ METODIKA TESTU LAMINÁTOVÝCH VRTULÍ ULTRAZVUKOVOU DEFEKTOSKOPIÍ

6.1 Nastavení zařízení

Ačkoli je nastavení zařízení pro testování vrtulí téměř stejné jako u testovacího vzorku, složitá geometrie vrtule vyžaduje zcela odlišný přístup při testování ultrazvukovou defektoskopií.

Doporučeným upravovaným parametrem je pouze hloubka snímání sondy a digitální přírůstek. Tloušťka laminátu vrtulí často nepřesahuje 5 mm, a proto je vhodné upravit snímanou hloubku na hodnotu blízkou tloušťce zkoumaného vzorku.

Digitální přírůstek by měl být také upravován na základě znalosti tloušťky vzorku. Přílišné zeslabení amplitudy signálu z malé hloubky by mohlo zamezit odhalení vad blízkých povrchu. Naopak příliš vysoké zesílení může způsobit zaměnění pouhého signálu odraženého od záhybu tkaniny za vadu.

6.2 Postup testování

Kvůli zakřivení ploch je sonda v kontaktu s vrtulí jen částečně. Tato skutečnost znemožňuje použití metody sešívání obrazu pro celou vrtulí, a tudíž je vrtule skenována nepřetržitě a případné nálezy jsou dokumentovány v průběhu testu.

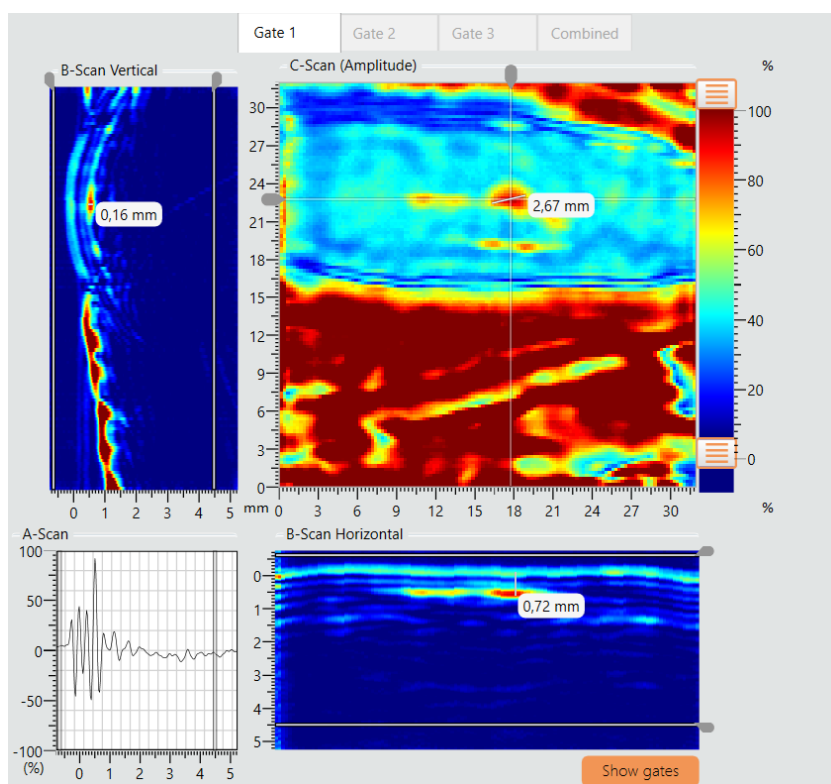
Test je prováděn na každém listu individuálně, nejčastěji od kořene ke špičce listu s dodatečným zaměřením na střed vrtule. Doporučené směry pohybu sondy při testu jsou schematicky zobrazeny na obrázku 34. Kvůli zakřivení je reálný obraz zobrazen pouze na části sondy (obrázek 35 a 36). Takto zakřivené povrchy jsou testovány plynule od náběžné hrany k odtokové. Postup je opakován pro zbylé listy a také pro spodní stranu vrtule. Ta je nejčastěji konkávní, a proto je nutné použít dostatek gelového média pro přenos signálu do vzorku. U testování spodní strany by byl signál přední stěny velmi obtížně filtrován, a proto je většinou součástí celkového pohledu C–skenu, což je nutné brát v potaz při vyhodnocení (obrázek 37).



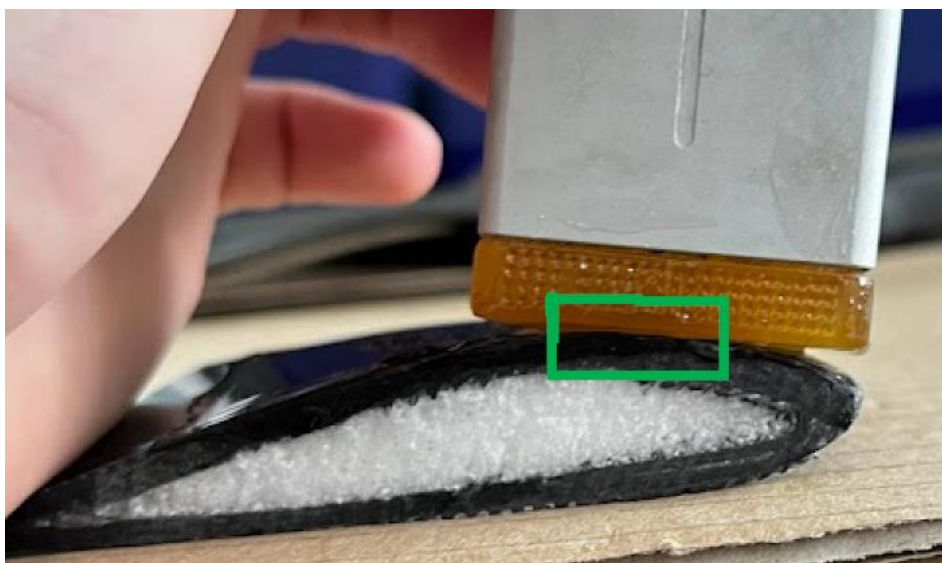
Obrázek 34. Doporučené směry postupu při testování ultrazvukem.

Rychlost testu je závislá na velikosti, míře zakřivení (tj. velikosti stoupání) a počtu listů vrtule. Obecně čím více je vrtule zakřivená, tím náročnější je polohovat sondu kolem povrchu a tím delší je čas testu. U vrtulí s velkým stoupáním je rychlost skenování okolo $1000 \text{ mm}^2/\text{min}$. Naopak u vrtule s malým stoupáním a zakřivením ploch listů se dostaneme až k hodnotám $8000 \text{ mm}^2/\text{min}$.

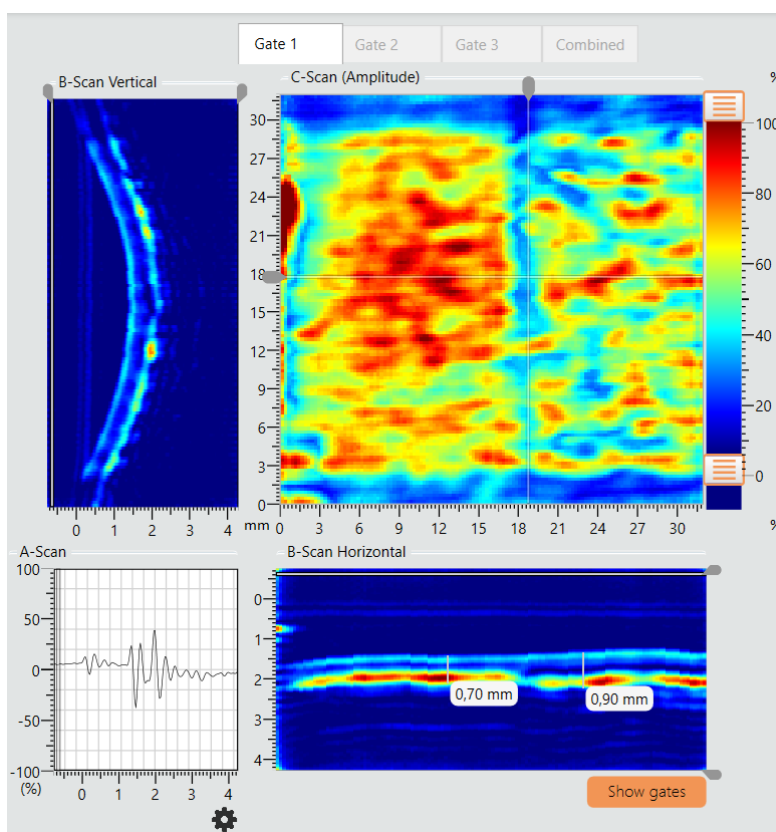
Ne vždy je nutné a žádoucí testovat celou vrtuli, a to zejména u vrtulí velkých rozměrů. Analýza a testy provedené na vyrobených prototypu mohou determinovat kritická místa, kde jsou vady struktury značným rizikem. Na těchto místech je potřeba vadám předejít a případně je objevit před uvedením vrtule do provozu. Obvykle se jedná o místa blízka kořenu vrtule, se značným zakřivením ploch a místa složité vnitřní struktury. Takto lze značně snížit časovou náročnost testování a zajistit kvalitu vyrobených kusů.



Obrázek 35. Obrázek velmi zakřivené plochy s vadou. Reálný obraz je pouze na horní polovině sondy.



Obrázek 36. Oblast kontaktu sondy se zakřiveným povrchem vrtule zvýrazněna zeleně.



Obrázek 37. Konkávní plocha spodní strany listu lze vidět vlevo na obrazu vertikálního B–skenu. Na C–skenu je zobrazen je přechod dvou druhů tkanin ve vnitřní struktuře. Obraz obsahuje signál odražený od přední stěny.

7. REÁLNÝ TEST VRTULE

Metodika NDT vrtulí z kapitoly 3.1 byla využita při testu vrtule s označením 30 x 10 CW (obrázek 38). Rozměry v palcích odpovídají značení: největší rozměr vrtule x stoupání. Značka CW udává směr otáčení ve směru hodinových ručiček.



Obrázek 38. Dvoulistá vrtule 30 x 10.

Po vytažení vrtule vyrobené standartní mokrou laminací z formy byla vizuální kontrolou objevena nedokonalost na spodní straně povrchové vrstvy jednoho z listů (obrázek 39). Označenou oblast bylo proto nutné dále prozkoumat pro definování míry poškození, zjištění příčiny a prevenci proti vzniku podobných nedokonalostí při další výrobě.



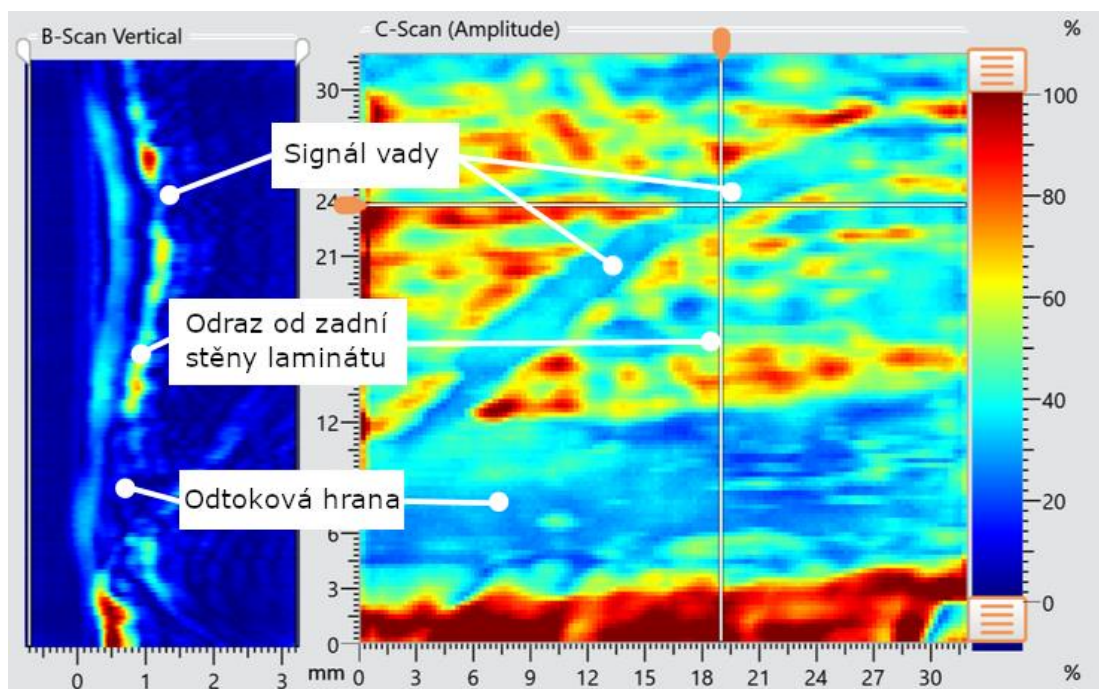
Obrázek 39. Vada povrchové vrstvy vrtule obloukového tvaru pod vyznačenou čarou o délce 78 mm. Na náběžné i odtokové hraně jsou otřepy z výroby vrtule.

Bezchybný laminát vykazuje využitím akustické metody hodnotu zobrazenou zařízením okolo 1000 μS , a naopak hodnota nad delaminací dosahuje i 1300 μS . Průměrná hodnota v oblasti nalezené vady nevykazovala žádnou abnormální hodnotu a pohybovala se v rozmezí 1050–1160 μS . Tímto můžeme vyřadit podezření na delaminaci a praskliny laminátu. Místo nedokonalosti pak bylo prozkoumáno pomocí ultrazvukového zařízení

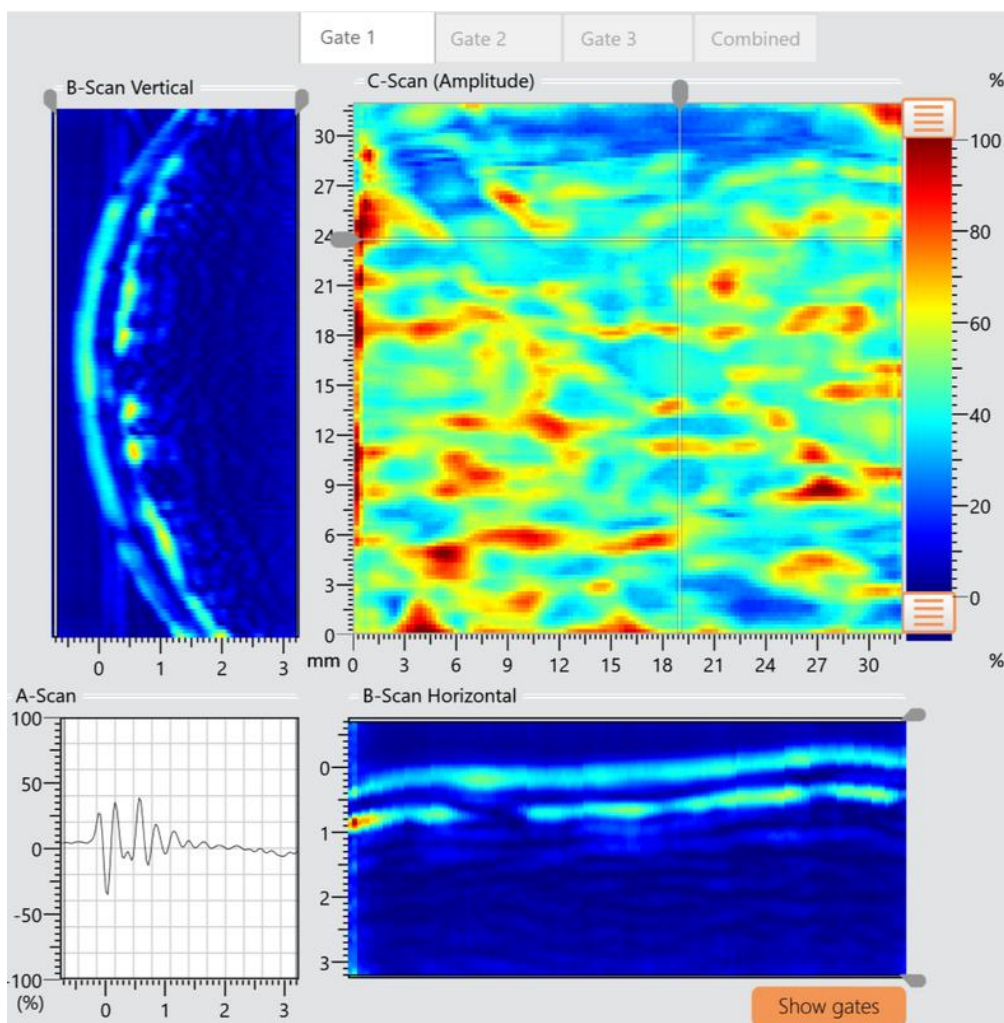
a nálezy byly zdokumentovány (obrázek 40 a 41). Test byl omezen jen na část vrtule, a tudíž jeho délka nepřesahovala 30 minut.

Po analýze snímků je jasné, že defekt prostupuje do pěnového jádra vrtule kvůli velmi slabému až žádnému signálu od zadní stěny. Viditelně narušuje jinak spojitý signál od rozhraní laminát/jádro. Vylučuje se tímto porozita, nenasytění epoxidem a další defekty povrchové vrstvy laminátu. Na základě všech provedených testů je tedy zřejmé, že se jedná o prasklinu v jádře vyplněnou epoxidovou matricí, kterou signál putuje hlouběji do jádra a zamezuje odrazu.

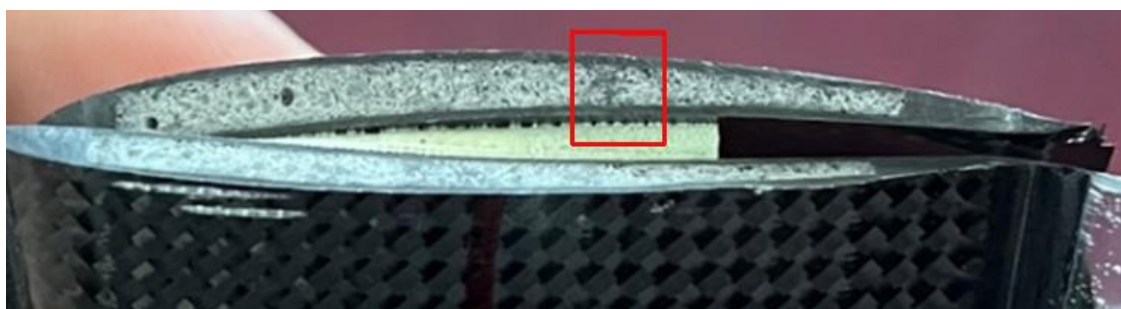
Vrtule byla vyřazena a zbývající pěnová jádra ze stejné šarže zkontrolována. Vše vedlo k nalezení chyby ve výrobní formě pro pěnová jádra a návratu k výrobě vrtulí splňujících požadavky kvality. Pro potvrzení tohoto tvrzení byla vrtule dodatečně rozřezána (obrázek 42) a uschována jako referenční vzorek pro případné další problémy při výrobě. Metodika potvrdila svou schopnost objevovat jak chyby povrchové, tak i strukturní bez potřeby ničit testovaný kus. Díky nabitým zkušenostem obsluha může tento typ vady definovat již po vizuální kontrole a zrychlit tak proces kontroly kvality.



Obrázek 40. Obrázek ultrazvukové defektoskopie poloviny obloukového defektu na obrázku 39. Poloha kurzoru odpovídá řezu na obrázku 41.

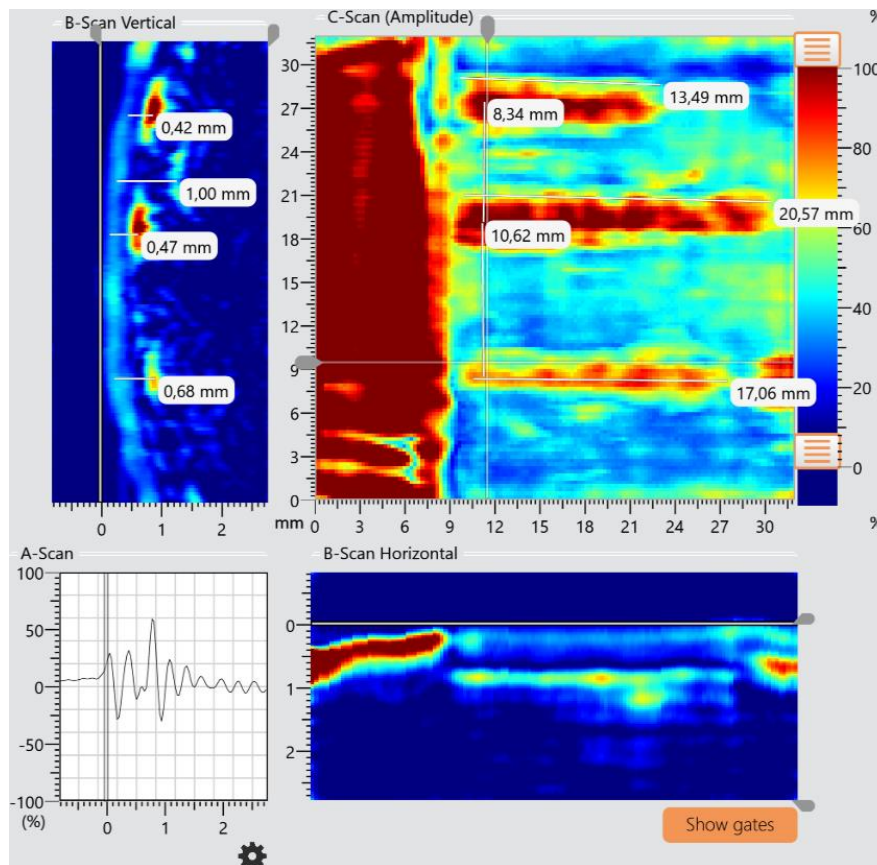


Obrázek 41. Obraz poloviny obloukového defektu na obrázku 39 ze spodní strany. B-skeny ukazují díru v odraženém signálu zadní stěny.

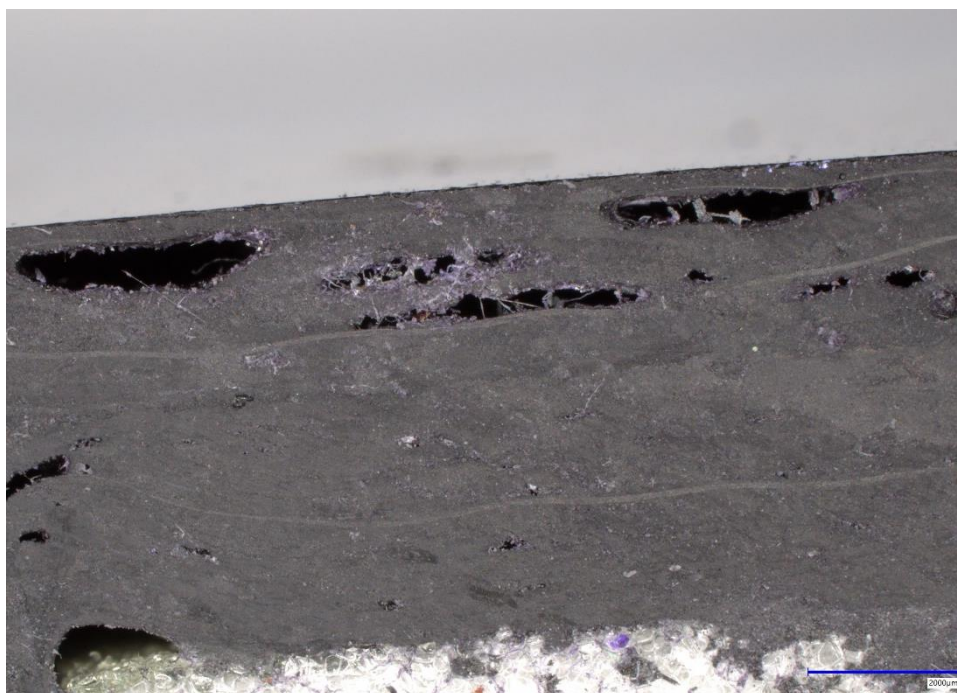


Obrázek 42. Místo prasknutí pěnového jádra vyplněné epoxidem označeno červeným rámečkem.

Díky možnosti vrtuli rozřezat a potvrdit přítomnost nálezů byl po vyřazení dodatečně proveden test druhého listu, který odhalil seskupení bublin ve struktuře (obrázek 43). Řez skrze vady potvrdil, že se opravdu jedná o bubliny (obrázek 44). Naměřené rozměry defektů jsou mírně větší než rozměry reálné, což bylo očekáváno.



Obrázek 43. Nález koncentrace větších bublin ve struktuře.
V kontaktu s plochou je jen část sondy z důvodu zakřivení plochy vrtule.



Obrázek 44. Shluk bublin pod povrchem vyřazené vrtule v řezu. Odpovídá nálezu na obrázku 43.

8. ZÁVĚR

Rešeršní výběr metod potvrdil předpokládanou nadřazenost ultrazvukové defektoskopie nad ostatními metodami nedestruktivního testování v oblasti laminátů. Ta umožňuje efektivní odhalení pěti ze šesti zkoumaných typů vad vrtulí, což z ní činí klíčový nástroj pro správné testování těchto komponent.

Proces kalibrace nastavení vybraného zařízení byl proveden na speciálně vyrobeném testovacím vzorku, který byl konstruován tak, aby obsahoval šest různých typů vad ve třech různých velikostech a třech sadách, umístěných do různých hloubek v laminátu. Konkrétně byly vady umístěny ve hloubkách 0,33 mm, 1,78 mm a 4,7 mm. Pro vytvoření těchto vad byly použity materiály běžně používané při výrobě a zpracování kompozitních materiálů a při výrobě leteckých vrtulí. Samotný proces kalibrace zahrnoval úpravu výchozích nastavení zařízení a pozorování zlepšení kvality obrazu a rozlišitelnosti jednotlivých vad. Zlepšení bylo kvantifikováno pomocí přírůstku amplitudy přijímaného signálu odraženého od vad ve srovnání s výchozím nastavením. Průměrné zlepšení amplitudy činilo pro nejhlubší vady +125 %, pro středně hluboké vady +68 % a pro vady blízké povrchu +48 %. Tato s hloubkou se zvětšující hodnota je důsledkem nastavením časově korigovaného přírůstku amplitudy, zmírněním okolního šumu a přesnou kalibrací rychlosti zvukového signálu vzorkem.

Během pozorování byl objeven nový poznatek, který naznačuje, že při zobrazení se rozměry vad zdají větší, než jsou ve skutečnosti. Díky znalosti předem stanovených rozměrů bylo možné porovnat skutečné a naměřené hodnoty. Měření odchylek se však lišilo pro každý typ vady a jejím umístění, a proto nebyly specifické hodnoty v této souvislosti uváděny. Při interpretaci výsledků testování je nutné brát tuto skutečnost v úvahu. Pro přesné určení této odchylky od reálných rozměrů je nutné provést další řádné experimenty a měření, na které zde nebyl prostor.

Na základě získaných poznatků z kalibrace na testovacím vzorku byla následně vypracována doporučená metodika pro testování laminátových vrtulí. Metodika má vést operátora, jak postupovat při testu, které parametry je vhodné měnit a jak postupovat podél zakřivených ploch listů vrtule. Cílem je zajistit správný a efektivní postup při testování a získání co nejpřesnějších výsledků.

Ověření celého postupu nedestruktivního testování bylo provedeno na vrtuli 30 x 10 CW. Zvolené metody, testy a následné vyhodnocení jednoznačně potvrdili schopnost metodiky odhalit řadu vad struktury vrtule. Vrtule byla vyřazena, a tudíž následně rozřezána, což potvrdilo přítomnost všech nálezů a hlouběji potvrdilo správnost doporučených postupů.

Výsledky této práce mají přímý přínos pro zajištění bezpečnosti letového provozu prostřednictvím vylepšeného nedestruktivního testování laminátových vrtulí. Navržená doporučená metodika poskytuje efektivní nástroj pro spolehlivé a precizní hodnocení stavu těchto důležitých leteckých komponentů. Práce také představuje důležitý krok směrem k optimalizaci a zefektivnění nedestruktivního testování laminátových vrtulí a nabízí základ pro další výzkum a rozvoj v této oblasti.

9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BEŇO, Luděk. Letadla. 2. přepracované vydání. Praha: Česká technika, 2022, 433 stran: ilustrace, grafy. ISBN 978-80-01-06959-2.
- [2] GAY, Daniel a Suong V. HOA. Composite materials: design and applications. 2nd. ed. Boca Raton: CRC, 2007, xiv, 548 s.: il. ISBN 978-1-4200-4519-2.
- [3] HUJEČEK, Zdeněk. Vrtule: studijní modul 17. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. s. 9. ISBN 80-720-4363-3
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] HELLIER, Charles J. Handbook of nondestructive evaluation. Třetí vydání. New York: McGraw-Hill, [2020]. ISBN 978-1260441437.
- [6] R.H., Bossi a Giurgiutiu V. Polymer Composites in the Aerospace Industry.: Nondestructive testing of damage in aerospace composites. [online]. Woodhead Publishing, 2015, s. 413-448 [cit. 2023-03-19]. ISBN 9780857095237. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-523-7.00015-3>
- [7] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie. Praha: BEN – technická literatura, 2013, 290 s. ISBN 978-80 7300-466-8.
- [8] TRM 5 MHz. [Www.dolphitech.com](http://www.dolphitech.com) [online]. Dolphitech AS, 2022 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.dolphitech.com/products/trm-5mhz>
- [9] Ultrasonic testing of composite structures and bonded assemblies. Interní dokument, 2020, poskytla firma Mejlík Propellers s.r.o.
- [10] Software user manual v1.6.0, Interní dokument, 2022, poskytla firma Mejlík Propellers s.r.o.