

# Detekce vody ve voštinových sendvičových panelech

Ing. Petr Blažek

---

Bakalářská práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Petr Blažek**

Osobní číslo: **T14057**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Detekce vody ve voštinových sendvičových panelech**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická část
2. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
3. Praktická část
4. Připravte potřebný počet vzorků voštinových polymerních kompozitních sendvičových panelů.
5. Proveďte zkoušky detekce vody ve voštinových polymerních kompozitních sendvičových panelech aspoň dvěma metodami.
6. Vyhodnoťte provedené zkoušky a vyberte metodu vhodnou pro použití v praxi.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle pokynů vedoucího bakalářské práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Alexander Čapka**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**2. ledna 2018**

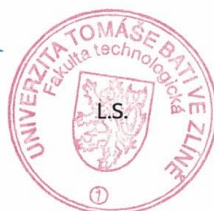
Termín odevzdání bakalářské práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 28. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: Petr Blažek

Obor: Technologická zařízení

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně, 2.5.2018



<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem práce je zjištění, zda jsou pasivní infračervená termografie a zkouška poklepem vhodné metody pro detekci vody v sendvičových panelech leteckých konstrukcí.

Teoretická část práce je věnována kompozitním materiálům, sendvičovým panelům s voštinovým jádrem, jejich vadám a možnostem jejich nedestruktivního testování. Následuje popis dvou vybraných metod nedestruktivního testování, které jsou aplikovány v praktické části.

Praktická část práce zahrnuje výrobu zkušebních desek voštinových sendvičových panelů a injektáž vody do několika buněk jádra zkušebních desek. Na takto připravených vzorcích jsou provedeny experimentální zkoušky za využití pasivní infračervené termografie a zkoušky poklepem s cílem detekovat vodu v jádru zkušebních desek. Výsledkem práce je zhodnocení použitelnosti obou metod a výběr metody, která je vhodná pro testování v praxi.

Klíčová slova: sendvičový panel s voštinovým jádrem, nedestruktivní testování, detekce vody, infračervená termografie, zkouška poklepem

## **ABSTRACT**

The aim of the thesis is to find out whether passive infrared thermography and tap testing are suitable methods for detecting water in sandwich panels used in aviation structures.

Theoretical part describes composite materials, sandwich panels with honeycomb core, their defects and possibilities of their non-destructive testing. In the second part, two selected non-destructive testing methods are described. Those methods are applied in practical part.

Practical part of the thesis involves production of honeycomb sandwich test panels and injection of water into several core cells. Experimental tests are performed on prepared samples using passive infrared thermography and tap test in order to detect water in the core. The result of the work is evaluation of usability of both methods and selection of a method that is suitable for water detection in regular terms.

Keywords: sandwich panel with honeycomb core, non-destructive testing, water detection, infrared thermography, tap testing

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce, panu Ing. Alexandru Čapkovi, za cenné rady a připomínky při psaní bakalářské práce.

Tato bakalářská práce byla realizována s finančním příspěvím interního grantu UTB ve Zlíně č. IGA/FT/2018/004 financovaného z prostředků specifického univerzitního výzkumu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OB SAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 PROBLEMATIKA AKUMULACE A DETEKCE VODY V JÁDRU VOŠTINOVÝCH SENDVIČOVÝCH PANELŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 AKUMULACE VODY V JÁDRU .....	12
1.2 DETEKCE VODY V JÁDRU .....	13
1.3 CÍL PRÁCE A METODIKA PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	15
<b>2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>16</b>
2.1 DEFINICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	16
2.2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ KOMPOZITŮ .....	16
2.3 KLASIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	18
2.4 PREPREGY .....	20
<b>3 SENDVIČOVÉ PANELY</b> .....	<b>22</b>
3.1 CHARAKTERISTIKA A VÝHODY SENDVIČOVÝCH PANELŮ .....	22
3.2 POTAH.....	24
3.3 JÁDRO .....	24
3.4 VYUŽITÍ KM A VSP V LETECKÉM PRŮMYSLU .....	26
3.5 VÝROBA ZKUŠEBNÍ DESKY VSP ZE SKELNÉHO PREPREGU .....	27
<b>4 VADY SENDVIČOVÝCH PANELŮ</b> .....	<b>29</b>
4.1 VADY POTAHŮ.....	29
4.2 VADY SENDVIČOVÝCH PANELŮ .....	32
4.2.1 Poškození VSP kolizí s cizím předmětem .....	32
4.2.2 Poškození VSP v důsledku mechanického namáhání .....	34
4.2.3 Poškození VSP v důsledku ztráty adheze a koheze .....	36
4.2.4 Poškození VSP v místě spojů.....	38
4.2.5 Poškození gelcoatu VSP .....	39
4.2.6 Poškození VSP úderem blesku.....	40
<b>5 NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ</b> .....	<b>41</b>
5.1 DEFINICE NDT .....	41
5.2 KLASIFIKACE METOD NDT .....	42
5.3 NDT KOMPOZITŮ A SENDVIČOVÝCH PANELŮ .....	44
<b>6 INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE</b> .....	<b>45</b>



6.1	TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ.....	45
6.2	INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ .....	46
6.3	INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE .....	48
<b>7</b>	<b>ZKOUŠKA POKLEPEM .....</b>	<b>52</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK .....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>INJEKTÁŽ VODY DO ZKUŠEBNÍCH DESEK.....</b>	<b>59</b>
<b>10</b>	<b>EXPERIMENT I – INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE .....</b>	<b>61</b>
10.1	POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	61
10.2	MĚŘENÍ A VÝSLEDKY .....	62
10.3	ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....	65
<b>11</b>	<b>EXPERIMENT II – ZKOUŠKA POKLEPEM .....</b>	<b>66</b>
11.1	POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	66
11.2	MĚŘENÍ A VÝSLEDKY .....	66
11.2.1	Hodnocení zvuku poklepu metodou prostého poslechu.....	67
11.2.2	Analýza zvuku poklepu pomocí softwaru Spectrum.....	68
11.2.3	Analýza zvuku poklepu pomocí spektrogramu v softwaru Spectrum View .....	68
11.3	ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU .....	69
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>70</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>72</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>76</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>77</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>80</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>81</b>

## ÚVOD

Cílem práce je zjištění, zda jsou pasivní infračervená termografie a zkouška poklepem vhodné metody pro detekci vody v sendvičových panelech leteckých konstrukcí.

Přítomnost vody uvnitř sendvičových panelů používaných na konstrukci dopravních letadel představuje vážné bezpečnostní riziko. V důsledku opakovaného vystavování teplotám pod a nad bodem mrazu dochází k periodické změně skupenství vody na led a opačně. Při mrznutí vody dochází k její objemové roztažnosti, což se projeví rozpínáním akumulované vody v jádře a jejím tlakem na okolní stěny. Výsledkem je cyklické namáhání stěn jádra i vazeb mezi jádrem a potahem, což může vést až k rozlepení panelu a následné letecké katastrofě. Dalším problémem je zvyšování celkové hmotnosti letadla nebo změna jeho těžiště. V některých případech navíc hrozí koroze jádra.

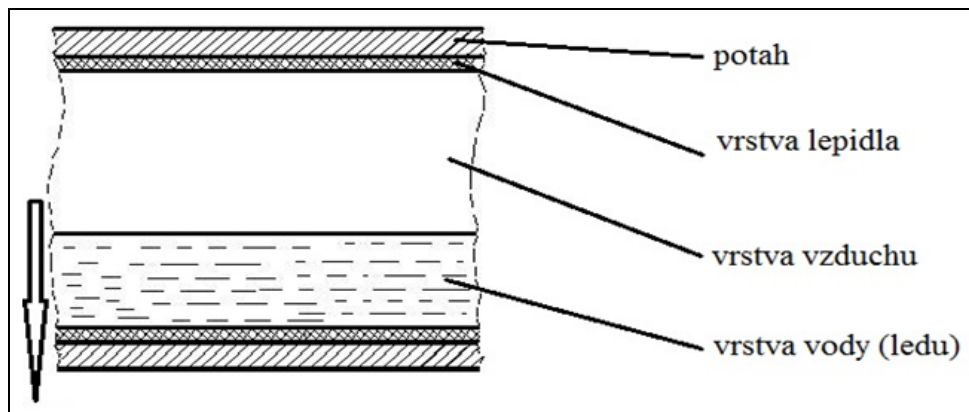
Z výše uvedených důvodů je důležité najít spolehlivé nedestruktivní testovací metody pro detekci vody uvnitř jádra voštinových sendvičových panelů s cílem identifikace postiženého místa a následné opravy nebo výměny vadné součásti.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 PROBLEMATIKA AKUMULACE A DETEKCE VODY V JÁDRU VOŠTINOVÝCH SENDVIČOVÝCH PANELŮ

## 1.1 Akumulace vody v jádru

I když jsou voštinové sendvičové panely (VSP) používány v leteckém průmyslu již od 60. let 20. století, jedním z dlouho opomíjených problémů je pronikání kapaliny do buněk voštinového jádra, kde dochází k její postupné akumulaci (obrázek 1). Nejčastěji jde o vodu, méně často pak o kerosin, hydraulickou kapalinu nebo nemrznoucí kapalinu. Ve studii zahrnující podrobnou kontrolu 15 letadel Boeing 767 bylo zjištěno, že tyto letouny obsahovaly až 40 kg vody zachycených ve vnějších VSP. [30]



Obrázek 1 - Akumulace vody uvnitř jádra VSP [11]

Příčinou pronikání vody do jádra VSP může být:

- mikroskopické trhliny v potahu VSP v důsledku častého vystavování změnám teplot a atmosférického tlaku
- pronikání vody v místě spojů jednotlivých dílů nebo kolem spojovacích prvků
- nesprávná technologie výroby a výrobní podmínky
- pronikání vody skrz defekty vzniklé při výrobě
- pronikání vody skrz dříve již opravovaná místa VSP (netěsnost)
- poškozením VSP při provozu (srážka s cizím tělesem)
- pronikání vody podél rozhraní vláken a matrice
- difuzí vzdušné vlhkosti skrz potah [5, 11, 30, 38].

Vzhledem k různým klimatickým podmínkám, ve kterých se musí dopravní letadla pohybovat, jsou konstrukční díly vystaveny extrémním teplotám mezi  $-55^{\circ}\text{C}$  v maximální letové výšce a až  $+55^{\circ}\text{C}$  v blízkosti zemského povrchu, což ilustruje obrázek 2.



Obrázek 2 - Letadla jsou vystavována extrémním teplotám v rozsahu  $-55^{\circ}\text{C}$  až  $+55^{\circ}\text{C}$  [11]

V důsledku opakovaného vystavování VSP obsahujících vodu teplotám pod a nad bodem mrazu dochází k periodické změně skupenství vody na led a obráceně. Při mrznutí vody dochází k její objemové roztažnosti, což se projeví rozpináním akumulované vody v jádře VSP a jejím tlakem na okolní stěny. Výsledkem je cyklické namáhání stěn jádra i vazeb mezi jádrem a potahem, což může vést až k rozlepení panelu (obrázek 3) a následné letecké katastrofě. [5, 11]



Obrázek 3 - Odlepení potahu od jádra VSP [11]

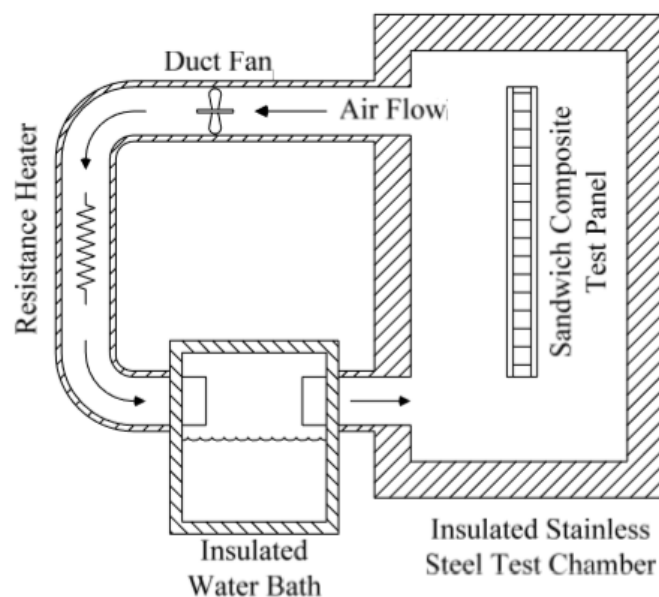
Dalším problémem akumulace vody v jádru VSP je zvyšování celkové hmotnosti letadla nebo změna těžiště letadla. U VSP obsahujících hliníkové jádro a potahy z uhlíkových vláken navíc hrozí koroze jádra. [5, 30]

## 1.2 Detekce vody v jádru

Při výrobě nebo opravách VSP se již delší dobu používá jednoduchá metoda pro testování prostupu vody do jádra VSP. Zkouška ponořením do horké vody je metoda, při níž jsou

VSP po výrobě nebo opravě zkontrolovány na pronikání vody do jádra VSP ponořením do nádrže s horkou vodou. Přítomnost vzduchových bublin značí netěsnost panelu. Výhodou je jednoduchost a nízká cena této zkoušky, avšak tento přístup má velkou nevýhodu v tom, že samotné testování ponořením do horké vody může způsobit nebo katalyzovat průnik vody do zkoušeného dílu. Tento problém byl nedávno vyřešen zavedením nové testovací metody za použití hélia a spektrometru. Vzorek je umístěn do komory plné hélia a pro detekci vadných míst je použit spektrometr [30].

Avšak v [38] bylo prokázáno, že voda se dostává do buněk jádra VSP skrz potah i prostřednictvím difuze vlhkosti ze vzduchu. Princip zkoušky je uveden na obrázku 4. Vzorek VSP (Sandwich Composite Test Panel) je vložen do utěsněné nerezové testovací komory (Insulated Stainless Steel Test Chamber), která je napojena na okruh proudícího vzduhu (Air Flow), který je poháněn ventilátorem (Duct Fan). Vzduch je ohříván prostřednictvím topné spirály (Resistance Heater) a vede skrz komoru s vodní lázní (Insulated Water Bath), odkud vzduch přijímá vlhkost.



Obrázek 4 - Princip zkoušky VSP na difuzi vlhkosti ze vzdušné vlhkosti [38]

Bylo zjištěno, že proces difuze vlhkosti do jádra probíhá neustále a samovolně bez ohledu na kvalitu provedení testovaného dílu, což znamená, že difuze se děje i u nových a bezvadných VSP. Postupnému pronikání vody do VSP tak nelze zcela zabránit. [38]

Vzhledem k faktu, že přítomnost vody uvnitř VSP není pouhým okem viditelná nebo jinak snadno identifikovatelná, vyvstala nutnost najít takové nedestruktivní metody testování (NDT), pomocí kterých by bylo možné zjišťovat přítomnost vody v jádru VSP v rámci běžných kontrol v leteckém provozu. Musí se jednat o metody, které dovedou spolehlivě otestovat danou součást, aniž by došlo k jejímu poškození, či zničení, a zároveň bylo použití těchto metod rychlé a praktické. Cílem preventivních NDT kontrol by tak měla být včasná detekce akumulované vody uvnitř jádra VSP a její okamžité odstranění. Postup odstranění vody z jádra VSP a následná oprava VSP je uvedena v [19].

### 1.3 Cíl práce a metodika praktické části

Cílem práce je experimentální zjištění, zda jsou pasivní infračervená termografie a zkouška poklepem vhodné metody pro detekci vody v sendvičových panelech leteckých konstrukcí. V praktické části této práce budou vyrobeny zkušební desky VSP podle ČSN EN 2374, které budou vyrobeny lisováním prepregů se skelnou výztuží a voštinového jádra. Do několika buněk jádra hotových zkušebních desek bude pomocí injekční stříkačky vpravena voda, čímž bude simulována akumulace vody uvnitř buněk. Na takto připravených vzorcích budou experimentálně odzkoušeny dvě metody NDT s cílem zjistit, zda jsou tyto metody vhodné pro detekci vody v jádru VSP.

**Pasivní infračervené termografie** – Vzorky VSP obsahující vodu budou umístěny do mrazicího boxu, aby došlo ke zmrznutí vody uvnitř jádra a po jejich vytažení bylo dosaženo dostatečného teplotního rozdílu mezi vodou uvnitř jádra a okolním prostředím. Podchlazené vzorky budou nasnímkovány IR kamerou Fluke TiS45, která je k dispozici ve školních laboratořích. Pro zpracování termogramů bude použit software Fluke Smart View.

**Zkouška poklepem** – Vzorky VSP obsahující vodu budou podrobeny zkoušce poklepem dle doporučeného postupu uvedeného v teoretické části práce. Pro poklep bude použito malé kladívko. Vedle prostého poslechu bude zvuk poklepu nahrán také na tablet Apple iPad. Pro vizualizaci výsledků zkoušky bude použit volně dostupný software pro grafickou analýzu zvuku Spectrum a Spectrum View.

V závěru práce bude zhodnocena úspěšnost a použitelnost obou metod a následně bude doporučena metoda, která by byla vhodná pro testování detekce vody v jádru VSP v praxi.

## 2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

### 2.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitní materiály (KM) jsou definovány jako „heterogenní materiály, u kterých se po smíšení materiálů se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jediná struktura; jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídatnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy, nebo smíšené dohromady.“ [2, s. 45]. Během návrhu a výroby KM je žádoucí vyvolat synergický účinek v jeho struktuře tak, aby bylo možno získat nový materiál s vlastnostmi, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou samostatně ani prostou sumací vlastností jednotlivých fází. [2]

KM tvoří jedna nebo více nespojitých fází ponořených do fáze spojitě. Nespojitou fází nazýváme výztuž, vlákna nebo vyztužovací materiál, zatímco fáze spojitá se nazývá matrice či pojivo. V porovnání s matricí má výztuž obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost) a hlavním cílem vyztužení matrice je zlepšení jejích mechanických vlastností. Matrice má spojující funkci a vytváří výsledný vnější tvar součásti. Jednotlivé fáze ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu jak svými vlastními charakteristikami, tak i vzájemnou interakcí. Tyto interakce jsou převážně fyzikálního nebo fyzikálně-chemického charakteru. [1, 2, 39]

Hlavní faktory definující výsledné vlastnosti kompozitů:

- mechanické vlastnosti jednotlivých fází
- objemové zastoupení jednotlivých fází, jejich geometrický tvar a uspořádání v systému (orientace)
- interakce jednotlivých fází a vlastnosti styku
- interakce s okolním prostředím. [2]

### 2.2 Materiály používané při výrobě kompozitů

1) Materiály používané pro matrice KM

- **kovy** (Al, Ag, Fe, Mg, Ti, Co, Cu, Ni a jejich slitiny)



- **nekovy**
  - **anorganické materiály** - keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC,  $\text{SiO}_2$ , TiC,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), skla, modifikace uhlíku
  - **organické materiály** - polymery (polyestery, vinylestery, fenolické pryskyřice, epoxidy, polyamidy, atd.).

Nejlepší mechanické vlastnosti mají epoxidové pryskyřice, proto je většina KM v současné době vyráběna právě z epoxidových pryskyřic. [2, 24]

2) Materiály používané pro výztuže KM:

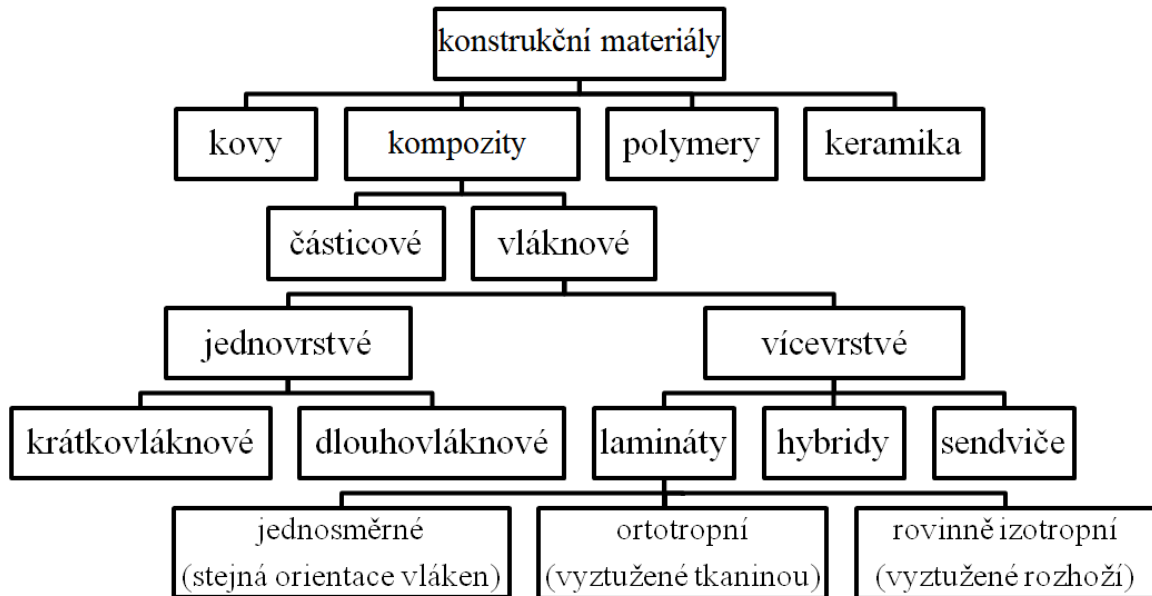
- **kovy** (W, Fe, Cr, Mo, Ti, Ni a jejich slitiny)
- **nekovy**
  - **anorganické materiály** - keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , SiC, TiC, WC,  $\text{TiB}_2$ , BN, atd.), skla (E, S), uhlík, bor, čedič
  - **organické materiály** - polymery (aramidová vlákna - Kevlar, polyamidová vlákna – Nylon, atd.)

Nejčastěji používané materiály výztuží při výrobě KM jsou skleněná vlákna, aramidová vlákna a uhlíková vlákna. Aramidová a uhlíková vlákna patří mezi výrazně dražší materiály, proto se používají pouze v aplikacích, kde je nutné využít jejich výjimečné materiálové vlastnosti. Jejich podíl na trhu je výrazně menší, než u skleněných vláken. [2]

### **Skleněná vlákna**

Skleněnými vlákny (GF - Glass Fiber) jsou myšlena pro tenká vlákna s kruhovým průřezem. Vyrábí se rychlým tažením z taveniny (skloviny) připravené v pecích. Vlákno je následně ochlazováno a opatřeno ochrannou vrstvou, která zabraňuje oxidaci a rovněž zvyšuje adhezi a smáčivost organickými matricemi. Skelné vlákno se nejčastěji používá ve dvou základních modifikacích, a to typu S (vysoce pevné) a typu E (vysoce tuhé). E-sklovina je nejrozšířenější druh skloviny pro výrobu vláken a má podíl na trhu až 90 %. Skleněná vlákna jsou používána převážně pro textilní účely. Výhodami použití skleněných vláken jsou vysoká pevnost, nehořlavost (ohnivzdornost), odolnost vůči tepelnému namáhání a nízké výrobní náklady. [17, 39]

### 2.3 Klasifikace kompozitních materiálů

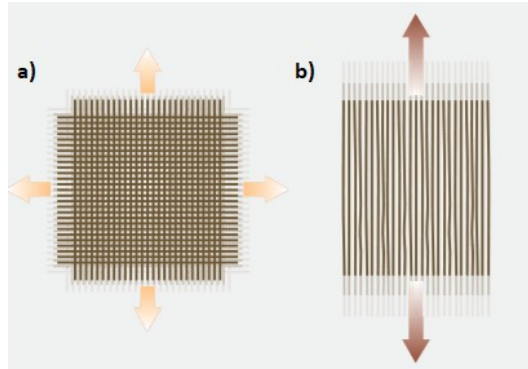


Obrázek 5 - Schéma klasifikace kompozitních materiálů

Dle geometrického tvaru výztuže jsou kompozity rozděleny na částicové a vláknové (obrázek 5). U **vláknových KM** se výztuž v kompozitu vyskytuje ve formě vláken. Vláknové kompozity se jsou nejdůležitější třídou KM, protože jsou schopny dosahovat vysokých pevností. Pevnost materiálu ve formě vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je:

- malý příčný průřez vláken - v tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při malých příčných rozměrech menší (menší průměr = menší povrch), existující vady jsou mikroskopické a orientovány v podélném směru vlákna
- přednostní nasměrování pevných kovalentních meziatomových vazeb v podélném směru vlákna. [24]

Z důvodu malých průřezových rozměrů však nelze vlákna používat v technických aplikacích přímo, ale sdružují se do svazků nekonečných vláken, tzv. rovingů. Ty mohou být orientovány jednosměrně nebo dvousměrně (viz obrázek 6). V případě dvousměrné orientace hovoříme o tkanině. Dle stylu proplétání rozlišujeme 3 základní druhy tkanin - s plátňovou, keprovou nebo atlasovou vazbou. [1, 19, 24]

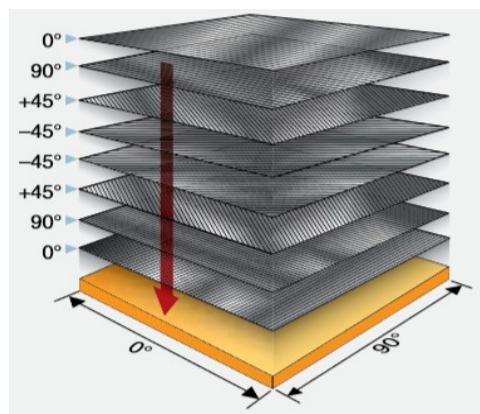


Obrázek 6 - Orientace vláken: a) dvousměrně orientovaná vlákna – tkanina; b) jednosměrně orientovaná vlákna [19]



Obrázek 7 - Tkanina vyrobená ze skleněného vlákna [27]

Na obrázku 7 je vyfocena tkanina, která byla vyrobena proplétáním rovingů ze skleněného vlákna. Vláknové kompozity lze dále dělit na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity mohou být ve skutečnosti zhotoveny z více vrstev, ale pouze pod podmínkou, že každá z vrstev má tutéž orientaci a tytéž vlastnosti. Kompozity používané v konstrukčních aplikacích jsou většinou vícevrstvé. Takové kompozity se skládají z několika vrstev (lamin).

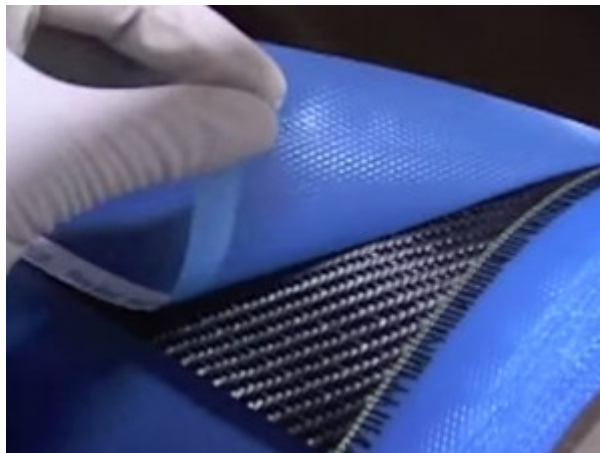


Obrázek 8 - Střídání orientace vrstev tkanin při kladení [19]

Směr orientace jednotlivých vrstev je střídán dle konstrukčního návrhu vrstvení kompozitu, přičemž pootočení každé další vrstvy rohože je většinou násobkem  $45^\circ$ . Příklad takového typu vrstvení je uveden na obrázku 8. Jsou-li materiály složek výztuže v každé vrstvě stejné, nazývají se lamináty. Hybridní lamináty představují vícevrstvé kompozity sestávající z vrstev zhotovených z různých materiálů. Zvláštním typem polotovaru pro výrobu KM jsou prepregy. [1, 19]

## 2.4 Prepregy

Prepreg je název pro výztužnou tkaninu, která byla předem impregnována pryskyřicí. Tato pryskyřičná matrice (typicky epoxidová) již obsahuje správné vytvrzovací činidlo. V důsledku toho je prepreg připraven k uložení do formy bez potřeby přidavku další pryskyřice. K vytvrzení prepregu na laminát je nutné použít kombinaci tlaku a tepla. Na obrázku 9 je zobrazen prepreg s výztuží z uhlíkových vláken. Prepreg je skladován mezi dvěma ochrannými vrstvami, aby nedocházelo k jeho vysychání. [21]



Obrázek 9 - Prepreg s výztuží z uhlíkových vláken [21]

### Výhody použití prepregů:

- **Zaručené mechanické vlastnosti** - Při ručním laminování je obtížné dosáhnout správného poměru výztuže a matrice. Většina prepregů obsahuje jen zhruba 35% pryskyřice, což je ideální množství pro optimální vytvrzení a požadované mechanické vlastnosti. Dosažení obdobných výsledků při ručním laminování je téměř nemožné.

- **Jednotnost a opakovatelnost součástí vyrobených z prepregů** - Při použití prepregů nevznikají oblasti bohaté na pryskyřici ani suchá místa s nedostatečným prosvycením pryskyřicí. Tloušťka prepregů rovnoměrná a umožňuje aplikovat opakovatelnost a jednotnost při výrobě stejných součástí.
- **Méně nepořádku a odpadu** – Při použití prepregů odpadá čištění a úklid prostor a náradí, které bývá použito při ručním laminování (nádoby s pryskyřicí, špinavé válečky, kapky na podlaze, apod.)
- **Kratší doba vytvrzování**
- **Lepší vzhled finálního výrobku** – Použití prepregů téměř eliminuje vznik vzduchových bublin a jiných nedokonalostí, které vznikají při ručním laminování. [21]

#### **Nevýhody použití prepregů:**

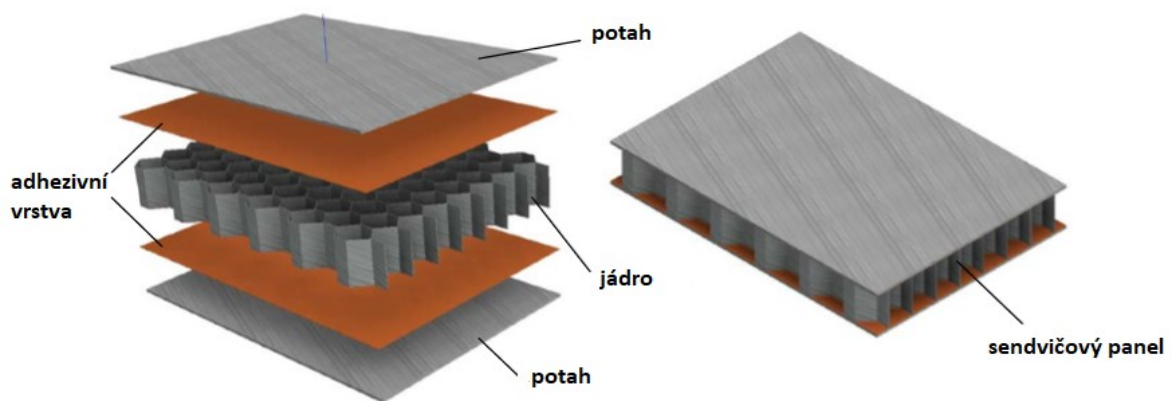
- **Vysoká cena** – Použití prepregů je dražší, než výroba ručním laminováním.
- **Vysoké nároky na skladování** – Většina prepregů musí být skladována v mrazících boxech kvůli zachování jejich kvality a životnosti. Některé prepregy mohou být skladovány po omezenou dobu při pokojové teplotě, avšak tento typ skladování výrazně snižuje jejich životnost.
- **Vysoká vytvrzovací teplota** – Při vytvrzování prepregů musí být použita vysoká teplota a tato teplota musí být udržována po dobu několika hodin. [21]

U prepregů výrazně převažují pozitiva nad negativy, a proto je jejich aplikace při výrobě součástí z KM výhodná. Prepregy jsou sice dražší než výroba ručním laminováním, ale díky svým vlastnostem umožňují standardizovat výrobu, šetří čas a výroba je také praktičtější.

### 3 SENDVIČOVÉ PANELE

#### 3.1 Charakteristika a výhody sendvičových panelů

Sendvičové panely zaujímají velkou část produkce KM. Sendvičová struktura sestává ze dvou vnějších vrstev - potahů, mezi kterými je vloženo jádro z lehkého materiálu (viz obrázek 10). Potahy jsou tenké a tuhé, zatímco jádro bývá tlusté a je zpravidla tvořeno materiálem s nižší pevností. Potahy jsou zatěžovány především tahovými a tlakovými silami, jádro slouží hlavně k přenosu smykových sil mezi vnějšími vrstvami. [25]

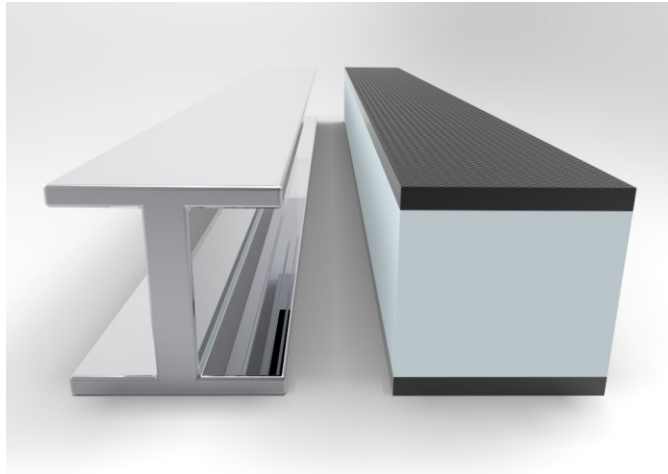


Obrázek 10 - Složení sendvičového panelu [40]

Sendvičové panely mají oproti jiným konstrukčním materiálům tyto výhody:



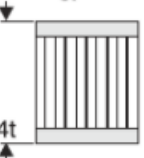
- nízkou hustotu
- vysokou ohybovou tuhost a pevnost
- dobré tepelně a zvukově izolační vlastnosti
- odolnost proti šíření trhlin
- odolnost proti rázům

Existuje určitá analogie mezi sendvičovou konstrukcí a I-nosníkem (obrázek 11). Při návrhu konstrukce obou prvků bylo žádoucí umístit hlavní hmotu materiálu co nejdále od neutrální osy a naopak odebrat co nejvíce materiálu blízko neutrální osy. Tím se podařilo ušetřit velkou část hmotnosti za minimálního poklesu ohybové tuhosti tělesa. [18]



Obrázek 11 - Analogie sendvičového panelu a I-nosníku [18]

Výhody sendvičových panelů ilustruje obrázek 12. Oproti klasickému plnému materiálu (solid material) o tloušťce  $t$  má použití jádra v sendvičovém panelu za následek několikanásobné zvýšení tuhosti (stiffness) a pevnosti v ohybu (flexural strength) při minimálním nárůstu hmotnosti konstrukce (weight). Při trojnásobné tloušťce jádra (core thickness) a použití stejné tloušťky výchozího materiálu  $t$  dochází k 37násobnému zvýšení tuhosti, 9násobnému zvýšení pevnosti v ohybu při zanedbatelném nárůstu hmotnosti.

	Solid Material	Core Thickness $t$	Core Thickness $3t$
			
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

Obrázek 12 - Srovnání mechanických vlastností stejného výchozího materiálu bez a s použitím jádra [3]

Mezi hlavní nevýhody sendvičových panelů patří složité technické zpracování, vyšší výrobní náklady, nutnost řešení lokálních namáhání např. pomocí zhuštění jádra nebo vyplnění voštiny pěnou, obtížnější spojovatelnost nebo složitější kontrola konstrukcí a zjišťování vad.

### 3.2 Potah

V praktických aplikacích přichází potahy sendvičových panelů do přímého styku s vnějším prostředím, a proto je na ně kladeno několik požadavků:

- pevnost a tuhost
- odolnost proti chemickému působení nejrůznějších látek, korozivzdornost
- odolnost proti opotřebení (únavě materiálu)
- odolnost proti extrémním teplotám (nehořlavost)
- odolnost proti rázům
- tepelná vodivost
- odolnost proti vlhkosti, vzduchotěsnost
- estetické požadavky na vzhled
- snadná opravitelnost. [15, 16]

Potahy sendvičových panelů mohou být vyrobeny z nejrůznějších materiálů, mimo jiné také z KM.

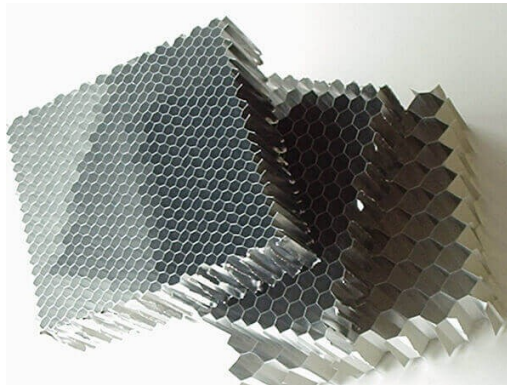
### 3.3 Jádro

Materiály používané pro jádra sendvičových panelů musí splňovat především tyto požadavky a vlastnosti:

- nízká hustota (odlehčení panelu)
- vysoká smyková pevnost a tuhost
- odolnost proti tlaku
- odolnost proti vysokým teplotám, nehořlavost
- odolnost proti absorbování vody
- chemická odolnost, korozivzdornost
- dobrá zvuková a tepelná izolace. [5, 15]

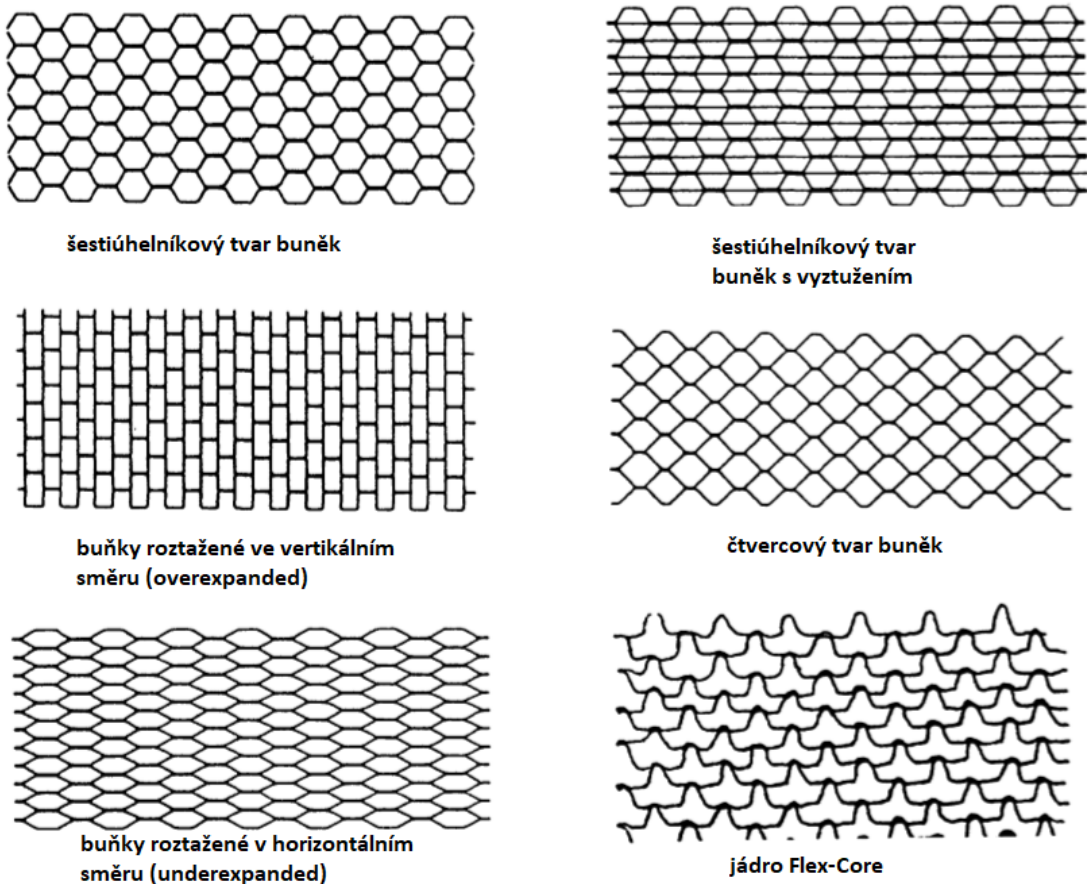


Nejčastěji tvoří jádro sendvičových panelů pěny, balsa nebo voština. Voština je typ jádra, které se skládá z velkého počtu otevřených buněk s velmi tenkými stěnami (obrázek 13).



Obrázek 13 - Voštinové jádro z hliníkové slitiny 5052 [9]

Obvykle mají buňky tvar šestiúhelníku (hexagonální), ale existují i další tvary buněk, které se běžně v praxi používají. Tyto typy jsou znázorněny na obrázku 14. Hexagonální voština se svým vzhledem podobá včelím plástvím, odkud získala své anglické pojmenování - honeycomb.



Obrázek 14 - Příklady tvarů buněk voštinových jader [5]

Mezi největší výhody voštinových jader patří velmi nízká hustota a výborná únavová odolnost. Nevýhodou voštin jsou horší izolační vlastnosti, ale to lze odstranit vyplněním jader izolační pěnou s nízkou hustotou. Voština může být vyrobena z téměř jakéhokoliv materiálu - od lepenkových voštin, které mají nízkou pevnost a tuhost a používají se jako výplně levných dveří až po uhlíková vlákna s vysokou pevností, vysokou tuhostí a skvělými záruvzdornými vlastnostmi. Mechanické vlastnosti závisí také na tloušťce stěny buňky. Obecně platí, že hliníkové voštinové jádro nabízí nejlepší mechanické vlastnosti v poměru k hustotě a výrobním nákladům. [5, 15]

Existují dvě základní metody, které se používají k přeměně polotovaru (plechů či fólie) na voštinovou strukturu:

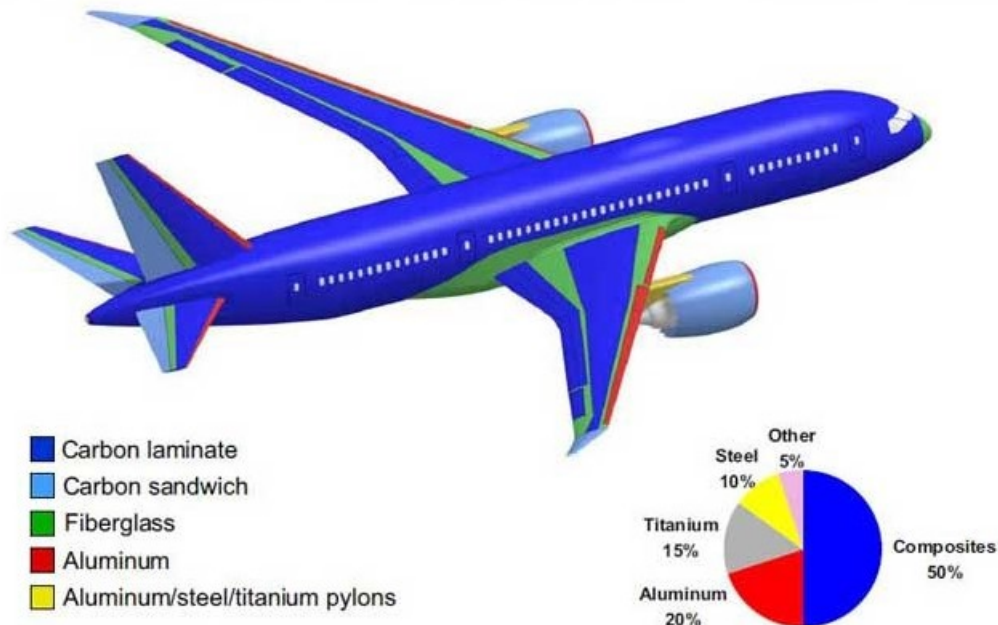
- **Expanzní (roztahovací)** – mezi pásy rovinného materiálu se v přesně daných roztečích vytvoří spoje (uzly), pásy jsou následně od sebe roztaženy, čímž vznikne voštinová struktura
- **Narůstací (vrapování)** - z jednotlivých pásů fólie se tvarovým válcováním (vrapováním) vytvoří tvarované pásy, které se pak spojují k sobě.

Existuje také několik různých metod spojování listů (výroby uzlů): **lepení, svařování, pájení** nebo **difuzní spojování**. Nejpoužívanějším způsobem spojování je lepení; téměř 95 % voštinových jader je vyrobeno tímto způsobem. Odporové svařování, pájení nebo difuzní spojování se používají pouze v aplikacích, kde je nutno pracovat s vysokými teplotami nebo při jiných náročných podmínkách. Výroba těmito metodami je totiž mnohem nákladnější. [5]

### 3.4 Využití KM a VSP v leteckém průmyslu

V leteckém průmyslu se používá široké množství materiálů od speciálních kovových slitin přes plasty, keramiku až po kompozity a sendvičové panely. Při stavbě letadel je nutno volit takové materiály, které splňují nejen funkční a technologické požadavky, ale důraz je kladen také na bezpečnost, spolehlivost a dlouhou životnost konstrukce. Z funkčního hlediska je potřeba materiál s co nejnižší hustotou, ale zároveň s vysokou tuhostí a pevností. Původně byl drak (nosná soustava letadel) vyráběn z hliníku, avšak s postupným rozvojem KM je v čím dál větší míře nahrazován právě těmito progresivními materiály. Na obrázku 15 je rozdělení materiálů používaných při výrobě moderních dopravních letadel. U letadel

vyrobených po roce 2011 (např. Boeing 787 nebo Airbus A350) je již většina konstrukce tvořena KM a VSP. [8]



Obrázek 15 - Podíl jednotlivých materiálů použitých při stavbě dopravního letadla [6]

V posledních letech se neustále zvyšuje poměr KM použitých na trup a křídla letadel, protože tyto materiály jsou mnohem lehčí a odolnější vůči korozi než tradičně používané kovové materiály. KM používané na dopravní letadla se obvykle vyrábějí kombinací uhlíkových nebo skleněných vláken a epoxidové pryskyřice. [6]

### 3.5 Výroba zkušební desky VSP ze skelného prepregu

Výrobu zkušebních laminátových a sendvičových desek ze skelných tkanin a pryskyřičné směsi, které se používají pro zkoušky v leteckém průmyslu a kosmonautice, popisuje norma ČSN EN 2374. Existují tyto tři základní typy přípravy potahů zkušebních desek:

- **Typ A** – Skelná tkanina je impregnována kapalnou pryskyřicí a zkušební deska se vyrábí lisováním za použití tlaku a teploty
- **Typ B** – Zkušební deska se vyrábí z prepregu (předimpregnované tkaniny) za použití tlaku a teploty
- **Typ C** – Skelná tkanina je impregnována kapalnou pryskyřicí a zkušební deska je vyráběna za laboratorní nebo zvýšené teploty bez zavedení tlaku. [13]

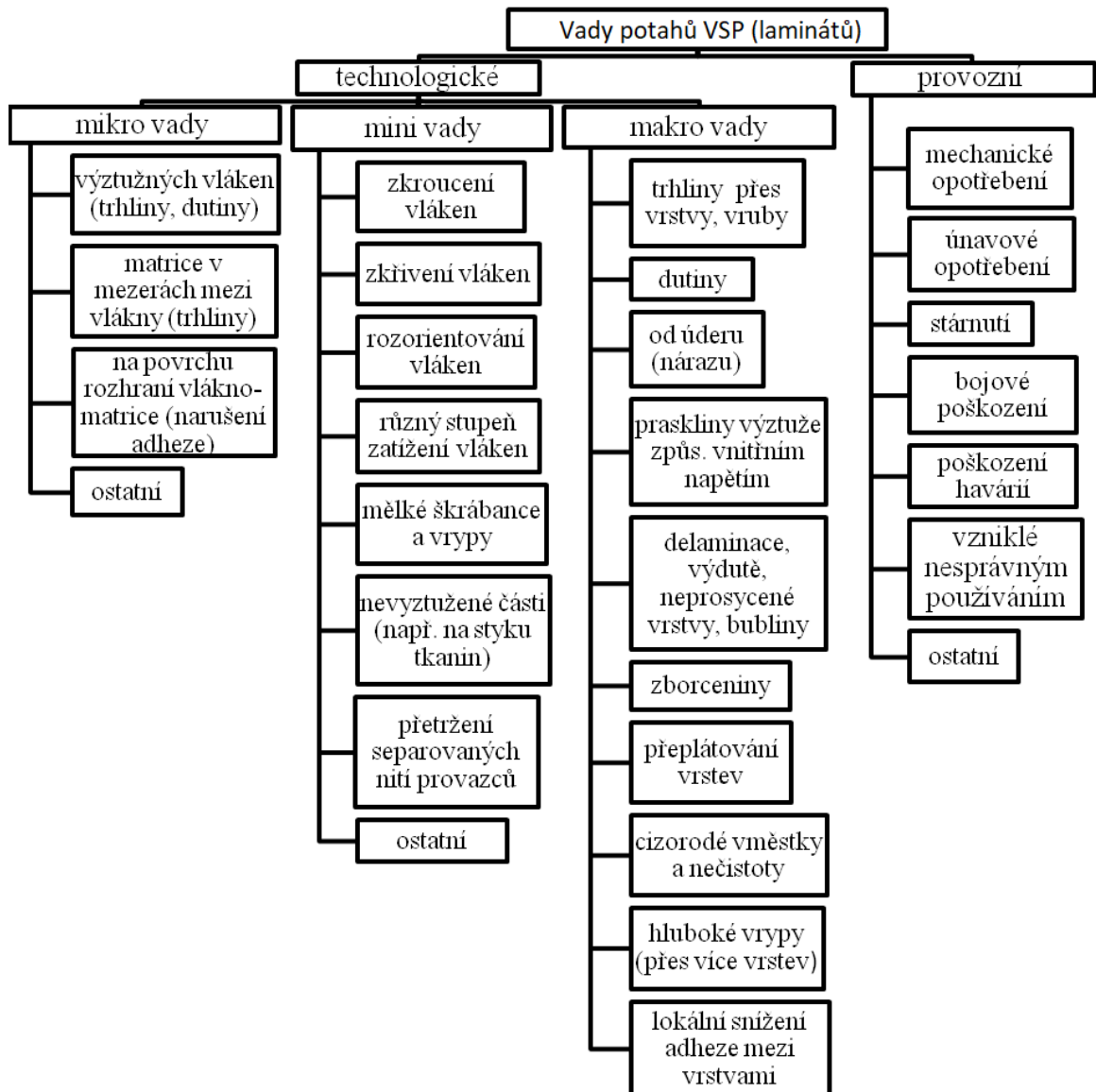
Jelikož zkušební desky VSP, které budou použity v praktické části, budou vyrobeny ze skelných prepregů, dále bude popsán postup výroby desek s potahy typu B. Vytvrzování zkušebních desek lze provádět v autoklávu, ve vakuovém vaku nebo lisováním v lisovací formě. Zkušební desky budou vyrobeny lisováním. Parametry lisovací formy se volí dle zpracovávaného materiálu a účelu zkoušky. Požadavky, které musí splňovat lisovací forma, jsou uvedeny v [13].

#### **Postup výroby sendvičových zkušebních desek ze skelných prepregů:**

1. Skelný tkaninový prepreg musí být uchováván při teplotě nižší než normální, musí být zabalen ve vzduchotěsném obalu. Při temperaci na normální teplotu musí být v polyetylenovém vaku tak, aby nedošlo k jeho navlhnutí. Doba potřebná k temperaci závisí na jeho množství, ale nesmí být kratší než 4 h.
  2. Skelný tkaninový prepreg se nařeže nebo nastříhá na přístříhy, které jsou o 3 mm až 6 mm kratší než je délka a šířka pracovní plochy spodní části formy lisovací formy.
  3. Pro lepší vyjmutí hotové desky po lisování se doporučuje použít separační fólii, kterou položíme na spodní desku lisu. Přístříhy prepregu se naskládají na sebe v požadovaném počtu vrstev. Pokud zkušební normy nestanoví jinak, použije se jako jádro sendvičové desky neperforovaná voština z hliníkové slitiny 5052-H191 s rozměrem buňky 6,4 mm a tloušťkou fólie 0,08 mm nebo 0,1 mm, která je nařezána na požadovaný rozměr. Při kladení jednotlivých složek VSP je nutno věnovat pozornost tomu, aby se laminátové potahy nevlačovaly do dutin voštiny.
  4. Vytvrzování v lisovací formě se řídí dle vytvrzovacích podmínek udaných výrobcem prepregu. Pokud není stanoveno jinak, vytvrzovací tlak musí být 200 kPa. Doporučuje se, aby se po vyjmutí označil potah, který byl během vytvrzování nahoře.
- [13]

## 4 VADY SENDVIČOVÝCH PANELŮ

### 4.1 Vady potahů



Obrázek 16 - Vady potahů VSP (laminátů) [12]

Obrázek 16 zachycuje pomocí přehledného schéma vady laminátů, které bývají použity pro potahy VSP. Vady lze rozdělit do dvou základních skupin, na vady výrobní (technologické) a vady vzniklé při používání (provozní). Výrobní vady jsou rozděleny do třech skupin dle makroskopického hlediska. Zdroje výrobních vad mohou být tyto:

- nedodržení výrobní technologie
- nestandardní výchozí materiál nebo polotovar

- mechanické poškození (nárazy, nesprávné zatížení)
- kontaminace
- nevhodný design součásti
- nesprávné nebo nedostatečné obrábění, vrtání, broušení [19].

### Mikro vady

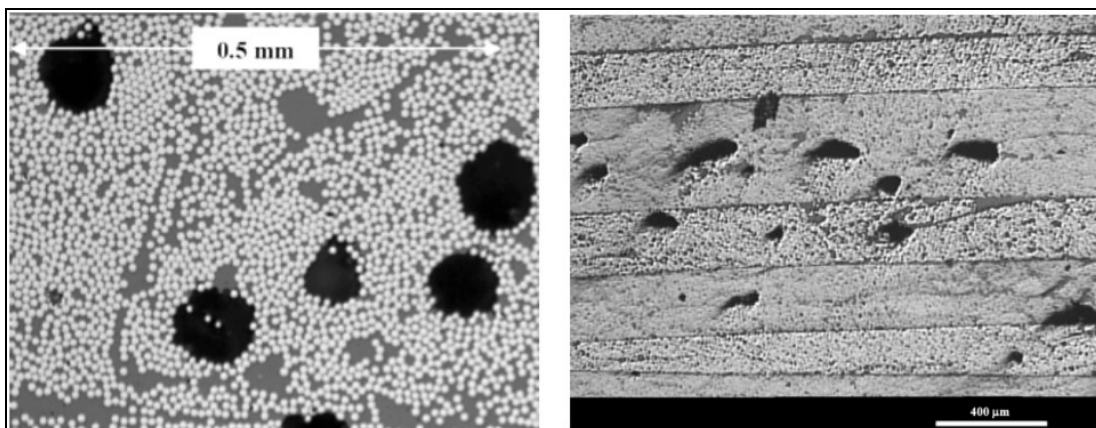
Mikro vady zahrnují vady na mikroskopické úrovni. Tyto vady jsou lidským okem neviditelné, a proto jediným způsobem, jak lze tyto vady odhalit, je kontrola pod mikroskopem.



Obrázek 17 - Mikroskopické zachycení lomu vrstvy vláken [26]

Na obrázku 17 je pomocí zachycen lom vrstvy vláken, který vznikl v důsledku stlačování v podélném směru. K porušení jednotlivých vláken došlo v rámci jedno vrstvy vždy na stejném místě.

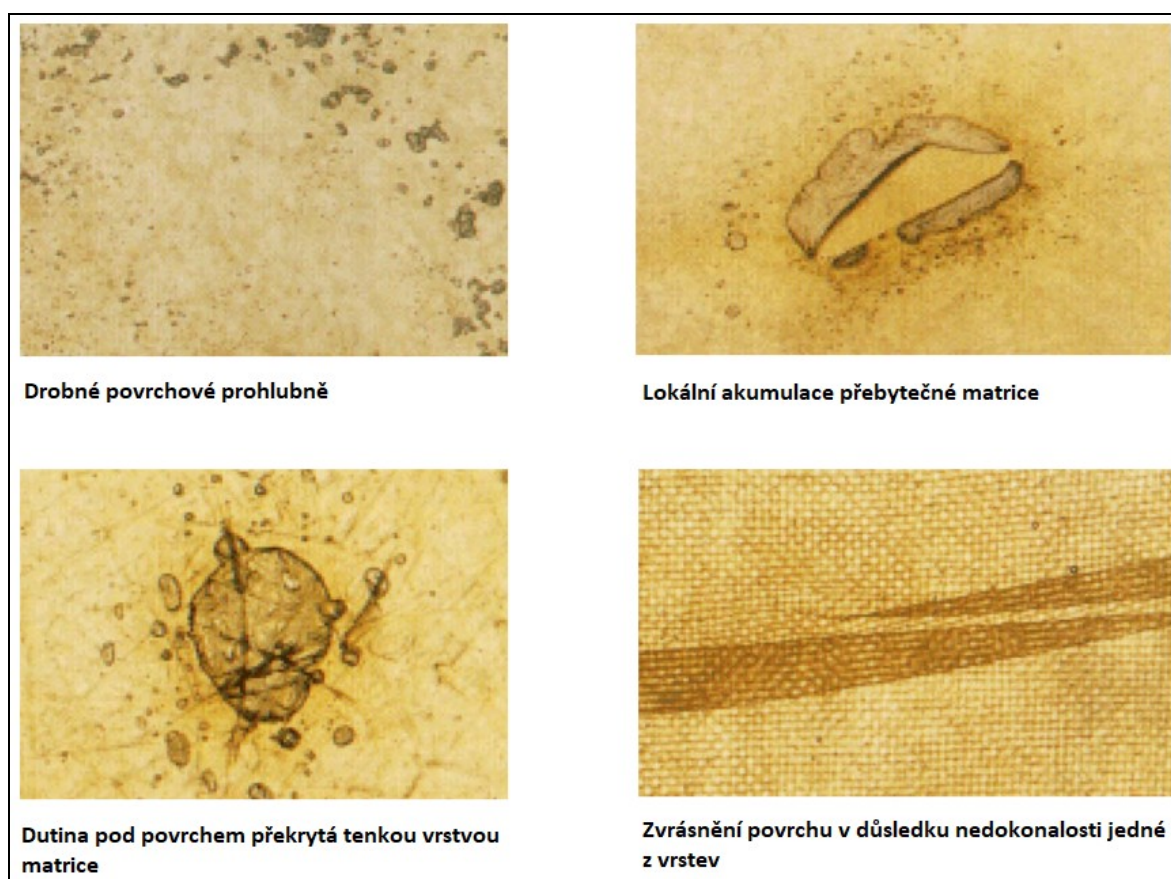
Na obrázku 18 jsou vyfoceny mikroskopické dutiny (mezery mezi vlákny).



Obrázek 18 - Mikroskopické foto dutin uvnitř výztužných vrstev KM [26]

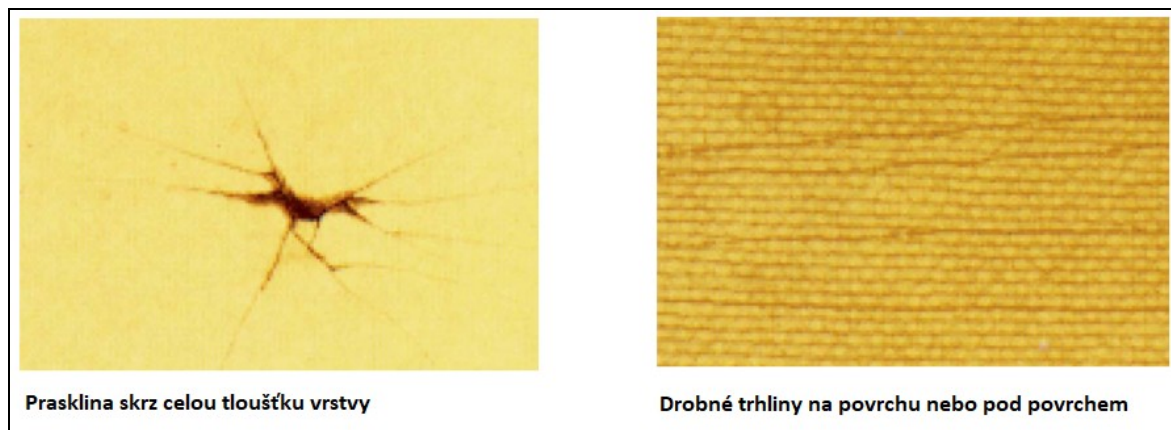
## Makro vady

Makro vady představují vady, které lze spatřit běžnou vizuální kontrolou. U KM je důležité správné dávkování pryskyřice a optimální prosycení výztuže maticí. Pokud je použito příliš mnoho pryskyřice, nemusí to nutně znamenat horší mechanické vlastnosti, ale příliš mnoho matrice se projeví na přírůstků hmotnost dílu a prostřednictvím estetických vad výrobku. Větším problémem je nedostatečné prosycení maticí nebo nesoudržnost matrice s vlákny, které se projeví zhoršenými mechanickými vlastnostmi KM a možným poškozením celé součásti. Na obrázku 19 jsou zachyceny některý druhy makro vad v souvislosti špatným dávkováním pryskyřice, nebo špatného prosycení vrstev výztuže.



Obrázek 19 - Makro vady potahů VSP [26]

Dalším typem vad jsou trhliny a praskliny. Příklad tohoto typu vady je zachycen na obrázku 20. Drobné trhliny uvnitř matrice se postupem času mohou rozrůst až do rozsáhlých delaminací (oddělení jednotlivých vrstev), které jsou kritickým typem poškození KM. Delaminace mohou vzniknout také v důsledku nárazu. Další z příčin může být nedostatečná adheze mezi jednotlivými vrstvami. Delaminace se rozrůstají, pokud jsou vystaveny opakovanému zatížení (především na tlak).



Obrázek 20 - Fotografie trhlín a prasklin [26]

Některé vady mohou být způsobeny také vlivem lidského faktoru, např. mechanickým poškozením dílu z KM při manipulaci ve výrobě, při přepravě nebo montáži (povrchové vrypy, škrábance, praskliny), kontaminaci nečistotami nebo vměstky (např. zbytky obalových materiálů prepregů nebo separační fólie), apod. [19]

## 4.2 Vady sendvičových panelů

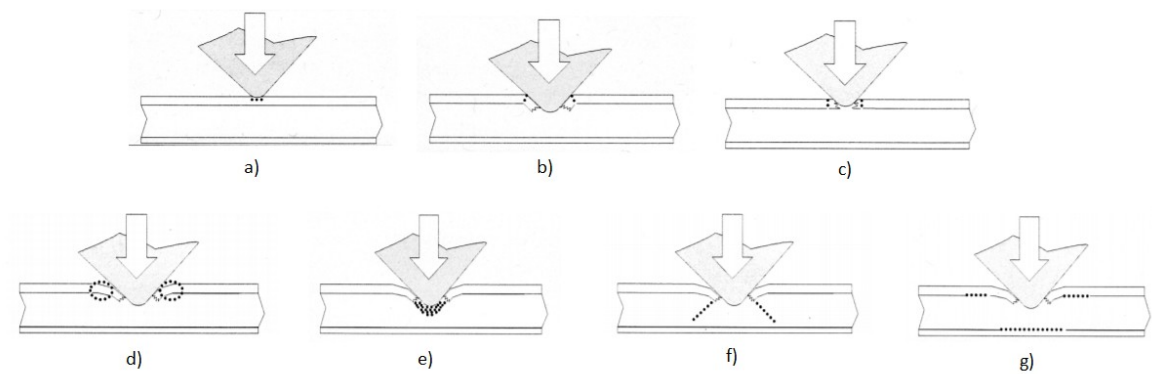
Vady VSP mohou být rozděleny do čtyř tříd podle závažnosti a celkového vlivu vady na konstrukci VSP:

- **Třída 1** – Povrchové vrypy, důlky, škrábance nebo eroze potahů, které nejsou doprovázeny proražením nebo zlomem potahu VSP
- **Třída 2** - Proražení nebo zlom potahu na jedné straně desky, případně doprovázené poškozením jádra, ale bez poškození potahu na obou stranách desky
- **Třída 3** - Poškození, které zasahují oba potahy a jádro
- **Třída 4** - Rozsáhlá poškození vyžadující kompletní výměnu celého dílu [26].

### 4.2.1 Poškození VSP kolizí s cizím předmětem

Součásti vyrobené z VSP mají velmi dobré mechanické vlastnosti, ale často mívají pouze velmi tenké potahy, a v důsledku toho se vyznačují nízkou odolností proti poškození nárazem cizího tělesa. Na obrázku 21 jsou zachyceny typy poškození VSP v důsledku kolize VSP s cizím předmětem.

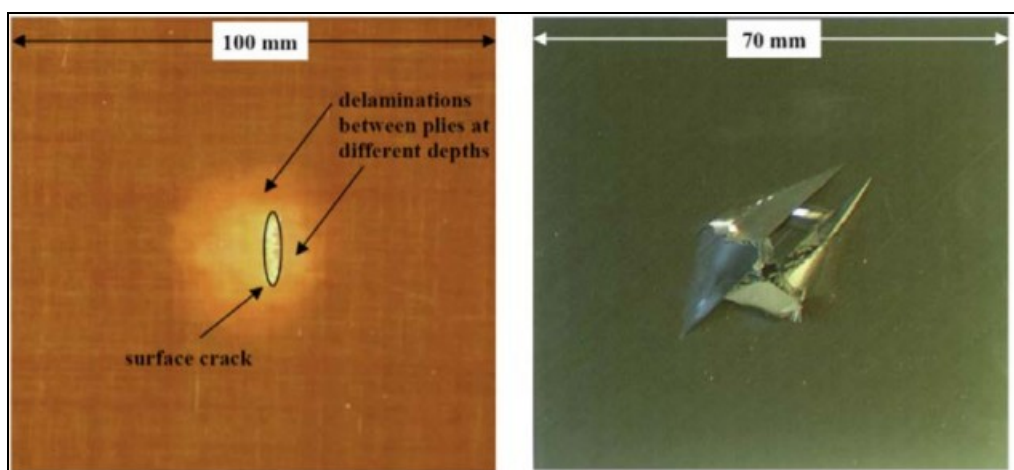




Obrázek 21 - Typy poškození VSP kolizí s cizím předmětem [26]

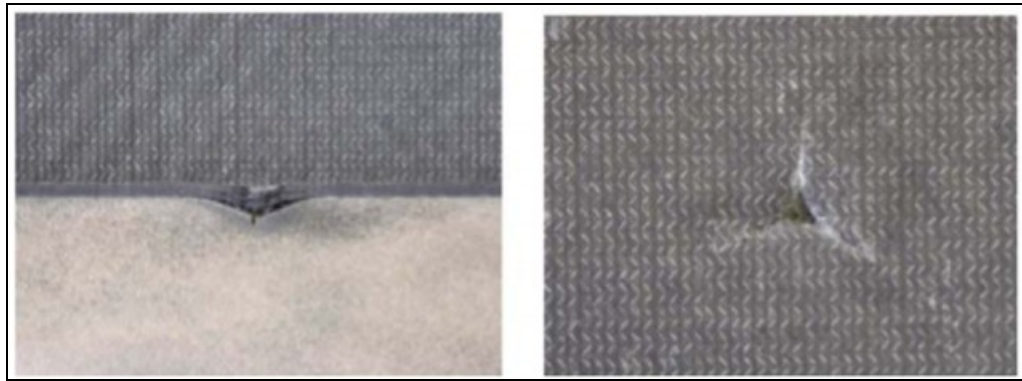
Typy poškození jsou následující:

- a) povrchové poškození potahu hranou dopadajícího předmětu
- b) proražení potahu a jeho šikmý lom po stranách dopadajícího předmětu
- c) proražení potahu a jeho rovinný lom po stranách dopadajícího předmětu
- d) proražení potahu a ohyb potahu po stranách dopadajícího tělesa
- e) proražení potahu spolu s lokálním stlačením jádra
- f) proražení potahu spolu s lomovým poškozením jádra
- g) proražení potahu a následná delaminace potahu od jádra v důsledku nárazu (viz také obrázek 22) [26].



Obrázek 22 - Proražení potahu s delaminací (vlevo); proražení potahu s lomem po stranách dopadajícího tělesa (vpravo) [26]

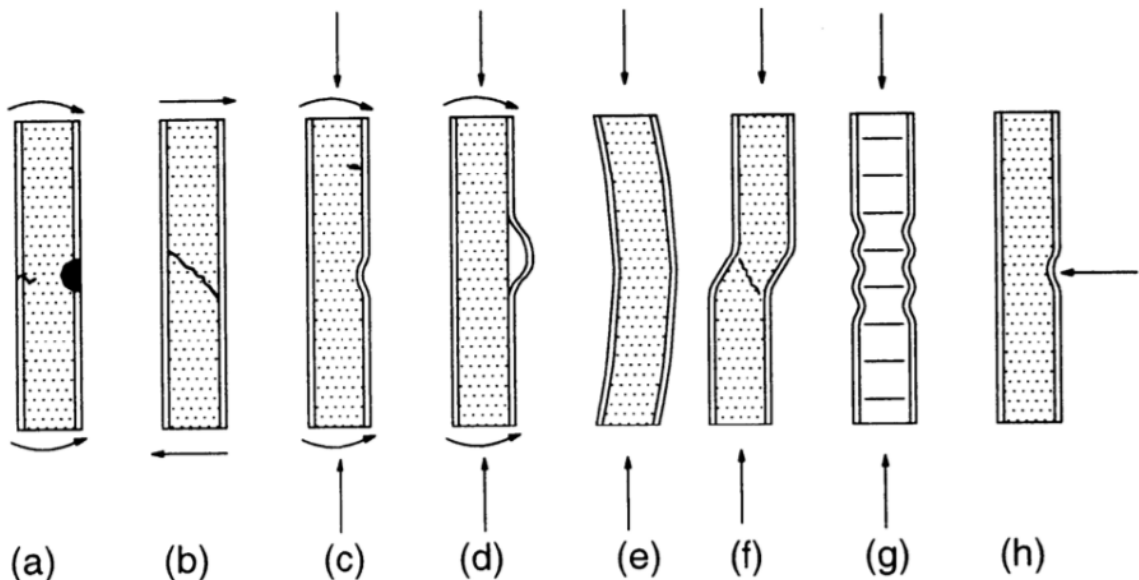
Obrázek 22 zachycuje reálné poškození proražení potahu VSP s následnou delaminací vrstev (vlevo) a proražení potahu s lomem po stranách dopadajícího tělesa (vpravo). Na obrázku 23 je zobrazeno proražení potahu s lokálním stlačením jádra (vlevo) a proražení potahu s ohybem po stranách dopadajícího tělesa (vpravo).



Obrázek 23 - Proražení potahu s lokálním stlačením jádra (vlevo) a proražení potahu s ohybem po stranách dopadajícího tělesa (vpravo) [26]

#### 4.2.2 Poškození VSP v důsledku mechanického namáhání

Při mechanickém namáhání VSP může dojít k poškození sendvičové struktury. Na obrázku 24 jsou uvedeny nejčastější typy poškození při různých druzích mechanického namáhání:



Obrázek 24 - Typy poškození VSP v důsledku mechanického namáhání [26]

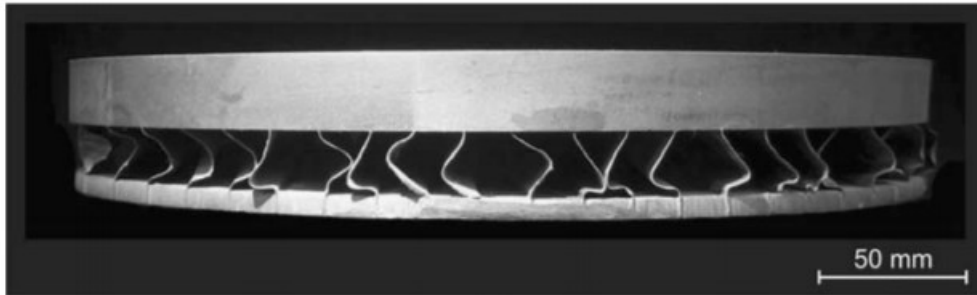
- a) lom nebo plastické chování potahu při namáhání ohybem
- b) porušení jádra při namáhání smykem

- c) zborcení jádra a zvlnění potahu při podélném stlačování a namáhání na ohyb
- d) odlepení potahu v důsledku ztráty adheze při podélném stlačování a namáhání na ohyb
- e) ztráta vzpěrné stability při podélném stlačování
- f) zvlnění, porušení jádra při podélném stlačování
- g) zvrásnění potahu, deformace jádra při podélném stlačování
- h) plastické chování potahu při vertikálním stlačování [26]

Reálné fotografie jednotlivých druhů poškození VSP jsou pak uvedeny na obrázku 25.



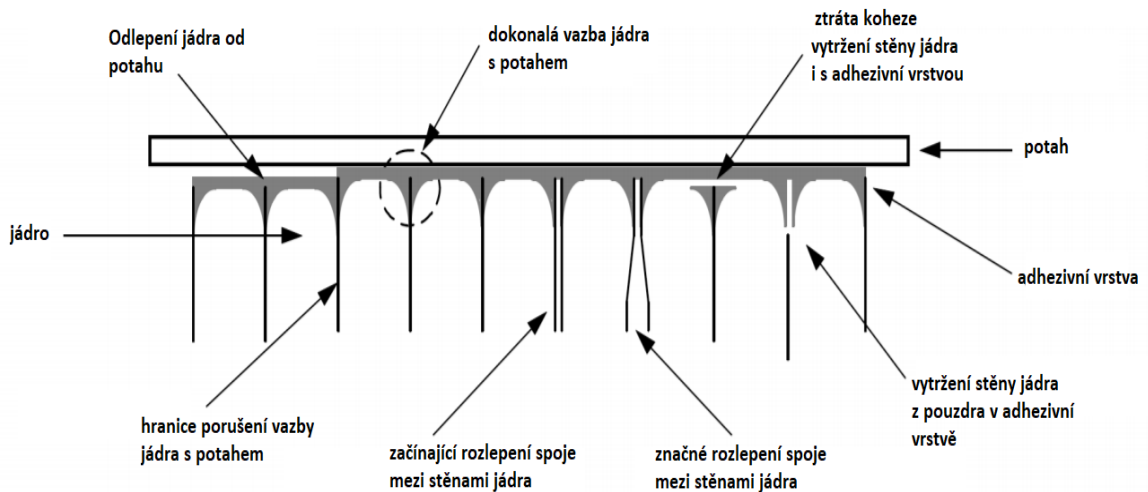
Obrázek 25 - Reálné fotografie poškození VSP v důsledku mechanického namáhání [28]



Obrázek 26 - Deformace jádra VSP po nadměrném plošném zatížení [33]

Obrázek 26 ukazuje plastickou deformaci jádra VSP po nadměrném plošném zatížení. Došlo k zborcení stěn jádra po celé ploše součásti.

#### 4.2.3 Poškození VSP v důsledku ztráty adheze a koheze



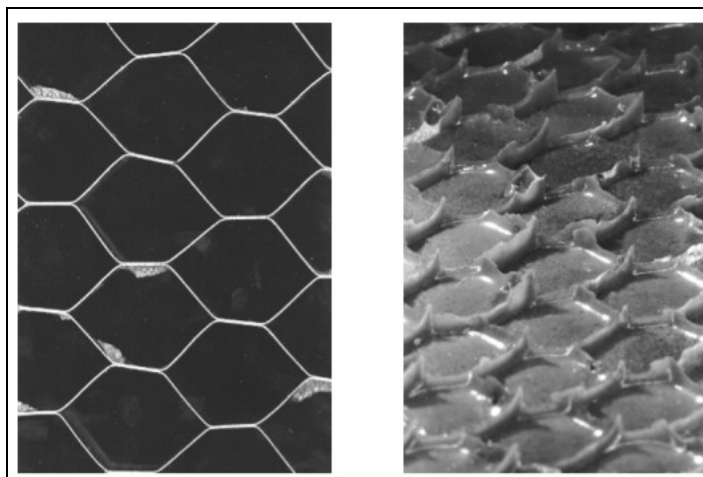
Obrázek 27 - Druhy poškození VSP v důsledku ztráty adheze nebo koheze [26]

**Ztráta adheze** představuje selhání vazby (lepeného spoje) mezi lepidlem a lepeným materiálem. Typy těchto defektů VSP jsou zachyceny na obrázku 27. Příčinami ztráty adheze mohou být:

- nedostatek adhezivního prostředku
- nedostatek chemických vazeb mezi lepidlem a lepeným materiálem
- špatná povrchová úprava nebo kontaminace lepeného materiálu
- použití špatného druhu lepidla pro daný lepený materiál [26].

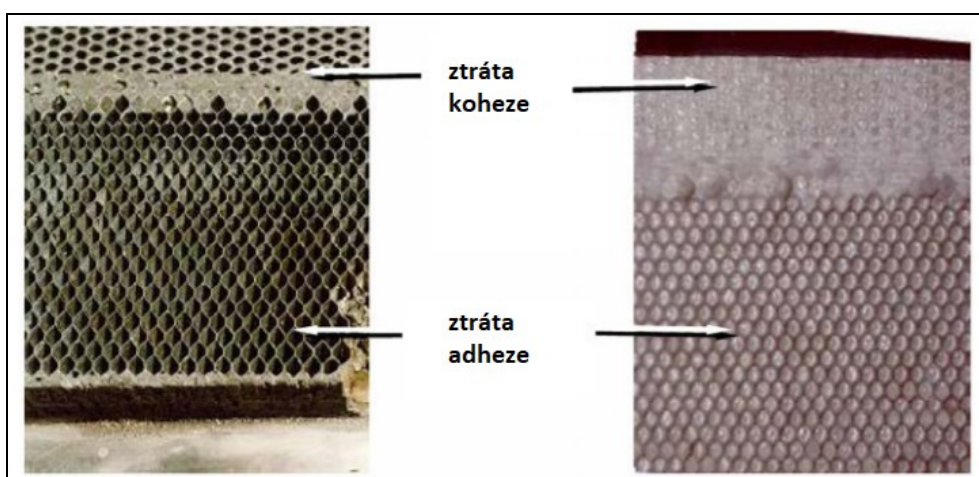
**Ztráta koheze** představuje selhání soudržnosti v rámci adhezivní vrstvy. Příčinou může být:

- špatně vytvrzené lepidlo
- vlhkost nebo jiné nečistoty přítomné v lepidle
- vyšší než předpokládané zatížení VSP [26].



Obrázek 28 - Ztráta adheze VSP - jádro po odlepení (vlevo) a potah stejného dílu se zbytky adhezivní vrstvy (vpravo) [26]

Na levé části obrázku 28 lze vidět, jak málo adheziva zůstalo na stěnách jádra po rozlepení VSP (vlevo), zatímco většina adheziva zůstala soudržná na stěně potahu (vpravo). Problémem tedy byla ztráta adheze, nikoliv ztráta koheze. Jinou situaci ukazuje obrázek 29, kde se v rámci vady jednoho konkrétního dílu projevila jak ztráta adheze, tak ztráta koheze.



Obrázek 29 - Kombinace ztráty adheze a koheze v rámci jednoho dílu z VSP – jádro (vlevo) a potah (vpravo) [26]

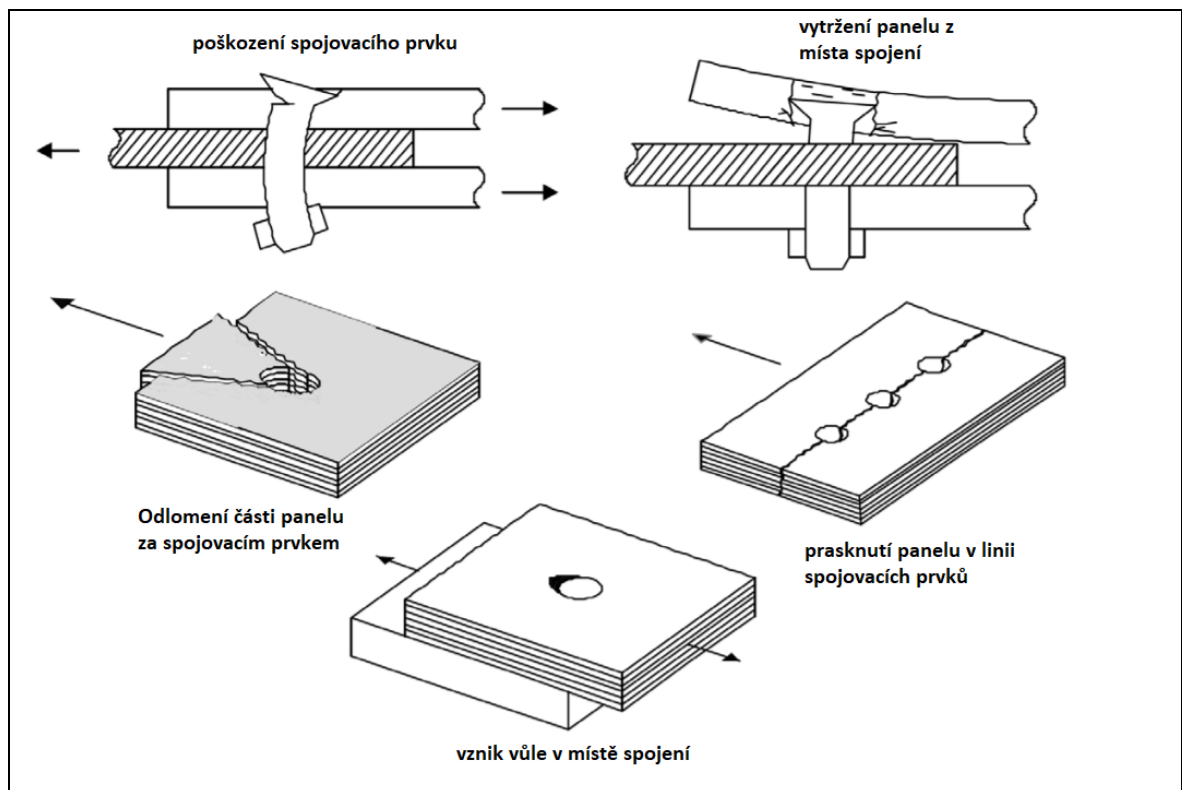
Obrázek 30 ukazuje ztrátu koheze, což se projevilo porušením soudržnosti adhezivní vrstvy. Lze také vidět, že po rozlepení VSP zůstaly na některých místech i zbytky stěn jádra, tzn. že adhezivní vazba byla v těchto místech dostatečná, ale došlo k roztržení jádra.



Obrázek 30 - Ztráta koheze VSP v kombinaci s roztržením jádra [26]

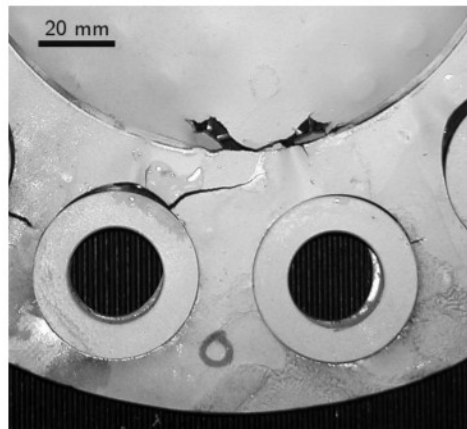
#### 4.2.4 Poškození VSP v místě spojů

Místa spojů jsou vždy náchylnější k poškození než rovinné plochy. V důsledku mechanického namáhání panelů zde dochází k pnutí, které se často projeví poškozením panelu.



Obrázek 31 - Typy poškození VSP v místě spojů [26]

Základní typy poškození VSP v místě spojů jsou uvedeny na obrázku 31. Reálná fotografie takového typu vady je zachycena na obrázku 32.



Obrázek 32 - Poškození VSP roztržením v blízkosti spojovacího prvku [33]

#### 4.2.5 Poškození gelcoatu VSP

Gelcoat je vnější povrchová vrstva pryskyřice, která přichází do kontaktu s okolním prostředím, proto musí splňovat zvýšené nároky na chemickou a mechanickou odolnost. V běžných provozních podmínkách však může dojít k poškození této vrstvy.



Obrázek 33 - Popraskání gelcoatu VSP [26]

Obrázek 33 zachycuje **popraskání gelcoatu** u součástí vyrobených z VSP. Příčinou prasklin bývá často pnutí v důsledku tlaku z vnitřní strany panelu, tlaku z vnější strany panelu nebo namáhání na ohyb. Dalším faktorem, který ohrožuje gelcoatovou vrstvu je **eroze**, tzn. poškození v důsledku působení přírodních vlivů (např. proudění větru, vody, sněhu, ledu, apod). Takové poškození části letadla je zachyceno na obrázku 34. I když součástí často mívají antierozní povlak, trvanlivost těchto povlaků je nedostatečná. Okraje dveří

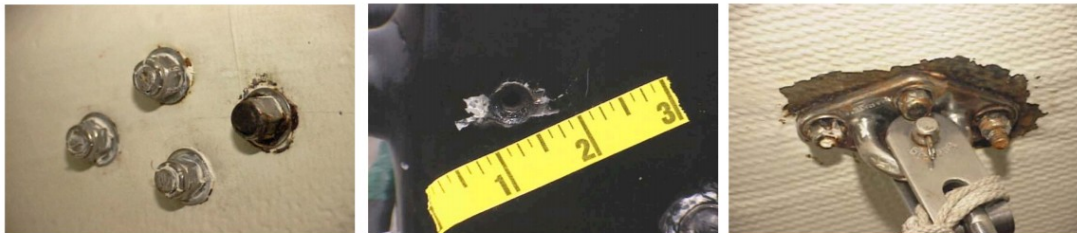
nebo panelů bývají k erozi mnohem náchylnější, než souvislé plochy. Náchylnost k erozi také z velké části může zapříčinit nesprávný design nebo montáž součástí. [19]



Obrázek 34 - Poškození gelcoatu sendvičové konstrukce letadla erozí [19]

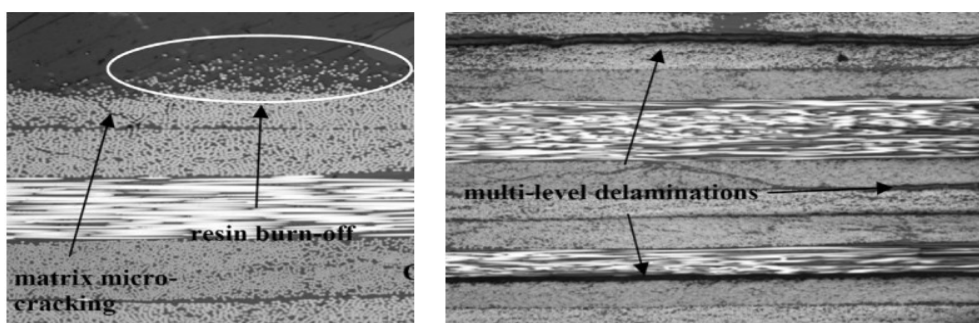
#### 4.2.6 Poškození VSP úderem blesku

Letadla při letu mohou být zasažena úderem blesku. I když samotné VSP nemusí být vodiivé, v blízkosti spojů s vodivými materiály může dojít k nadměrnému zahřívání a v důsledku toho i lokální poškození VSP. Takové případy ukazuje obrázek 35.



Obrázek 35 - Poškození VSP v blízkosti vodivých spojů po úderu bleskem [26]

Obrázek 36 zobrazuje pohled mikroskopem na VSP zasažený bleskem. Na levém obrázku je znázorněno spálení matrice (resin burn-off) a trhliny v matrici (matrix micro-cracking). Na pravé části jsou znázorněny delaminace na několika úrovních.



Obrázek 36 - Mikroskopický pohled na poškození VSP po úderu bleskem [26]



## 5 NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ

### 5.1 Definice NDT

Nedestruktivní testování (NDT – Non-Destructive Testing) zahrnuje „*metody používané pro zkoušení určitého produktu nebo materiálu nebo systému, aniž by se narušila jejich budoucí použitelnost nebo ovlivnila schopnost plnit předpokládanou funkci.*“ [31, s. 9]

Od počátku minulého století se začíná v průmyslových podnicích rozvíjet způsob testování výrobků nebo materiálů, při kterém nedojde k poškození nebo zničení zkoušeného vzorku. Tyto metody jsou souhrně označovány jako nedestruktivní zkoušení materiálů. V počátcích byly tyto praktiky považovány spíše jen za laboratorní kuriozity, které nejsou v praxi příliš použitelné. S postupným nárůstem požadavků na kvalitu výrobků, zdokonalováním zkušebních technik i objevováním nových metod se však z této činnosti vyprofiloval samostatný a uznávaný vědní obor. V současné době se již jedná o komplexní nepostradatelný zdroj cenných informací pro kontrolu kvality výroby nebo údržby. Používá se například v automobilovém průmyslu, v letectví, v dopravě, ale i při kontrole jaderných elektráren, plynovodů nebo ropovodů. Stále častěji je nasazován i ve stavebnictví nebo monitoringu budov. [31]

Nedestruktivní metody testování:

- zkoumají celistvost výrobků a tím pomáhá zaručovat jejich spolehlivost
- předchází selháním výrobků v důsledku poruch, pomáhá snižovat riziko vážných nehod, při kterých může dojít k poškození zdraví nebo majetku osob, které výrobky používají
- zajišťují spokojenost zákazníků a tím podporuje dobrou pověst výrobce
- pomáhají při designu výrobků
- přispívají k lepšímu řízení procesů
- snižují výrobní náklady a zmetkovitost
- pomáhají udržovat stejnou úroveň kvality výrobků. [31]

## 5.2 Klasifikace metod NDT

Metody NDT lze klasifikovat do šesti hlavních metodologických kategorií:

- **vizuální metody**
- **pronikavé záření (radiace)**
- **magneticko-elektrické metody**
- **mechanické vibrace**
- **termální metody**
- **chemické/elektrochemické metody. [31]**

Každou z metod lze charakterizovat pomocí těchto pěti základních faktorů:

- **zdroj energie nebo médium použité k sondování výrobku** (např. rentgenové paprsky, ultrazvukové vlny, termální záření, apod.).
- **charakter signálů, zobrazení nebo předznamenání vyplývající ze vzájemného působení s výrobkem** (např. útlum rentgenových paprsků, útlum ultrazvukových vln, odraz paprsku).
- **prostředky k detekování nebo snímání výsledných signálů** (např. fotoemulze, piezoelektrický krystal, cívka).
- **prostředky indikování nebo zaznamenávání signálů** (např. měření odchylky, stopa na osciloskopu, radiograf).
- **datová základna pro interpretaci výsledků** (přímá nebo nepřímá indikace kvalitativní nebo kvantitativní). [31]

Cílem každé testovací metody je pak zjistit informace o jednom, nebo i více parametrech zkoušeného předmětu:

- **diskontinuity a separace** (např. trhliny, dutiny, delaminace)
- **vadná struktura** (např. krystalická struktura, velikost zrna, segregace)
- **rozměry a metrologická měření** (např. tloušťka, průměr, mezera, šířka spáry)
- **fyzikální nebo mechanické vlastnosti** (např. vodivost, modul pružnosti)

- **chemické složení** (např. analýza slitin, identifikace nečistot, příměsí)
- **pnutí a dynamická odezva** (např. narůstání trhlin, opotřebení, zbytkové pnutí)
- **analýza zobrazení** (např. frekvenční spektrum)
- **abnormální zdroje tepla.** [31]

Tabulka 1 - Parametry, které lze zjistit jednotlivými kategoriemi metod NDT [31]

KATEGORIE	OBJEKT ZJIŠTĚNÍ
<b>Mechanické a optické</b>	Barva, trhliny, rozměry, tloušťka filmu, kalibrovaní, odrazivost, napětí vyvolávající deformace a jeho velikost, jakost povrchu, povrchové vady, průchozí trhliny
<b>Pronikavé záření</b>	Trhliny, hustota, rozdělování prvků, cizí předměty, vměstky, mikroskopická pórovitost, nesprávné seřízení, chybějící části, segregace, selhání funkčnosti, smršťení, svaštění, tloušťka, dutiny
<b>Elektromagnetické a elektronické</b>	Obsah slitiny, anizotropie, dutiny, studený spoj, místní napětí, tvrdost, kompozice, kontaminace, koroze, praskliny, hloubka trhliny, krystalická struktura, elektrická vodivost, vločky tepelné zpracování, trhliny, vměstky, iontová koncentrace, přeložky, napětí mřížky a krystalu, tloušťka vrstvy, vlhkost, polarizace, švy, segregace, smršťení, stav vulkanizace, pevnost v tahu, tloušťka, narušitel vazby
<b>Zvukové a ultrazvukové</b>	Iniciace a šíření trhlin, dutiny, útlumový faktor, stupeň vytvrzování, stupeň impregnace, stupeň slinování, dělení vrstev, hustota, rozměry, modul pružnosti, velikost zrna, vměstky, mechanická degradace, přesazení, pórovitost, degradace záření, struktura kompozic, povrchové napětí, pevnost v tahu, smyku, stříhu a tlaku, narušitel vazeb, opotřebení, mezilamelární vzdálenost perlitu, mez únavy
<b>Infračervené a termální</b>	Anizotropie, spoje, kompozice, emisní schopnost, tepelné hranice, tloušťka pokovování, pórovitost, tloušťka, dutiny, trhliny, štěpení, tepelné zpracování, stav vulkanizace vlhkost, koroze
<b>Chemické a analytické</b>	Identifikace slitiny, kompozice, trhliny, analýza a rozdělení prvků, zrnitost, vměstky, makrostruktura, pórovitost, segregace, povrchové anomálie

V tabulce 1 je uveden výčet parametrů, které lze testovat jednotlivými kategoriemi metod NDT. Možnosti použití nedestruktivní defektoskopie při testování výrobků a materiálů jsou velmi široké. Dle povahy zjišťovaného parametru lze NDT metody rozdělit na:

- **povrchové metody** (např. kapilární metoda, vizuální kontrola)
- **volumetrické metody** (např. radiografie, ultrazvukové zkoušení). [31]

Následující podkapitola bude zaměřena na metody NDT, které jsou vhodné pro zkoumání kompozitů a sendvičových panelů s voštinovým jádrem.

### 5.3 NDT kompozitů a sendvičových panelů

U KM se provádí charakteristika jejich defektů jinak, než u běžných materiálů, jelikož defekty se v nich šíří jiným způsobem, než v tradičních konstrukčních materiálech. Spíše dochází k narušování jejich struktury a kompozit potom ztrácí své vlastnosti, či parametry. Právě proto je včasné zjištění poruch nebo potenciálních problémů pomocí defektoskopie mimořádně důležité. Pro defektoskopii KM lze použít různé druhy metod NDT, ale také kombinaci více druhů metod pro jednotlivé složky VSP. [36]

Pro defektoskopii vad KM a VSP lze použít širokou škálu NDT metod, například:

- **vizuální kontrolu**
- **kontrolu poklepem**
- **ultrazvuk**
- **počítačovou tomografii**
- **digitální shearografii**
- **infračervenou termografii**
- **radiografii**
- **holografii**
- **modální analýzu** a další metody. [12]

Následující kapitoly budou věnovány dvěma konkrétním metodám NDT, které budou aplikovány v praktické části této práce při zkouškách detekce vody v jádru VSP.

## 6 INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE

### 6.1 Tepelně-fyzikální vlastnosti materiálů

Mezi základní tepelně-fyzikální vlastnosti materiálů patří:

- **tepelná kapacita**
- **tepelná vodivost**
- **teplotní roztažnost**
- **teplotní vodivost.**

**Tepelná vodivost** (thermal conductivity) je fyzikální veličina, která charakterizuje schopnost látky nebo materiálu vést teplo. Pro kvantifikaci tepelné vodivosti slouží součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^3\cdot\text{K}^{-1}$ ], který vyjadřuje množství tepla, které v ustáleném stavu prochází jednotkovým průřezem látky, při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času. [14]

**Teplotní vodivost** (thermal diffusivity) vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustáleném šíření tepla vedením v homogenním prostředí. Teplotní vodivost je charakterizována součinitelem teplotní vodivosti  $a$  [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ], který udává rychlost vyrovnání teplotního rozdílu na dvou protilehlých stěnách krychle o straně 1 m. Součinitel teplotní vodivosti je definován vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$$

$\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^3\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$c_p$  je měrná tepelná kapacita za stálého tlaku [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$\rho$  je hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti lze usuzovat rychlost změny teploty v určitém místě materiálu v důsledku změny jeho povrchové teploty. Čím je hodnota teplotní vodivosti vyšší, tím je teplota v určitém místě materiálu výrazněji závislá na změně jeho povrchové teploty. [12, 14]

## 6.2 Infračervené záření

Elektromagnetické pole se v prostoru šíří ve formě vln s elektrickými a magnetickými vlastnostmi. Elektromagnetické vlny byly dle vlnové délky systematicky rozříděny do několika druhů záření, např. světlo, rádiové vlny, infračervené záření a další typy záření. Kompletní spektrum elektromagnetických vln dle vlnové délky a jednotlivé typy záření jsou uvedeny na obrázku 37. Vlny s krátkými vlnovými délkami se šíří přímočaře, v podobě paprsků, a proto o nich hovoříme jako o záření. Ve vakuu se všechny druhy elektromagnetického vlnění šíří rychlostí světla, která je s vlnovou délkou elektromagnetické vlny a její frekvencí svázána vztahem:

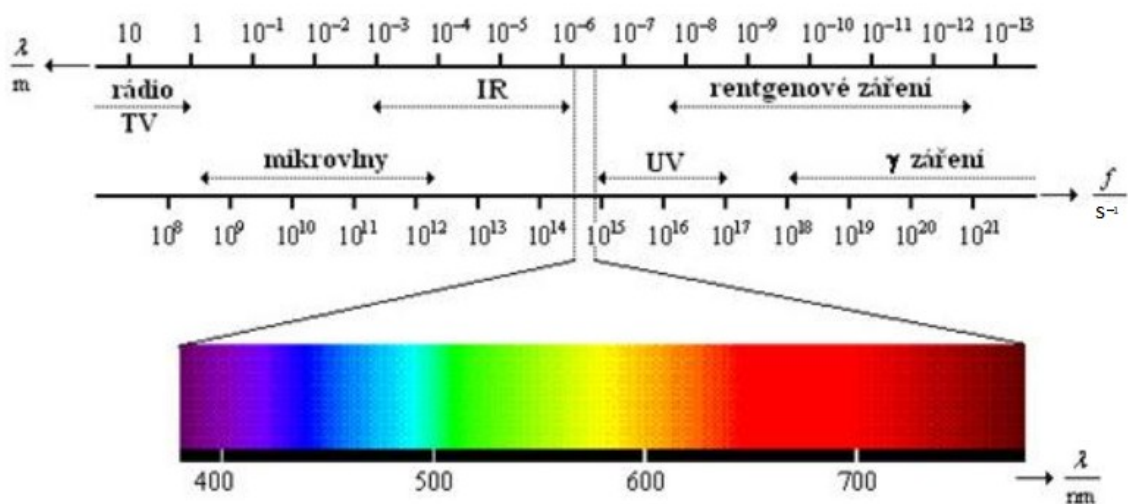
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$\lambda$  je vlnová délka [m]

$c$  je rychlost šíření světla ve vakuu [m.s<sup>-1</sup>]

$f$  je frekvence [s<sup>-1</sup>]

Lidské oko je citlivé pouze na vlnové délky omezeného rozsahu, tuto oblast záření označujeme jako viditelné světlo. Podle vlnové délky záření pak oko umí rozlišovat jednotlivé barvy. [4, 35]



Obrázek 37 - Spektrum elektromagnetických vln dle vlnové délky [35]

Každý objekt s teplotou vyšší než absolutní nula ( $0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$ ) také automaticky vyzařuje infračervené záření (IR – infrared). Toto záření však není lidským okem viditelné. Jak zjistil fyzik Max Planck již v roce 1900, existuje souvislost mezi teplotou tělesa a in-

tenzitou jím vyzařovaného IR záření. Čím teplejší je objekt, tím více tepla vyzařuje. Stejně jako u tepelného vedení a proudění závisí i u záření (radiace) množství energie na vzdálenosti a teplotním rozdílu mezi tělesy. Při dopadu záření na těleso může toto těleso záření pohltit (absorbovat) nebo odrazit. [35, 37]

### Emisivita

Emisivita  $\varepsilon$  je měřítkem schopnosti materiálu pohlcovat a tedy i vyzařovat IR záření. Závisí na charakteru povrchu materiálu a, u některých materiálů, také na teplotě měřeného tělesa. Maximální emisivitu  $\varepsilon = 1$  má absolutně černé těleso. Jedná se však pouze o teoretický stav, který ve skutečnosti nikdy nenastane. Reálná tělesa mají vždy emisivitu  $\varepsilon < 1$ , neboť jak bude vysvětleno dále, reálná tělesa záření zároveň odrážejí. V tabulce 2 je uvedena přibližná emisivita vybraných materiálů. Většina nekovových materiálů má dobrou emisivitu. To znamená, že s jejich zvyšující se teplotou vyzařují úměrně více energie. Nízkou emisivitu mají kovové povrchy, nejméně pak vyzařují kovy leštěné. [37]

Tabulka 2 - Přibližné hodnoty emisivity vybraných materiálů [4]

Hodnoty emisivity běžných materiálů	
Materiál	Emisivita*
Hliník, leštěný	0,05
Cihla, běžná	0,85
Cihla, pálená, hrubá	0,94
Litina	0,81
Beton	0,54
Měď, leštěná	0,01
Měď, zoxidovaná do černa	0,88
Elektrikářská páska, černá plastová	0,95
Sklo	0,92
Lak nebo Bakelit	0,93
Barva, průměrná olejová	0,94
Papír, černý, matný	0,94
Porcelán, malovaný	0,92
Guma	0,93
Ocel, galvanizovaná	0,28
Ocel, silně zoxidovaná	0,88
Asfaltový papír	0,92
Voda	0,98
* Hodnoty emisivity všech materiálů se měří při teplotě 0 °C (32 °F), ale o mnoho se neliší od hodnot naměřených při pokojové teplotě.	

## Reflexe

Reflexe  $\rho$  je konstanta, která udává schopnost tělesa odrážet záření. Reflexe závisí na charakteru povrchu materiálu a u některých materiálů, také na teplotě měřeného tělesa. Hladký, lesklý povrch odráží zpravidla záření mnohem lépe než hrubý a matný povrch ze stejného materiálu. [37]

## Přenos – transmise

Stupeň přenosu  $\tau$  je měřítkem schopnosti materiálu propouštět infračervené záření skrz něj. Závisí především na druhu a tloušťce materiálu, avšak naprostá většina materiálů není pro infračervené záření průchozí, tudíž tuto veličinu pro zjednodušení zanedbáváme. [37]

## Kirchhoffův zákon záření

Součet složek emisivity, odrazu a přenosu je vždy roven jedné:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Neboť prostup v praxi nehraje žádnou roli, součinitel prostupu  $\tau$  ve vzorci zanedbáme, zjednoduší se na:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

Z uvedeného vzorce vyplývá, že emisivita nemůže být v praxi nikdy rovna jedné. [37]

## 6.3 Infračervená termografie

Infračervená termografie (infrared thermography) je vědní obor využívající elektrooptických systémů k detekci a měření IR záření a jeho převodu do „viditelné“ podoby formou graficky znázorněné teploty povrchu měřeného tělesa. Výraz „termografie“ je odvozen ze základního slova „termogram“, které znamená „obraz teploty“. Počátky termografie spadají do 19. století, avšak masivně se začíná tato oblast rozvíjet až v období 2. světové války, kdy začala být využívána pro vojenské aplikace. Postupem času se IR termografie dostává i do nevojenských aplikací, např. pro diagnostiku budov nebo pro NDT materiálů. V současné době se již jedná o poměrně běžnou metodu a v praxi má široké využití:

- NDT materiálů a výrobků
- hledání úniků tepla z budov
- sledování elektrických vedení a jejich poškození



- určení poruchy vyhledáním nehomogenit teplotního pole
- stanovování výšky hladiny komodit v nádržích a silech
- neinvazivní detekci zánětů pod kůží
- měření rozložení teploty pro účely vědy a výzkumu
- detekci pohybu osob v zabezpečených objektech
- noční vidění. [4]

Zařízení, které detekuje a zobrazuje IR záření se obecně nazývá infrakamera, IR kamera, nebo také termovize. Běžná ruční IR kamera je zachycena na obrázku 38.



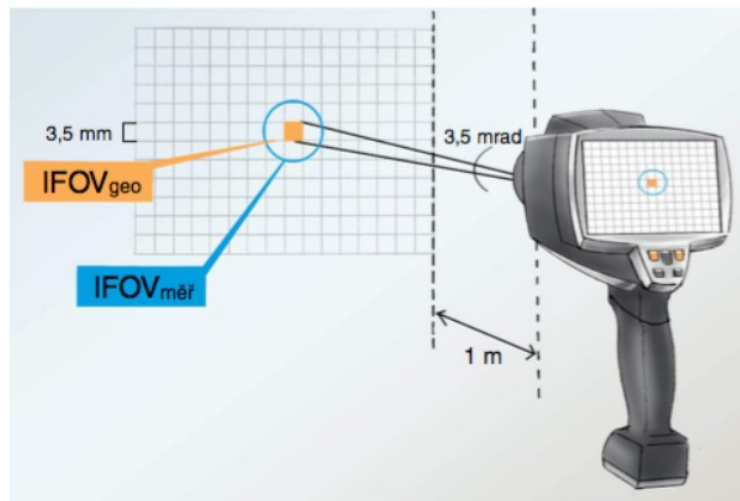
Obrázek 38 - Popis ruční IR kamery od firmy Fluke [4]

IR kamera pracuje na principu, kdy IR záření je koncentrováno čočkou termálního zobrazovače na detektor, který reaguje změnou napětí nebo odporu, který zaznamenává elektronika v termálním zobrazovači. Signál, který dává termální zobrazovač je převeden na barevný obraz (termogram) na displeji. Jednotlivé barevné odstíny odpovídají různým vlnovým délkám infračerveného záření povrchu předmětu. Pomocí ovládacích tlačítek IR kamery mohou být nastaveny různé parametry měření, např. rozsah teplot, teplotní stupnice, barevná paleta, prolínání obrazu, emisivita a úroveň teploty pozadí. [4]

Při určování vhodné vzdálenosti IR kamery od měřeného objektu je potřeba brát ohled na tři veličiny (vizualizaci parametrů zachycuje obrázek 39):

- zorné pole IR kamery, udává se hodnotou úhlu (FOV – field of view)

- nejmenší rozpoznatelný objekt při dané vzdálenosti (IFOV<sub>geo</sub>)
- nejmenší měřitelný objekt při dané vzdálenosti (IFOV<sub>měr</sub>). [37]

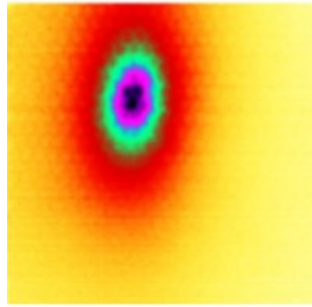


Obrázek 39 - Znárodnění charakteristik IR kamery – FOV, IFOV<sub>geo</sub>, IFOV<sub>měr</sub> [37]

Cena těchto zařízení za poslední desetiletí klesla více než desetinásobně, přičemž jejich kvalita výrazně stoupla. Kromě toho se i výrazně rozšířily možnosti využití počítačového softwaru ke zpracování snímků. Téměř všechny softwary již umožňují rychlé pořízení termogramu, zaslání snímku přes internet nebo např. převedení do formátu PDF a uložení v počítači. Takovým softwarem je např. Smart View od firmy Fluke. [4]

Termografické měření lze rozdělit na kvalitativní a kvantitativní. **Kvalitativní termografie** většinou nepožaduje přesně měření teplot, ale vyhodnocuje teplotní rozdíly a barevné kontrasty mezi dvěma měřenými objekty nebo mezi měřeným objektem a pozadím. Tento typ měření je dostačující pro účely měření teplotních úniků, nehomogenit teplotních polí, NDT testování, vyhledávání osob, apod. Cílem **kvantitativní termografie** je naopak stanovení teploty měřených objektů nebo jejich částí. Při tomto typu měření je však nezbytná znalost optických vlastností měřených objektů (emisivita, reflexe, transmise), je potřeba též vzít v úvahu i teplotu okolního prostředí a zhodnotit vliv okolí na měřené hodnoty. [12]

Dle jiného hlediska můžeme termografické měření rozdělit na aktivní a pasivní. Pokud se při měření uměle neovlivňuje teplota měřeného tělesa (není jí záměrně dodáváno nebo odebíráno teplo) a měří se pouze její přirozená teplota nebo přirozeně vzniklé teplotní kontrasty, jedná se o **pasivní termografii**. Při **aktivní termografii** se teplota měřeného tělesa uměle ovlivňuje vnějším zdrojem (např. bleskovým světlem, prouděním teplého vzduchu, apod.). [12]



Obrázek 40 - Termogram zachycující zmrazenou vodu uvnitř jádra VSP [10]

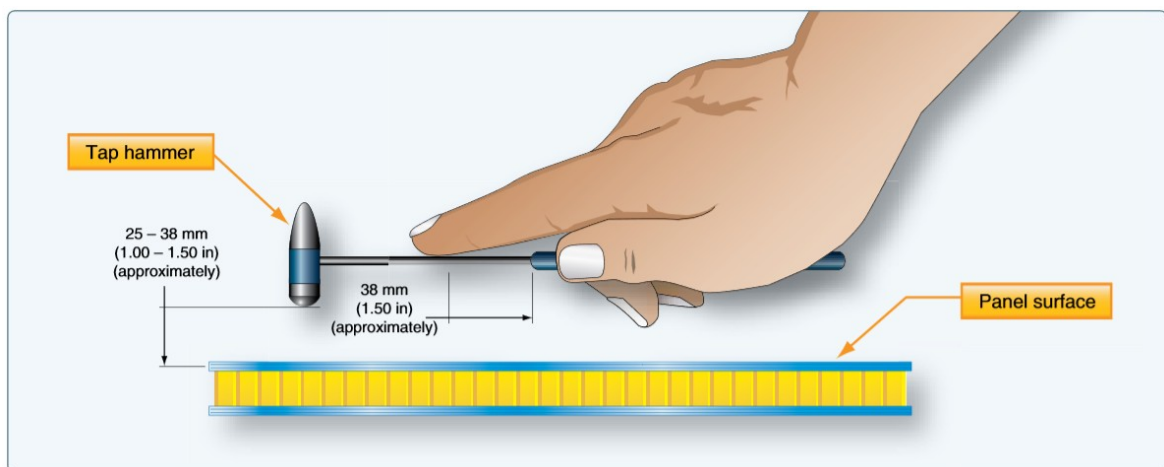
IR termografie byla použita k detekci vody v jádru VSP v [10]. Do buněk jádra byla injekcí napuštěna voda. Po injektáži byl panel umístěn do mrazícího boxu a po vyjmutí z mrazícího boxu byl tento nasnímkován IR kamerou. Výsledek je zobrazen na obrázku 40. Stejný postup bude použit i při experimentu v praktické části této práce.

## 7 ZKOUŠKA POKLEPEM

Jednou z metod pro NDT testování VSP je zkouška poklepem (tap testing). Zkouška poklepem se velmi často používá pro detekci vad kompozitních materiálů v leteckém průmyslu při pravidelných preventivních kontrolách letadel. I v dnešní době je stále ještě nejčastěji používanou technikou pro detekci delaminace nebo odlepení potahu VSP od jádra. I přes svou jednoduchost a rychlost je totiž překvapivě účinná a v ruce zkušeného pracovníka i přesná. [19]

Zkouška poklepem je kontaktní metoda NDT, jejíž podstata spočívá v systematickém lehkém poklepávání zkušebním předmětem na povrch testovaného materiálu a následném poslechu akustické emise (AE) daného materiálu. Jasný, ostrý a rezonující zvuk svědčí o pevné a celistvé struktuře kompozitu, zatímco tichý, tlumený, či jinak nestandardní zvuk při poklepu ve většině případů značí vadu materiálu. Tato vada přitom nemusí být viditelná (např. delaminace, odlepení potahu od jádra VSP, skryté trhliny uvnitř jádra nebo potahu). Předpokladem pro správné vyhodnocování zkoušky poklepem je znalost AE při poklepu na bezvadný materiál. Frekvence poklepu musí být vyšší, aby vznikl dostatečný počet zdrojů AE a díky tomu byl rozdíl mezi vadným a bezvadným místem zřetelný. Zkouška poklepem by měla být prováděna v tichém prostředí bez rušivých zvuků. [19, 20]

Správná technika úchopu zkušebního poklepávacího kladívka je zachycena na obrázku 41, kde tap hammer označuje poklepávací kladívko, panel surface je povrch zkoušeného sendvičového panelu.



Obrázek 41 - Doporučený úchop a poloha testovacího kladívka při zkoušce poklepem [20]

Zkouška poklepem je vhodná především pro testování tenkostěnných laminátů, VSP, ale výjimečně může být použita i pro kontrolu vnějšího povrchu tlustostěnných laminátů. Tato metoda však není spolehlivá pro struktury s více než čtyřmi vrstvami tkaniny.

Při zkoušce poklepem může nastat případ, že některé AE, které jsou interpretovány zkušebním pracovníkem jako defekty, ve skutečnosti nemusí značit vadná místa a jejich odlišná odezva může být zapříčiněna konstrukčně, např. designem součásti. Proto by měla být kontrola prováděna zkušenými pracovníky, kteří jsou obeznámeni s vnitřní konfigurací součásti a umí správně vyhodnotit tyto „falešné signály“. [19]

Každý zvuk je charakterizován frekvencí nebo frekvenčním spektrem akustických vln v Hz a také jejich intenzitou. Intenzita je nejčastěji měřena prostřednictvím hladiny akustického tlaku v dB. Decibel je bezrozměrná jednotka s logaritmickým měřítkem a není součástí soustavy jednotek SI. Zvuky lze také znázornit graficky, např. pomocí spektrogramu. Spektrogram je graf, kdy na ose y jsou hodnoty frekvenčního spektra zvuku v Hz, na ose x je čas v sekundách, přičemž intenzita pro jednotlivé hodnoty frekvenčního spektra v daném čase je vyjádřena pomocí barevné škály, kdy každá barva představuje jinou intenzitu zvuku v dB nebo dBFS (decibels relative to full scale).

Testovací předmětem pro zkoušku poklepem může být:

- **mince** (odtud vznikl alternativní název metody „coin tapping“ nebo „coin testing“)
- **kladívko** – vhodný typ kladívka pro zkoušku poklepem ukazuje obrázek 42.

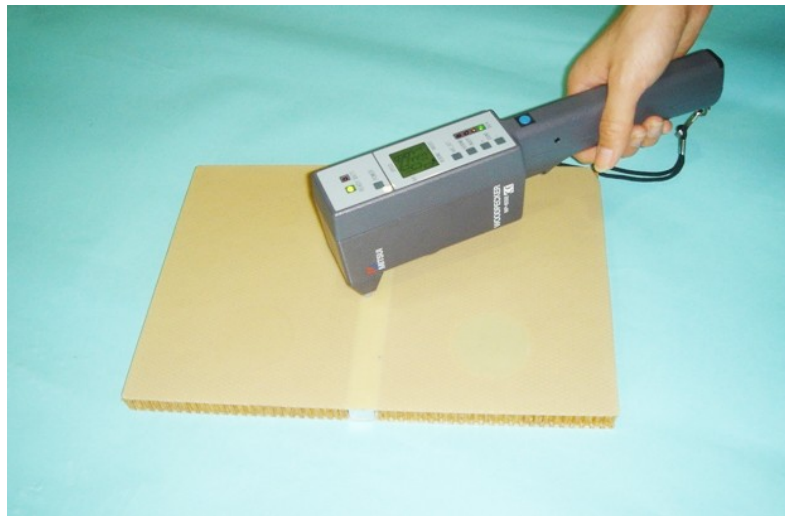


Obrázek 42 - Laboratorní kladívko vhodné pro zkoušku poklepem [32]

- **digitální zařízení pro zkoušku poklepem** – digitální zařízení se používá stejným způsobem jako u klasického poklepu s tím rozdílem, že namísto kladívka je použita senzorická hlava, která zaznamenává AE při dopadu přístroje na zkušební předmět.

Přístroj funguje na principu porovnávání referenčních dat z bezvadné oblasti zkoušeného tělesa s aktuálně měřenými daty a na základě odchylky od referenční hodnoty vyhodnocuje přítomnost vad. Zařízení je možné propojit s plotterem, který zaznamenává lokaci senzoru i vyhodnocených vad. K zařízení je dodáván i software, díky kterému je možné s daty dále pracovat v digitální podobě na počítači. [19]

Digitální zařízení Woodpecker pro zkoušku poklepem od japonské firmy Mitsui použité při testování VSP je zachycuje obrázek 43.



Obrázek 43 - Digitální zařízení Mitsui Woodpecker (WP-632AM) [7]

Použití digitálního zařízení pro zkoušku poklepem má oproti klasické metodě tyto výhody:

- eliminace subjektivity při vyhodnocování zkoušky
- nezávislost na konkrétní osobě pracovníka
- přesnost a citlivost při lokaci vady
- měření je nezávislé na vnějším okolí, možnost práce i v hlučném prostředí
- kvantifikace naměřených dat
- možnost propojení s plotterem a počítačem, možnost dodatečné práce s daty. [19]

I přes nesčetné výhody má digitální zařízení jednu velkou nevýhodu a tou je jeho vysoká pořizovací cena a v důsledku toho i omezená dostupnost pro použití v běžných podmínkách. Proto bude pro zkoušku poklepem v praktické části použito kladívko. Cílem experimentu bude zjištění, zda má přítomnost vody uvnitř buněk jádra VSP vliv na AE při poklepu kladívkem na desku.

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

## 8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK

Pro provedení experimentálních zkoušek bylo nutné nejprve vyrobit vzorky VSP (zkušební desky). Bylo rozhodnuto o výrobě 3 ks zkušebních desek podle normy ČSN EN 2374, přičemž každá deska měla mít jiné parametry nebo materiálové složení. Výroba probíhala v laboratořích Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati.

Postup výroby zkušebních desek:

- 1) Prepregy i voštinová jádra byly nastříhány na přístřihy požadovaných rozměrů.
- 2) Byla zvolena výrobní technologie lisování za tepla a tlaku. Pro vytvrzování byl využit laboratorní vulkanizační lis, který je v laboratořích k dispozici. Lis je zobrazen na obrázku 44.
- 3) Na desky lisu bylo nejprve nanесeno separační činidlo pro snadnější vyjmutí hotových desek z lisu.
- 4) Po vytemperování lisu na 150 °C byly do lisu vloženy předem poskládané zkušební desky VSP.
- 5) Vytvrzování probíhalo 20 minut při teplotě 150 °C.



Obrázek 44 - Laboratorní vulkanizační lis



**Vzorek č. 1**

**Rozměr:** 20 x 9,5 cm, výška voštiny 8 mm, velikost buňky 4,8 mm.

**Specifikace použitých materiálů:** Potah byl vyroben ze tří vrstev prepregů IMP503Z/ VV 192T s epoxidovou pryskyřicí a skelnou výztuží. Jádro zkušebních desek tvoří hliníková voština ECM 4.8-77. Hotový vzorek je vyfocen na obrázku 45.

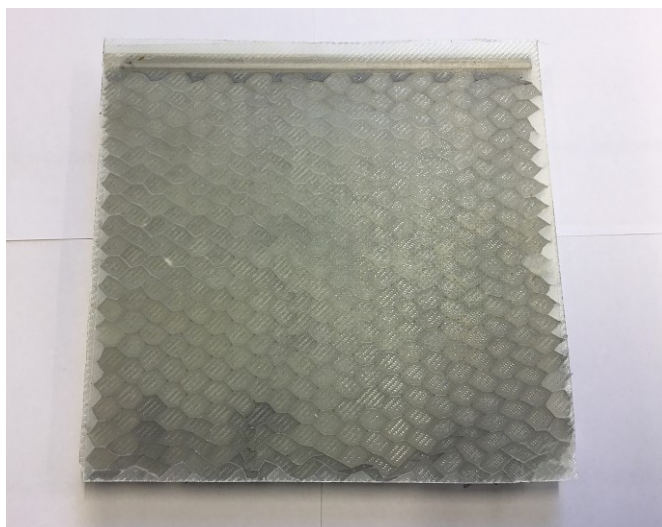


Obrázek 45 – Zkušební vzorek č. 1

**Vzorek č. 2**

**Rozměr:** 20 x 20 cm, výška voštiny 16 mm, velikost buňky 9,6 mm.

**Specifikace použitých materiálů:** Potah byl vyroben ze tří vrstev prepregů IMP503Z/ VV 192T s epoxidovou pryskyřicí a skelnou výztuží. Jádro zkušebních desek tvoří hliníková voština ECM 9.6-41. Hotový vzorek je vyfocen na obrázku 46.

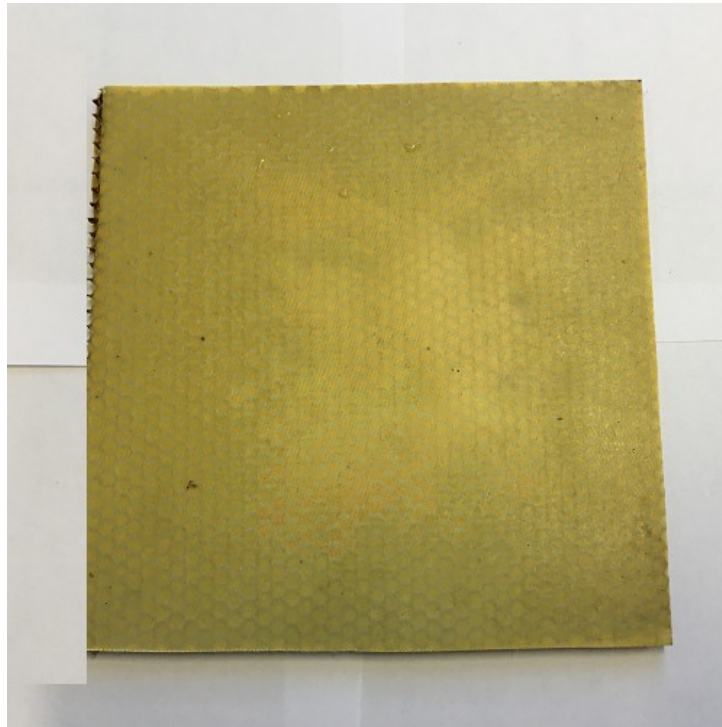


Obrázek 46 – Zkušební vzorek č. 2

**Vzorek č. 3**

**Rozměr:** 17 x 17 cm, výška voštiny 5 mm, velikost buňky 4,5 mm.

**Specifikace použitých materiálů:** Potah byl vyroben ze dvou vrstev prepregů PHG840N-G123-40 s fenolickou pryskyřicí a skelnou výztuží. Jádro zkušebních desek tvoří blíže nespecifikovaná nomexová voština. Hotový vzorek je vyfocen na obrázku 47.



Obrázek 47 – Zkušební vzorek č. 3

## 9 INJEKTÁŽ VODY DO ZKUŠEBNÍCH DESEK

Akumulace vody uvnitř buněk voštinového jádra byla simulována navrtáním několika buněk malou ruční vrtačkou a injektáží vody do buněk. Pro vrtání byla použita starší vrtačka značky IPI s vrtákem o průměru 0,8 mm (viz obrázek 48).



Obrázek 48 – Malá vrtačka IPI pro navrtávání potahu VSP

Do vzorku č. 1 byl vyvrtán kříž o rozměru 5 x 6 cm. Kříž byl zvolen proto, aby šel obrazec zřetelněji vidět při snímkování IR kamerou. Do vzorku č. 2 byl vyvrtán souvislý obrazec skládající se ze sedmi sousedních buněk, což je tvar, který se bude v praxi vyskytovat pravděpodobněji. Vrtání do zkušební vzorku č. 2 ukazuje obrázek 49. Do vzorku č. 3 byl rovněž vyvrtán kříž o rozměru 5,5 x 5,5 cm z důvodu lepší názornosti na termogramu.



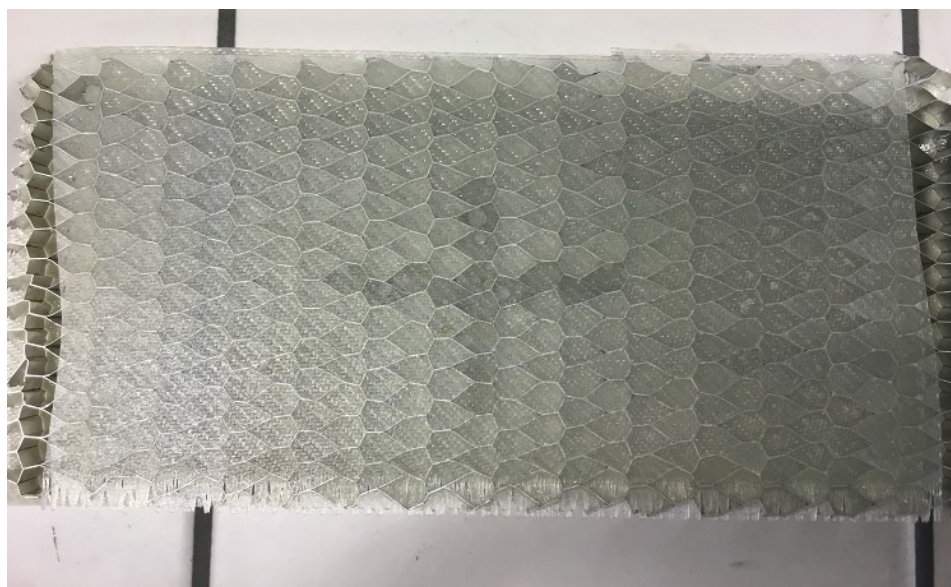
Obrázek 49 – Vrtání dírek do potahu zkušební vzorku č. 2

Pro injektáž vody do buněk jádra zkušebních desek byla použita standardní zdravotnická injekční stříkačka Braun o objemu 20 ml a injekční jehlou o průměru 0,7 mm a délce 46 mm. Injektáž vody do buněk voštinového jádra je zachycena na obrázku 50.



Obrázek 50 – Injektáž vody do zkušebního vzorku č. 2

Takto připravené vzorky obsahující vodu pak byly použity pro experimentální zkoušky detekce vody v jádru VSP. Na obrázku 51 je zachycen hotový vzorek č. 1 obsahující vodu v buňkách ve tvaru kříže.



Obrázek 51 – Vzorek č. 1 obsahující vodu v buňkách ve tvaru kříže

## 10 EXPERIMENT I – INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE

### 10.1 Použité experimentální zařízení

- **Teploměr Fluke 561 HVAC Pro** – umožňuje kontaktní i bezkontaktní IR měření teploty v rozsahu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Detailní technické parametry teploměru jsou uvedeny v Příloze I. Vzhled teploměru ukazuje obrázek 52.



Obrázek 52 – Teploměr Fluke 561 HVAC Pro

- **Termokamera Fluke TiS45** - Termokamera Fluke TiS45 (na obrázku 53) umožňuje měření teplot v rozsahu od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kamera má 3,5" LCD displej s možností zobrazování snímků v sedmi nabízených barevných paletách, disponuje vestavěným fotoaparátem s rozlišením 5 Mpx, interní paměť 4 GB. Přístroj je napájen baterií, ale umožňuje také připojení k elektrické síti. Detailní přehled technických parametrů IR kamery Fluke TiS45 je uveden v Příloze II. [23]



Obrázek 53 - Termokamera Fluke TiS45 [23]

- **Software Fluke SmartView** - Fluke SmartView představuje softwarové řešení pro stolní počítače, které je kompatibilní s kompletním portfoliem termokamer Fluke. Jedná se o komplexní softwarovou platformu, která umožňuje prohlížení pořízených snímků, jejich analýzy, vytváření zpráv, export snímků na cloudové úložiště Fluke Cloud nebo synchronizaci s mobilní aplikací Fluke Connect. Software je k dispozici zdarma ke stažení na stránkách firmy Fluke. [22]

## 10.2 Měření a výsledky

Před samotným ostrým měřením IR kamerou je vždy nutné nejdříve stanovit emisivitu snímaných povrchů z důvodu přesnosti měření. Stanovení emisivity bylo provedeno následujícím postupem:

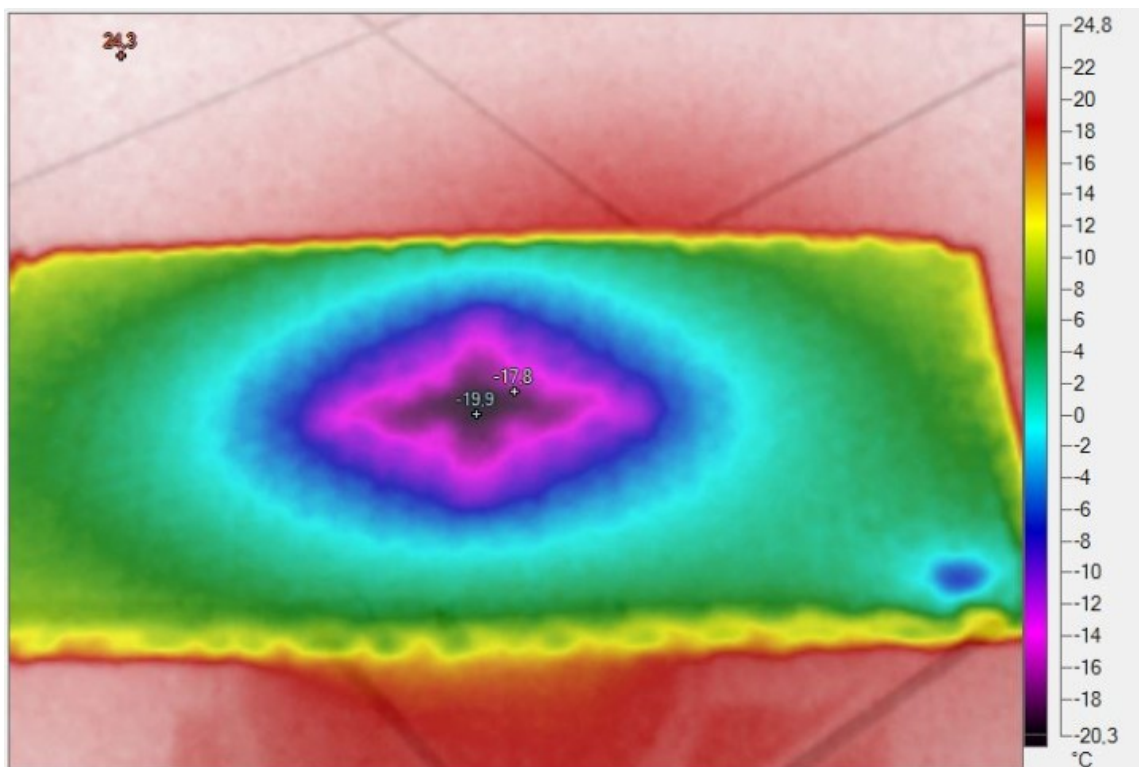
- 1) Teploty vzorků na okolní teplotu - Zkušební desky byly ponechány v místnosti, kde byla stanovována emisivita, po dobu 20 minut, aby došlo k vyrovnání teploty vzorků a okolního prostředí.
- 2) Teploměrem Fluke 561 HVAC Pro byla za pomoci kontaktního čidla změřena přesná teplota povrchu zkušebních desek (referenční teplota) a tato byla porovnána s teplotou v místnosti. Bylo potvrzeno, že obě teploty jsou shodné, přičemž teploměr ukazoval teplotu 24 °C.
- 3) Následně byla teplota zkušebních vzorků změřena IR kamerou Fluke TiS45, přičemž teplota byla měřena bezkontaktně za použití IR termografie. Pokud se na displeji kamery zobrazila jiná teplota povrchu zkušebních desek než referenční (24 °C), znamenalo to, že je nutné ručně korigovat emisivitu materiálu tak, aby i IR kamera ukazovala požadovaných 24 °C.
- 4) Tímto postupem byly stanoveny hodnoty emisivity pro jednotlivé zkušební vzorky. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3:

Tabulka 3 – Hodnoty emisivity pro jednotlivé zkušební vzorky

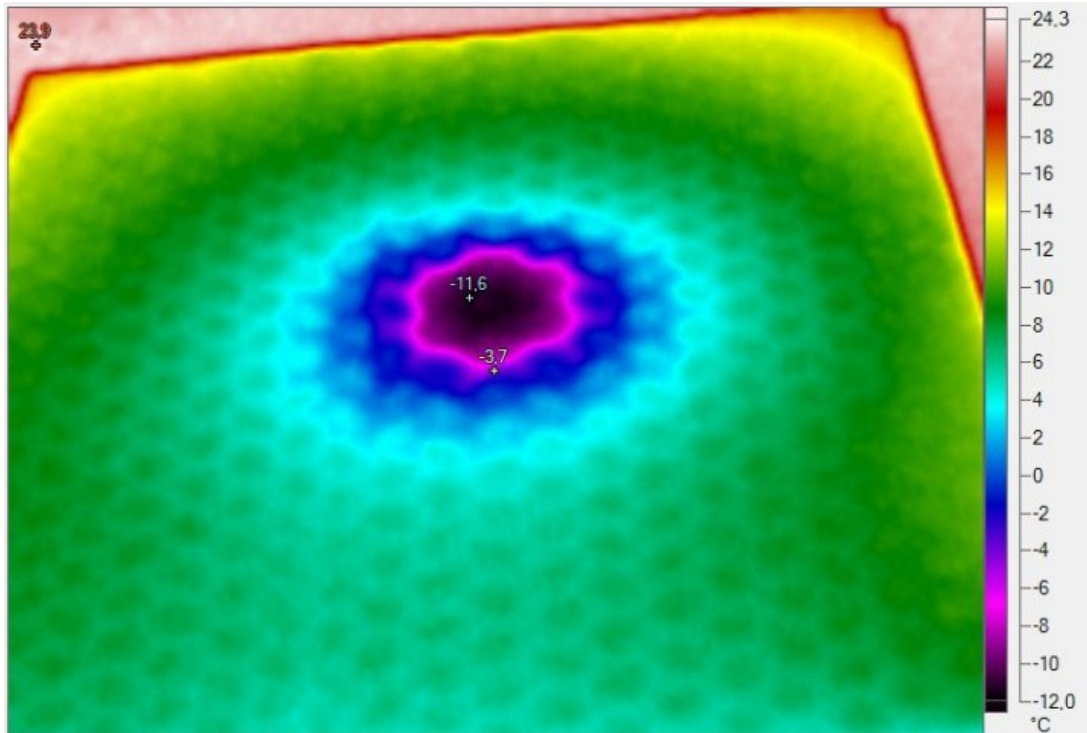
vzorek č. 1	$\varepsilon_1 = 0,8$
vzorek č. 2	$\varepsilon_2 = 0,99$
vzorek č. 3	$\varepsilon_3 = 0,9$

Připravené vzorky VSP obsahující vodu byly po dobu 12 hodin umístěny do mrazícího boxu s vnitřní teplotou  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , který se nachází v univerzitní laboratoři a slouží pro skladování prepregů. Cílem bylo simulovat proces, ke kterému dochází u VSP používaných v leteckém průmyslu, kdy při letu v běžné letové výšce je teplota vzduchu až  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a dochází ke zmrznutí vody uvnitř buněk voštinového jádra. Po přistání naopak dochází k postupnému vyrovnávání teploty VSP s okolím, což bylo simulováno vytažením vzorků z mrazícího boxu a ponecháním v pokojové teplotě  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jelikož nutnou podmínkou pro úspěšné měření IR kamerou je teplotní rozdíl mezi vodou uvnitř buněk jádra a okolním povrchem VSP, měření bylo možné provádět pouze po omezenou dobu, tj. do vyrovnání teplot.

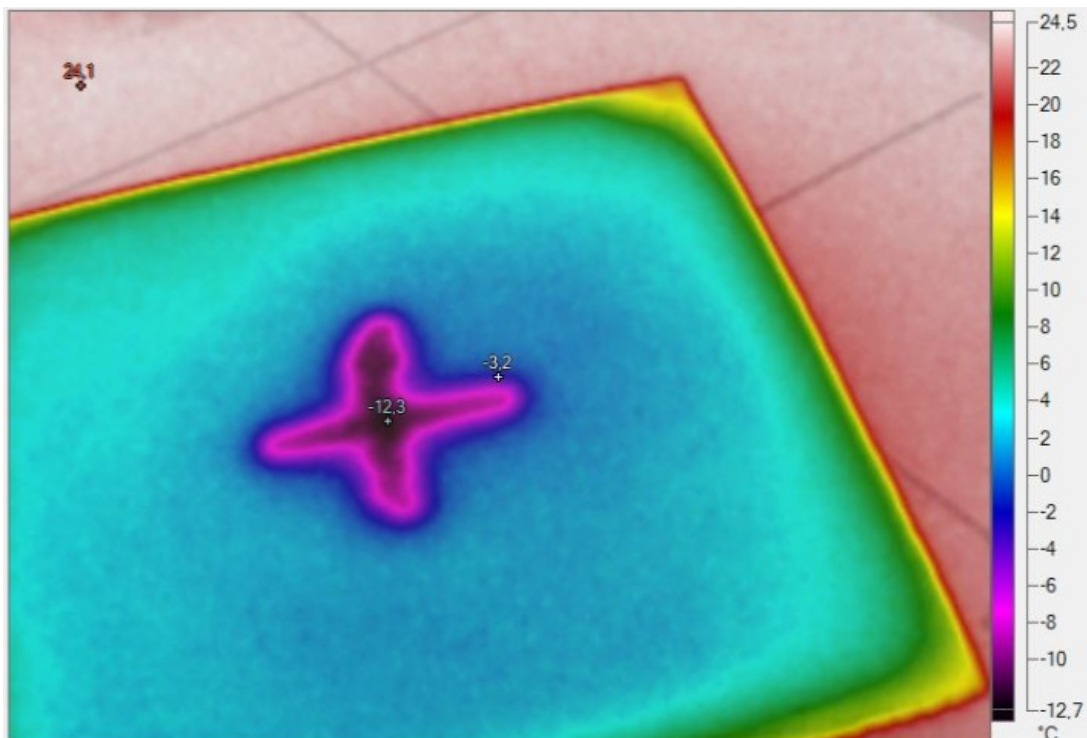
Každý vzorek byl po vytažení z mrazícího boxu volně položen na stůl v laboratoři a byl postupně snímkován IR kamerou upevněnou na stativu. Snímky byly prováděny automaticky s nastaveným intervalem 20 s po dobu pěti minut. Poté byl ještě pořízen další snímek po 10 minutách od vytažení z mrazícího boxu a po 20 minutách od vytažení z mrazícího boxu. K úplnému vyrovnání teplot vzorků s okolím došlo přibližně po 25 minutách. Poté již nebylo možné provádět další měření. Termogramy pořízené po 1 minutě od vytažení vzorků z mrazícího boxu jsou zachyceny na obrázcích 54, 55 a 56.



Obrázek 54 – Termogram zkušební vzorku č. 1



Obrázek 55 – Termogram zkušebního vzorku č. 2



Obrázek 56 – Termogram zkušebního vzorku č. 3



### 10.3 Zhodnocení experimentu

Z pořízených termogramů lze jasně a zřetelně identifikovat místa obsahující vodu v buňkách jádra pod povrchem zkušebních desek VSP. Tvar zachycených obrazců přesně kopíruje buňky obsahující vodu, a proto není pochyb, že experiment byl úspěšný. S jistotou lze konstatovat, že infračervená termografie je vhodná NDT metoda pro detekci vody uvnitř jádra VSP. Nutno však podotknout, že metoda má své výhody i nevýhody.

Výhody detekce vody v jádru VSP metodou IR termografie:

- **spolehlivost** – je zcela nepravděpodobné, že by viditelné obrazce na termogramech mohly mít jinou příčinu, než přítomnost vody v buňkách jádra VSP, proto lze považovat metodu za spolehlivou
- **přesnost** – na termogramu lze poměrně snadno identifikovat buňky obsahující vodu; software Smart View navíc umožňuje prolínání termografického snímku se skutečnou fotografií, díky čemuž lze poměrně přesně lokalizovat vadu VSP a provést následnou opravu panelu
- **bezkontaktnost** – snímkování IR kamerou nevyžaduje přímý kontakt se snímaným objektem, tudíž je možné snadno a rychle zkontrolovat i větší plochy
- **vysoká citlivost IR kamery** – termokamera dokáže rozpoznat i minimální teplotní rozdíly v řádu desetin stupně, a proto při detekci není nutné vyvolávat příliš velký teplotní rozdíl mezi měřeným objektem a okolím.

Nevýhody detekce vody v jádru VSP metodou IR termografie:

- **specifické podmínky pro měření** – před samotným měřením je nutné dosáhnout alespoň minimálního teplotního rozdílu mezi VSP a okolím, jinak by detekce vody touto metodou nebyla úspěšná
- **možnost měření po omezenou dobu** – detekci vody touto metodou lze provádět pouze po omezenou dobu, tj. do vyrovnání teplot vody v buňkách voštinového jádra s okolím; poté již není možné provádět další měření
- **vysoká pořizovací cena IR kamer.**

## 11 EXPERIMENT II – ZKOUŠKA POKLEPEM

### 11.1 Použité experimentální zařízení

- **Kladívko** - Pro poklep bylo použito malé kladívko o velikosti 21 cm a hmotnosti 68 g. Kladívko je ukázáno na obrázku 57.



Obrázek 57 – Kladívko použité pro zkoušku poklepem

- **iPad** – Pro nahrávání a analýzu zvuku při poklepu byl použit tablet iPad od výrobce Apple.
- **Software Spectrum a Spectrum View** – volně dostupné softwarové aplikace pro analýzu zvuku umožňující vizualizaci nahraných zvuků.

### 11.2 Měření a výsledky

Pro zkoušku byly použity identické vzorky jako při experimentu s IR termografií. Bylo však rozhodnuto o zvětšení pole obsahujícího vodu v buňkách voštinového jádra z důvodu existence podezření, že by nebylo možné jednotlivé buňky pomocí poklepu identifikovat. Zvětšení pole bylo provedeno dodatečným navrtáním dalších buněk voštinového jádra a následnou injektáží vody do těchto buněk tak, aby vznikl jednolitý obrazec přibližně kruhového tvaru. U vzorku č. 1 byl výsledný průměr obrazce 5 cm, u vzorku č. 2 byl průměr 7 cm a u vzorku č. 3 měl obrazec průměr 5 cm.

Samotná zkouška byla prováděna v uzavřené místnosti, kde byly předem odstraněny veškeré slyšitelné zdroje hluku, které by mohly výsledky zkoušky zkreslit (např. tikající hodiny,

hluk od elektrických spotřebičů, ventilátor zapnutého počítače, apod.). Poklep na zkušební desky probíhal manuálně kladívkem ze vzdálenosti cca 3,5 cm od zkušební desky. Frekvence úhozů kladívka byla přibližně 2 úhozy za sekundu.

Zkouška byla vyhodnocována dvěma způsoby:

- **Smyslové (vjemové) hodnocení prostým poslechem** – Zvuk poklepu byl hodnocen metodou prostého poslechu s cílem identifikovat odlišný zvuk při poklepu na místo obsahující vodu v jádru zkušební desky a místa bez vody v rámci téže zkušební desky.
- **Hodnocení s využitím počítačového softwaru** – Vzhledem k subjektivitě smyslového hodnocení a také nemožnosti získání grafického výstupu měření byla ještě pro potvrzení výsledků přidána metoda hodnocení s využitím počítačového softwaru pro analýzu zvuku. Zvuk poklepu byl nahráván pomocí tabletu iPad a pro analýzu zvuku byl využit volně dostupný software pro analýzu zvuku. Cílem bylo graficky porovnat zvuk poklepu na zkušební desku obsahující vodu a zvuk poklepu na desku neobsahující vodu. Cílem této metody nebylo měření konkrétních kvantitativních hodnot, ale pouze kvalitativní srovnání. Nejprve byl nahrán zvuk poklepu na desku bez vody, následovala injekce vody do vybraných buněk jádra a opět následovalo nahrávání zvuku poklepu na desku obsahující vodu za jinak nezměněných podmínek.

### 11.2.1 Hodnocení zvuku poklepu metodou prostého poslechu

Identifikace vydávaného zvuku metodou prostého poslechu vyžadovala maximální soustředění a absolutní ticho v místnosti. U vzorku č. 3 byl při poklepávání na desku v místě obsahujícím vodu v jádře zaznamenán mírně hlubší a tlumenější zvuk oproti místu neobsahujícímu vodu, což by mohlo být přisuzováno přítomnosti vody uvnitř buněk jádra desky. Rozdíl byl potvrzen několikerým opakováním poklepu, vždy se stejným výsledkem. Avšak u zkušebních vzorků č. 1 a č. 2 byly rozdíly ve vydávaném zvuku pouze minimální a špatně rozeznatelné. Ani při mnohonásobném opakování zkoušky nebylo možné s jistotou identifikovat výraznější rozdíly při poklepu na zkušební desky č. 1 a č. 2. Nelze však vyloučit, že hodnocení mohlo být zkresleno subjektivitou vnímání konkrétní zkoušející osoby. Proto bylo ještě potřeba výsledky potvrdit pomocí počítačového softwaru.

### 11.2.2 Analýza zvuku poklepu pomocí softwaru Spectrum

Pomocí softwarové aplikace Spectrum byl získán tzv. „otisk zvuku“. Funkce Peak dokáže uložit pro každou hodnotu frekvenčního spektra zvuku jeho maximální dosaženou intenzitu (hodnotu akustického tlaku), a tyto hodnoty vynese do grafu. Na ose y je relativní intenzita zvuku v jednotkách dBFS (decibels relative to full scale) a na ose x jsou hodnoty frekvenčního spektra zvuku v Hz. Maximální intenzita pro každou frekvenci již zůstává trvale zaznamenána a tuto křivku je pak možné porovnat pro různé zvuky. Takto byly postupně zaznamenány zvuky jednoho poklepnutí kladívkem na všechny zkušební desky, nejprve bez vody a poté obsahující vodu. Každé měření bylo opakováno desetkrát, aby byla potvrzena správnost měření, přičemž výsledky vyšly vždy podobně. Grafické výstupy měření pro jednotlivé vzorky jsou součástí přílohy III. Světle modré křivky vždy představují „otisk zvuku“ poklepu na konkrétní zkušební desku s/bez vody. Žlutá křivka není pro výsledky měření relevantní, představuje křivku intenzity zvuku v okamžiku ukládání grafu.

Pohled do grafů v příloze III potvrzuje závěry, které byly vyvozeny při vyhodnocení poklepu prostým poslechem. Nejvýraznější změnu křivky lze pozorovat u vzorku č. 3, kdy došlo k posunu frekvenčního spektra s nejvyšší intenzitou. Z grafu lze vyčíst, že po injektáži vody došlo k poměrně výraznému snížení intenzity u frekvenčního spektra v oblasti kolem 3 kHz za současného zvýšení intenzity v rozmezí 1-1,5 kHz. To lze interpretovat jako změnu vydávaného zvuku. U zkušební vzorku č. 1 lze spatřit mírný pokles intenzity v oblasti 1-2 kHz za současného mírného zvýšení intenzity zvuku v oblasti 0,6-1 kHz. U vzorku č. 2 k výraznějšímu posunu frekvenčního spektra s nejvyšší intenzitou nedošlo.

### 11.2.3 Analýza zvuku poklepu pomocí spektrogramu v softwaru Spectrum View

Cílem využití softwarové aplikace Spectrum View bylo potvrdit neměnnost vydávaného zvuku při opakovaném poklepu na zkušební desku, což by znamenalo, že frekvenční spektrum zvuku při poklepu je vždy stejné a nemění se. Cílem této metody je pomocí spektrogramu graficky dokázat, že při měření nezáleží na jednom konkrétním úhodu, ale výsledky vychází vždy stejně. Spektrogram je graf, kdy na ose y jsou hodnoty frekvenčního spektra zvuku v Hz, na ose x je čas v sekundách, přičemž relativní intenzita zvuku pro jednotlivé hodnoty frekvenčního spektra v daném čase je vyjádřena pomocí barevné škály, kdy každá barva představuje jinou intenzitu zvuku v jednotkách dBFS (decibels relative to full scale).

Každé měření probíhalo po dobu 60 sekund s přibližnou frekvencí 2 údery za sekundu. Zkouška byla provedena nejprve na vzorcích bez vody a poté na vzorcích s vodou. Grafické výstupy měření pro jednotlivé vzorky jsou součástí přílohy IV.

Nejvýraznější změny na pořízených spektrogramech lze opět pozorovat u vzorku č. 3, kdy po injektáži vody došlo k poměrně výraznému snížení intenzity u frekvenčního spektra v oblasti kolem 3 kHz za současného zvýšení intenzity v rozmezí 1-1,5 kHz. To opět potvrzuje tvrzení o změně vydávaného zvuku po injektáži vody. U zkušební vzorku č. 1 lze spatřit mírný pokles intenzity v oblasti 1-2 kHz za současného mírného zvýšení intenzity zvuku v oblasti 0,6-1 kHz. U vzorku č. 2 k výraznějším změnám grafu po injektáži vody do buněk voštinového jádra nedošlo. Výsledky této metody v podstatě korespondují s formulovanými závěry z již dříve provedených metod poklepu.

### 11.3 Zhodnocení experimentu

U zkušební vzorku č. 3 bylo možné pozorovat změnu vydávaného zvuku při poklepu na desku bez vody a s vodou, což bylo potvrzeno všemi třemi metodami. Zvuk poklepu na vzorek obsahující vodu byl mírně hlubší a tlumenější. U vzorku č. 1 nebyla změna příliš výrazná, metodou prostého poslechu nebylo možné rozdíl identifikovat, i když počítačový software drobné změny intenzity u rozdílných frekvencí zaznamenal. U vzorku č. 2 se nepodařilo identifikovat téměř žádnou změnu zvuku, a to ani s využitím počítačového softwaru. Z výše uvedených důvodů považuji detekci vody v jádru VSP metodou poklepu za spornou a neprůkaznou, a proto bych ji pro další použití nedoporučil. Kromě nejednoznačných výsledků má tato metoda ještě další nevýhody:

- subjektivita hodnotící osoby
- nepraktické podmínky pro provádění zkoušky (nutnost eliminovat veškerý hluk)
- nutnost testování panelů kontaktním způsobem
- odlišnost vydávaného zvuku při poklepu může být způsobena jinými příčinami, např. jinými vadami VSP nebo jejich specifickým designem
- zvuk poklepu je velmi nepříjemný; již po několika minutách klepání způsobuje tepání a hučení v uších a následnou bolest hlavy, přičemž nelze kvůli povaze metody používat prostředky pro ochranu sluchu.

## ZÁVĚR

Pro provedení experimentálních zkoušek bylo nutné nejprve vyrobit zkušební desky VSP. Bylo rozhodnuto o výrobě 3 ks zkušebních desek podle normy ČSN EN 2374, přičemž každá deska měla jinou skladbu použitých materiálů. Výroba probíhala v laboratořích Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati metodou lisování za tepla a tlaku na laboratorním vulkanizačním lisu, který je zde k dispozici. Akumulace vody uvnitř buněk voštinového jádra byla simulována navrtáním potahu VSP malou ruční vrtáčkou s vrtákem o průměru 0,8 mm a následnou injektáží vody do buněk pomocí injekční stříkačky.

Při experimentu s využitím pasivní IR termografie byla nejprve stanovena emisivita potahů zkušebních vzorků a poté byly vzorky obsahující vodu umístěny přes noc do mrazícího boxu. Cílem bylo simulovat proces, ke kterému dochází u VSP používaných v leteckém průmyslu, kdy při letu v běžné letové výšce je teplota vzduchu až  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a dochází ke zmrznutí vody uvnitř buněk voštinového jádra. Po přistání naopak dochází k postupnému vyrovnávání teploty VSP s okolím, což bylo simulováno vytažením vzorků z mrazícího boxu a ponecháním v pokojové teplotě  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Každý vzorek byl po vytažení z mrazícího boxu volně položen na stůl v laboratoři a byl postupně snímkován IR kamerou Fluke TiS45 upevněnou na stativu.

Na všech pořízených termogramech bylo možné jasně a zřetelně identifikovat místa obsahující vodu v buňkách jádra pod povrchem zkušebních desek VSP. Tvar zachycených obrazců přesně kopíroval buňky obsahující vodu, čímž byl splněn cíl daného experimentu. Proto bylo konstatováno, že IR termografie je vhodná NDT metoda pro detekci vody uvnitř jádra VSP. Výhodou použití metody je spolehlivost, přesnost, bezkontaktnost a velmi dobrá citlivost IR kamery při měření. Nevýhodou je pak možnost měření po omezenou dobu, nutnost specifických podmínek pro úspěšné měření a vysoká pořizovací cena IR kamer.

Druhou experimentální metodou byla zkouška poklepem. Před provedením experimentu bylo rozhodnuto o zvětšení pole obsahujícího vodu v buňkách voštinového jádra pro lepší identifikaci vadných míst. Poklep byl prováděn dle doporučeného postupu v teoretické části pomocí malého kladívka. Zkouška probíhala v uzavřené místnosti, kde byly předem odstraněny veškeré slyšitelné zdroje hluku, které by mohly výsledky zkoušky zkreslit. Zkouška byla hodnocena metodou prostého poslechu, avšak pro potvrzení validity výsledků byl

zvuk poklepu rovněž nahráván na tablet iPad a poté byl vyhodnocen pomocí softwarových aplikací pro analýzu zvuku.

U zkušebního vzorku č. 3 bylo možné slyšet změnu vydávaného zvuku při poklepu na desku bez vody a s vodou, což bylo potvrzeno i počítačovým softwarem. Zvuk poklepu na vzorek obsahující vodu byl mírně hlubší a tlumenější. U vzorku č. 1 nebyla změna příliš výrazná, metodou prostého poslechu nebylo možné rozdíl identifikovat, i když počítačový software drobné změny intenzity u rozdílných frekvencí zaznamenal. U vzorku č. 2 se nepodařilo identifikovat téměř žádnou změnu zvuku, a to ani s využitím počítačového softwaru.

Z důvodu spornosti a nejednoznačnosti výsledků experimentu byla vhodnost zkoušky poklepem pro detekci vody v jádru VSP zamítnuta a pro další testování ji nedoporučuji. Kromě nejednoznačných výsledků má tato metoda ještě další nevýhody - subjektivitu hodnotící osoby, nepraktické podmínky pro provádění zkoušky, kontaktnost metody, možnost záměny příčiny vady za jinou a nemožnost používat při zkoušce prostředky pro ochranu sluchu, což má za následek poškozování sluchu. Delší poslech zvuku poklepu způsobuje nepříjemné hučení a tepání v uších a následnou bolest hlavy.

Pro úspěšnou detekci akumulované vody v jádru VSP doporučuji použít metodu infračervené termografie.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 294 s.
- [2] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. Vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 328 s.
- [3] BATCHU, Surya. *Solid metal versus sandwich panels*. [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.stressebook.com/solid-metal-versus-sandwich-panels/>
- [4] BAYER, Robert. *Úvod do principů termografie* [online]. [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=65646](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65646)
- [5] BITZER, Tom. *Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing*. London: Chapman & Hall, 1987, 233 s. ISBN 0-412-54050-9.
- [6] BROWN, George, 2014. *The Use of Composites in Aircraft Construction* [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://vandaair.com/2014/04/14/the-use-of-composites-in-aircraft-construction/>
- [7] CADEX, 2010. *Woodpecker WP632AM* [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://wp632.cadex.co.jp/products/wp632am.htm>
- [8] CEJP, Jiří et al. *Perspektivní materiály*. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 2001, 135 s. ISBN 8001023419.
- [9] COREX HONEYCOMB, 2018. *Aluminium Honeycomb 3/16" (4.8) cell size, 5052 alloy, 1250 x 2500 mm*. [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://corex-honeycomb.co.uk/product/aluminium-honeycomb-3-16-3-4-8mm-cell-size-5052-alloy-1250-x-2500mm/>
- [10] ČAPKA, Alexander et al. *Detecting Water in Composite Sandwich Panels by Using Infrared Thermography*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2016, 6 s.
- [11] ČAPKA, Alexander. *Metallography 2016 – Detekce vody v kompozitních sendvičových panelech (Prezentace)*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2016.



- [12] ČAPKA, Alexander et al. *Využití tepelně-fyzikálních vlastností v NDT kompozitních materiálů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2017, 10 s.
- [13] ČSN EN 2374. *Letectví a kosmonautika. Skelné lamináty a sendviče. Výroba zkušebních desek*. Praha: Český normalizační institut, 1995, 16 s.
- [14] ČVUT v Praze, 2014. *Tepelné vlastnosti* [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://ceg.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-pro-studenty/definice-parametru/tepelne-vlastnosti>
- [15] DAVIES, J. M. *Lightweight sandwich construction*. Cornwall: Blackwell Science Ltd, 2001, 383 s. ISBN 0-632-04027-0.
- [16] DIAB GROUP, 2018. *Sandwich technology* [online]. DIAB Group. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://www.diabgroup.com/en-GB/Knowledge/Sandwich-technology>
- [17] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [18] FAC TECHNOLOGY, 2018. *What is sandwich structure?* [online]. FAC Technology. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: <http://www.factechnology.com/#Comp>
- [19] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2012. *Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe* [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/)
- [20] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2018. *Aviation Maintenance Technician Handbook - General* [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/media/amt\\_general\\_handbook.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/media/amt_general_handbook.pdf)
- [21] FIBRE GLAST, 2018. *What are prepregs?* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: [https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center)
- [22] FLUKE, 2018. *Software pro termokamery Fluke* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/fluke/czcs/support/software/ti-fc-software-update#flukeConnect>

- [23] FLUKE, 2018. *Termokamera Fluke TiS45* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamera/fluke-tis45.htm?pid=79862>
- [24] FS ČVUT v Praze. *Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba*. [online], 2007. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: [http://www.kompozity.info/seminar/2\\_seminar/1\\_materialy\\_technologie.pdf](http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_technologie.pdf)
- [25] GAY, Daniel. *Composite Materials: Design and Applications*. Florida: CRC Press LLC, 2003, 524 s. ISBN 1-58716-084-6.
- [26] GREEN, Eric. *Marine Composites – Failure Modes* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: [http://www.ericgreeneassociates.com/images/Failure\\_Modes.pdf](http://www.ericgreeneassociates.com/images/Failure_Modes.pdf)
- [27] GUCHENG, 2018. *Fiberglass cloth* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.fiberglassmesh.us/fiberglass/fiberglass-mesh-base-cloth.html>
- [28] HESLEHURST, Rik. *Composite sandwich structure design requirements – Part 6 - Failure Modes and Analysis* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: [https://www.compositesaustralia.com.au/wp-content/uploads/2013/06/CACON-MAG\\_4116\\_HIRES-16.pdf](https://www.compositesaustralia.com.au/wp-content/uploads/2013/06/CACON-MAG_4116_HIRES-16.pdf)
- [29] HEXCELL COMPOSITES. *Sandwich panel fabrication technology*. Duxford: Hexcell Composites, 2001, 16 s.
- [30] IBARRA-CASTANEDO, Clemente et al. *Water ingress detection in honeycomb sandwich panels by passive infrared thermography using a high resolution thermal imaging camera*. Quebec: Université Laval, 2012, 8 s.
- [31] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [32] MEDICÍNSKÉ NÁSTROJE, 2018. *Laboratorní kladívko nerezové 170 mm* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://medicinske-nastroje.cz/laboratorni-kladivo/648-laboratorni-kladivko-nerezove-170-mm.html>
- [33] MORI, L. F. et al. *Deformation and Failure Modes of Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loads*. Harvard: Harvard University, 2007, 26 s. [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.seas.harvard.edu/hutchinson/papers/sandwichstructures.pdf>

- [34] MORI, L. F. et al. *Deformation and Failure Modes of I-Core Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loads*. Evanston: Northwestern University, 2008, 29 s. [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/a154/ad8013769bd68f85e3d42e0ac23cc8ef2032.pdf>
- [35] REICHL, Jaroslav. *Záření absolutně černého tělesa* [online]. [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/719-zareni-absolutne-cerneho-telesa>
- [36] TECH MAGAZÍN. Praha: Tech Media Publishing, 2011, č. 8. ISSN 1804-5413.
- [37] TESTO, 2015. *Průvodce termografií* [online]. [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <http://termokamera.com/prirucka-termografie/>
- [38] TUTTLE, M. E. *Moisture Diffusion in Honeycomb Core Sandwich Composites*. Washington: University of Washington, 13 s.
- [39] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008, 94 s.
- [40] WAHL, Laurent. *Fatigue in the Core of Aluminium Honeycomb Panels: Lifetime Prediction compared to Fatigue Tests*. Luxembourg: University of Luxembourg, 2013, 22 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	význam	jednotka
AE	akustická emise	
E-sklo	sklo s vysokou pevností	
FOV	field of view, zorné pole	
GB	gigabyte	
IFOV	identifiable field of view, rozlišitelné zorné pole	
IR	infrared, infračervený	
KM	kompozitní materiál	
Mpx	megapixel	
NDT	non-destructive testing, nedestruktivní testování	
PDF	portable dokument format, typ datového formátu	
S-sklo	sklo s vysokou tuhostí	
VSP	voštinový sendvičový panel	
$a$	součinitel teplotní vodivosti	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$c$	rychlost šíření světla ve vakuu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$c_p$	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$f$	frekvence	$[\text{s}^{-1}]$
$\varepsilon$	emisivita	[-]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti nebo vlnová délka	$[\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{K}^{-1}]$ nebo [m]
$\rho$	hustota nebo reflexe	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ nebo [-]
$\tau$	transmise	[-]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 - Akumulace vody uvnitř jádra VSP [11].....	12
Obrázek 2 - Letadla jsou vystavována extrémním teplotám v rozsahu -55°C až + 55°C [11].....	13
Obrázek 3 - Odlepení potahu od jádra VSP [11].....	13
Obrázek 4 - Princip zkoušky VSP na difuzi vlhkosti ze vzdušné vlhkosti [38].....	14
Obrázek 5 - Schéma klasifikace kompozitních materiálů.....	18
Obrázek 6 - Orientace vláken: a) dvousměrně orientovaná vlákna – tkanina; b) jednosměrně orientovaná vlákna [19].....	19
Obrázek 7 - Tkanina vyrobená ze skleněného vlákna [27].....	19
Obrázek 8 - Střídání orientace vrstev tkanin při kladení [19].....	19
Obrázek 9 - Prepreg s výztuží z uhlíkových vláken [21].....	20
Obrázek 10 - Složení sendvičového panelu [40].....	22
Obrázek 11 - Analogie sendvičového panelu a I-nosníku [18].....	23
Obrázek 12 - Srovnání mechanických vlastností stejného výchozího materiálu bez a s použitím jádra [3].....	23
Obrázek 13 - Voštinové jádro z hliníkové slitiny 5052 [9].....	25
Obrázek 14 - Příklady tvarů buněk voštinových jader [5].....	25
Obrázek 15 - Podíl jednotlivých materiálů použitých při stavbě dopravního letadla [6].....	27
Obrázek 16 - Vady potahů VSP (laminátů) [12].....	29
Obrázek 17 - Mikroskopické zachycení lomu vrstvy vláken [26].....	30
Obrázek 18 - Mikroskopické foto dutin uvnitř výztužných vrstev KM [26].....	30
Obrázek 19 - Makro vady potahů VSP [26].....	31
Obrázek 20 - Fotografie trhlin a prasklin [26].....	32
Obrázek 21 - Typy poškození VSP kolizí s cizím předmětem [26].....	33
Obrázek 22 - Proražení potahu s delaminací (vlevo); proražení potahu s lomem po stranách dopadajícího tělesa (vpravo) [26].....	33
Obrázek 23 - Proražení potahu s lokálním stlačením jádra (vlevo) a proražení potahu s ohybem po stranách dopadajícího tělesa (vpravo) [26].....	34
Obrázek 24 - Typy poškození VSP v důsledku mechanického namáhání [26].....	34

Obrázek 25 - Reálné fotografie poškození VSP v důsledku mechanického namáhání [28] .....	35
Obrázek 26 - Deformace jádra VSP po nadměrném plošném zatížení [33] .....	36
Obrázek 27 - Druhy poškození VSP v důsledku ztráty adheze nebo koheze [26] .....	36
Obrázek 28 - Ztráta adheze VSP - jádro po odlepení (vlevo) a potah stejného dílu se zbytky adhezivní vrstvy (vpravo) [26] .....	37
Obrázek 29 - Kombinace ztráty adheze a koheze v rámci jednoho dílu z VSP – jádro (vlevo) a potah (vpravo) [26] .....	37
Obrázek 30 - Ztráta koheze VSP v kombinaci s roztržením jádra [26] .....	38
Obrázek 31 - Typy poškození VSP v místě spojů [26] .....	38
Obrázek 32 - Poškození VSP roztržením v blízkosti spojovacího prvku [33] .....	39
Obrázek 33 - Popraskání gelcoatu VSP [26] .....	39
Obrázek 34 - Poškození gelcoatu sendvičové konstrukce letadla erozí [19] .....	40
Obrázek 35 - Poškození VSP v blízkosti vodivých spojů po úderu bleskem [26] .....	40
Obrázek 36 - Mikroskopický pohled na poškození VSP po úderu bleskem [26] .....	40
Obrázek 37 - Spektrum elektromagnetických vln dle vlnové délky [35] .....	46
Obrázek 38 - Popis ruční IR kamery od firmy Fluke [4] .....	49
Obrázek 39 - Znázornění charakteristik IR kamery – FOV, IFOVgeo, IFOVměř [37] .....	50
Obrázek 40 - Termogram zachycující zmrazenou vodu uvnitř jádra VSP [10] .....	51
Obrázek 41 - Doporučený úchop a poloha testovacího kladívka při zkoušce poklepem [20] .....	52
Obrázek 42 - Laboratorní kladívko vhodné pro zkoušku poklepem [32] .....	53
Obrázek 43 - Digitální zařízení Mitsui Woodpecker (WP-632AM) [7] .....	54
Obrázek 44 - Laboratorní vulkanizační lis .....	56
Obrázek 45 – Zkušební vzorek č. 1 .....	57
Obrázek 46 – Zkušební vzorek č. 2 .....	57
Obrázek 47 – Zkušební vzorek č. 3 .....	58
Obrázek 48 – Malá vrtačka IPI pro navrtávání potahu VSP .....	59
Obrázek 49 – Vrtání dírek do potahu zkušební vzorku č. 2 .....	59
Obrázek 50 – Injektáž vody do zkušební vzorku č. 2 .....	60
Obrázek 51 – Vzorek č. 1 obsahující vodu v buňkách ve tvaru kříže .....	60
Obrázek 52 – Teploměr Fluke 561 HVAC Pro .....	61
Obrázek 53 - Termokamera Fluke TiS45 [23] .....	61

---

Obrázek 54 – Termogram zkušební vzorku č. 1 .....	63
Obrázek 55 – Termogram zkušební vzorku č. 2 .....	64
Obrázek 56 – Termogram zkušební vzorku č. 3 .....	64
Obrázek 57 – Kladívko použité pro zkoušku poklepem.....	66

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 - Parametry, které lze zjistit jednotlivými kategoriemi metod NDT [31].....	43
Tabulka 2 - Přibližné hodnoty emisivity vybraných materiálů [4] .....	47
Tabulka 3 – Hodnoty emisivity pro jednotlivé zkušební vzorky .....	62



## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I: Přehled technických parametrů teploměru Fluke 561 HVAC Pro
- Příloha II: Přehled technických parametrů termokamery Fluke TiS45
- Příloha III: Grafické výsledky měření zvuku poklepu v softwarové aplikaci Spectrum
- Příloha IV: Grafické výsledky měření zvuku poklepu v softwarové aplikaci Spectrum View

# PŘÍLOHA I: PŘEHLED TECHNICKÝCH PARAMETRŮ TEPLOMĚRU FLUKE 561 HVAC PRO



Obecné specifikace	
Teplotní rozsah	-40 °C až 550 °C (-40 °F až 1 022 °F)
Rozlišení displeje	0,1 °C (0,1 °F) z hodnoty
D: S (poměr vzdálenost : průměr místa měření)	12:1
Jednoduchý volič emisivity	Tři úrovně nastavení: Nízká (0,3), Střední (0,7), Vysoká (0,95)
Přesnost displeje [Předpokládaná okolní provozní teplota - 23 °C (73 °F) až 25 °C (77 °F)]	±1,0 % z hodnoty ±1 % z hodnoty nebo ±1 °C (±2 °F), platí vyšší hodnota, pod 0 °C/32 °F, ±1 °C (±2 °F) ± 0,1°/1°
Doba odezvy	500 ms (95 % záznamu)
Opakovatelnost	± 0,5 % z hodnoty nebo ± 1 °C (±2 °F), platí vyšší hodnota
Spektrální odezva	8 μm až 14 μm
Laserové zaměrování	Jednobodový laser
Vypnutí laseru	Laser se vypne při okolní teplotě nad 40 °C (104 °F)
Výkon laseru	Provoz třídy 2(II); výkon <1 mW, vlnová délka 630 - 670 nm
Relativní vlhkost	10 % až 90 % RH nekondenzující, při <30 °C (86 °F)
Napájení, životnost baterií	2 baterie AA (alkalické nebo NiCD)
Životnost baterií	12 hodin
Přidržení hodnoty na displeji	7 sekund
Podsvětlený displej	Ano, displej LCD s dvojitými teplotami (aktuální a MAX/MIN/DIF/Kontaktní), indikátorem stavu baterie (vybití/plné nabití) a možnostmi skenování/přidržení
Záruka	2 roky
Provozní teplota	0 °C až 50 °C (32 °F až 120 °F)
Teplota pro skladování	-20 °C až 65 °C (-25 °F až 150 °F)
Teploty MAX, MIN, DIF	Ano
Termočlánek typu K s miniadaptérovým vstupem	Ano, kompatibilní se standardními průmyslovými sondami typu K s minikonektorem.
Termočlánek typu K ve formě potrubní sondy na suchý zip	Ano, s teplotním rozsahem 0 °C až 100 °C (32 °F až 212 °F) a přesností ±2,2 °C (±4 °F)
Průvodce měřením HVAC (topení, ventilace a chlazení)	Ano

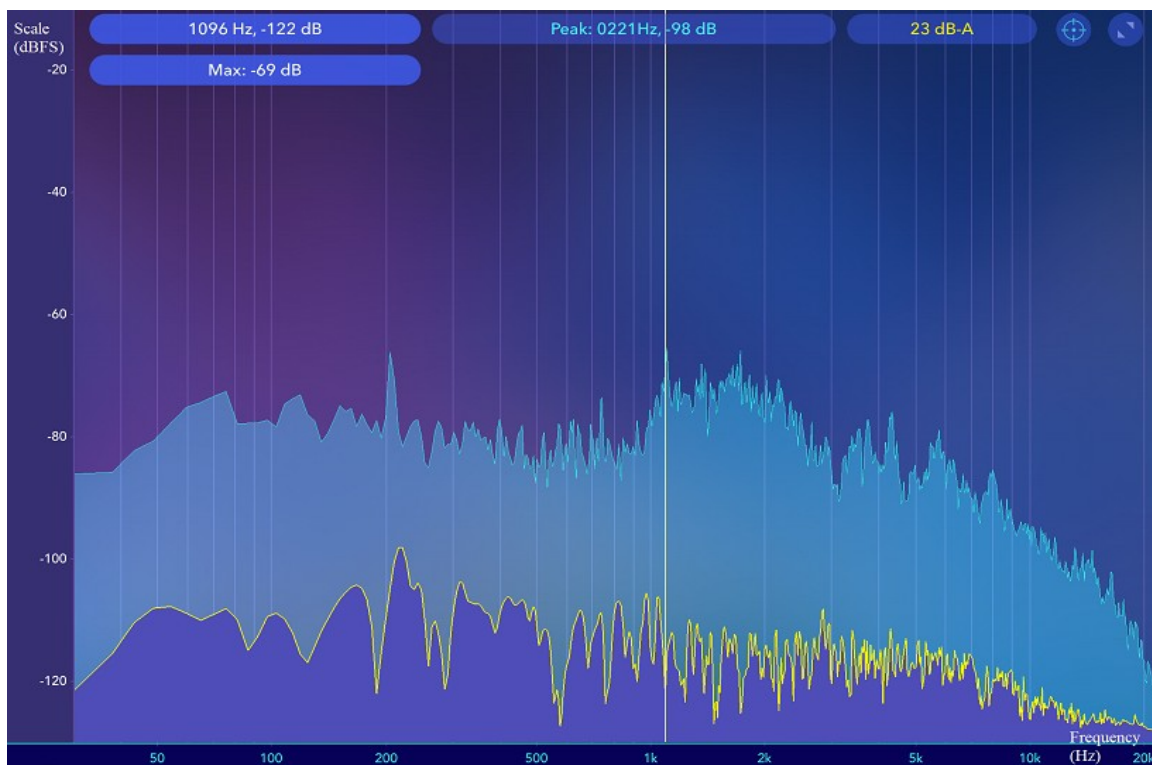
## PŘÍLOHA II: PŘEHLED TECHNICKÝCH PARAMETRŮ TERMOKAMERY FLUKE TIS45



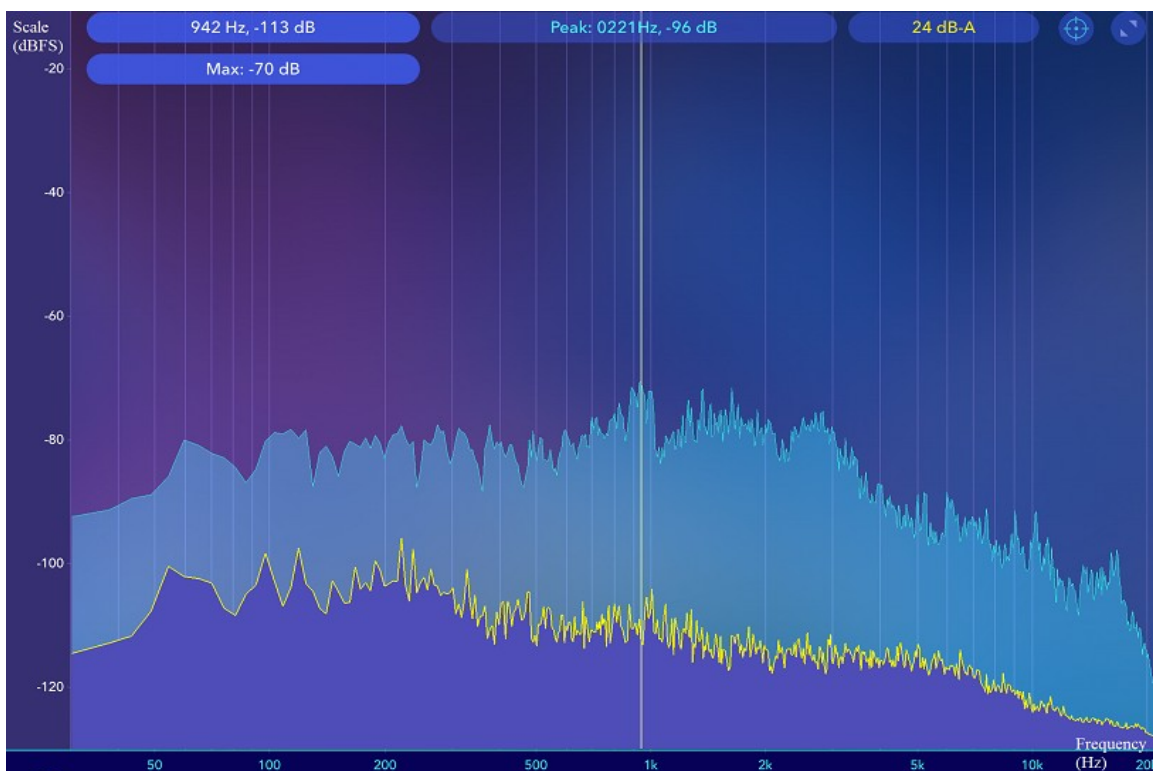
<b>Hlavní vlastnosti</b>	
Prostorové rozlišení (IFOV)	3,9 mRad
Rozlišení snímače	160 × 120
Zorné pole	35,7° × 26,8°
Vzdálenost od místa měření	257:1
Bezdrátové připojení	Ano
Kompatibilní s aplikací Fluke Connect®	Ano (je-li k dispozici)
<b>Technologie IR-Fusion®</b>	
Režim AutoBlend™	5 přednastavení (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %)
Obraz v obraze (PIP)	5 přednastavení (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %)
Systém ostření	Ruční ostření, minimální vzdálenost ostření, 0,15 m (6")
Odolný displej	Displej LCD 3,5" 320 × 240 (orientovaný na šířku)
Odolné a ergonomické provedení pro ovládání jednou rukou	Ano
Teplotní citlivost (NETD)	≤0,09 °C při cílové teplotě 30 °C (90 mK)
Rozsah měření teploty (není kalibrováno pod -10 °C)	-20 °C až +350 °C (-4 °F až 662 °F)
Úroveň a rozpětí	Plynulé automatické a manuální nastavení měřítka
Rychlé automatické přepínání mezi manuálními a automatickými režimy	Ano
Rychlé automatické nastavení rozsahu v manuálním režimu	Ano
Minimální rozpětí (manuální režim)	2,5 °C
Minimální rozpětí (automatický režim)	5 °C
Vestavěný digitální fotoaparát (viditelné světlo)	5 MP
Obnovovací frekvence	9 Hz nebo 30 Hz
Laserové ukazovátko	-
<b>Zachycování snímků a ukládání dat</b>	
Systém rozšíření paměti SD	Interní paměť 4 GB a vyjímatelná paměťová karta microSD 4 GB
Pořizování snímků, kontrola, mechanismus ukládání	Zachycování obrazu jednou rukou, kontrola a možnosti ukládání
Formáty obrazových souborů	Neradiometrické (.bmp) nebo (.jpeg) nebo plně radiometrické (.is2); pro neradiometrické (.bmp a .jpeg) soubory není třeba software pro analýzu
Okamžité odeslání	Okamžitě odešlete pořízené snímky na server Fluke Connect pomocí připojení WiFi
Prohlížení paměti	Prohlížení miniatur
Software	Software SmartView® pro úplnou analýzu a tvorbu protokolů a aplikace Fluke Connect® (je-li dostupná)
Formát souborů exportovaných softwarem SmartView®	BMP, DIB, GIF, JPE, JFIF, JPEG, JPG, PNG, TIF a TIFF

<b>Baterie</b>	
Baterie (vyměnitelné v terénu, dobíjecí)	Jedna lithium-iontová baterie s inteligentním řízením a pětisegmentovým displejem LED zobrazujícím stav nabití
Výdrž baterií	>4 h
Doba nabíjení baterie	2,5 hodiny pro úplné nabití
Nabíjení baterií	Nabíjení v termokameře (volitelná externí nabíječka se prodává samostatně)
Síťový provoz	Síťový provoz prostřednictvím dodaného zdroje napájení (100 V AC (st) až 240 V AC (st), 50/60 Hz)
<b>Měření teploty</b>	
Přesnost	±2 °C nebo 2 % (při jmenovité teplotě 25 °C, platí vyšší hodnota)
Korekce emisivity na displeji	Ano (číselně a pomocí tabulky)
Kompenzace odražené teploty pozadí na displeji	Ano
Korekce přenosu na displeji	Ano
<b>Barevné palety</b>	
Standardní palety	7: Tavené železo, modročervená, vysoký kontrast, žlutá, inverzní žlutá, horký kov, stupně šedi, inverzní stupně šedi
Palety Ultra Contrast™	–
<b>Obecné specifikace</b>	
Barevné alarmy (alarmy teploty)	Vysoká teplota, nízká teplota
Infračervené spektrální pásmo	7,5 μm až 14 μm
Provozní teplota	–10 °C až +50 °C (14 °F až 122 °F)
Teplota pro skladování	–20 °C až +50 °C (–4 °F až 122 °F)
Relativní vlhkost	10 % až 95 %, nekondenzující
Měření teploty středového bodu	–
Bodová teplota	Ano
Uživatelé definovatelné bodové značky	1
Středový rámeček	–
Bezpečnostní standardy	IEC 61010-1: CAT žádná, stupeň znečištění 2, EN 60825-1: třída 2, EN 60529, EN 62133 (lithiová baterie)
Elektromagnetická kompatibilita	EN 61326-1:2006, EN 55011: třída A, EN 61000-4-2, EN 61000-4-3
C Tick	IEC/EN 61326-1
US FCC	EN61326-1; FCC část 5, EN 55011: třída A, EN 61000-4-2, EN 61000-4-3
Vibrace a nárazy	2 g, IEC 68-2-6 a 25 g, IEC 68-2-29
Pád	Zkonstruováno na odolnost při pádu z výšky 2 m
Rozměry (V × Š × D)	26,7 × 10,1 × 14,5 cm (10,5 × 4,0 × 5,7")
Hmotnost (včetně baterie)	Pevné ohnisko 0,72 kg (1,6 lb), ruční ostření 0,77 kg (1,7 lb)
Krytí	IP54 (chráněné proti prachu, omezené krytí; ochrana proti stříkající vodě ze všech směrů)
Záruka	Dva roky (standardně), k dispozici jsou prodloužené záruky
Doporučená doba kalibrace	Dva roky (při předpokládaném normálním provozu a normálním stárnutí)
Podporované jazyky	čeština, nizozemština, angličtina, finština, francouzština, němčina, maďarština, italština, japonština, korejština, polština, portugalština, ruština, zjednodušená čínština, španělština, švédština, tradiční čínština a turečtina

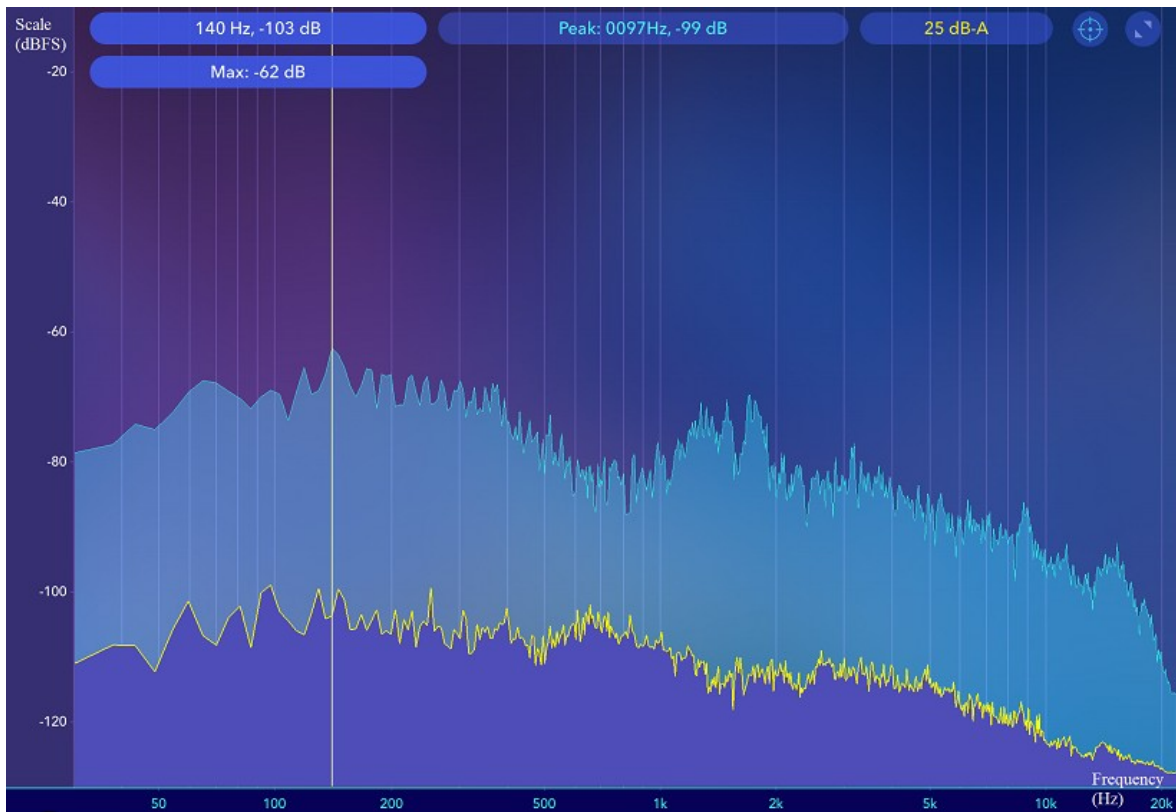
## PŘÍLOHA III: GRAFICKÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZVUKU POKLEPU V SOFTWAREVÉ APLIKACI SPECTRUM



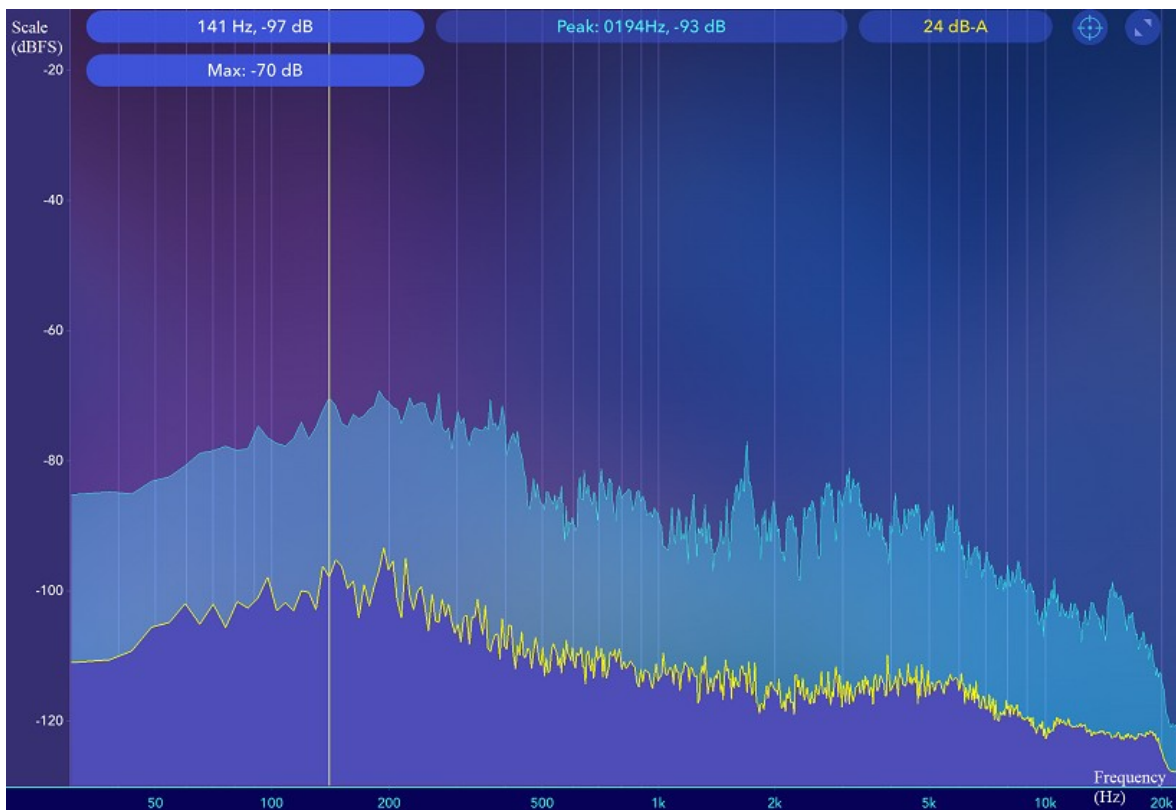
Světle modrá křivka představuje „otisk zvuku“ poklepu na vzorek č. 1 bez vody\*



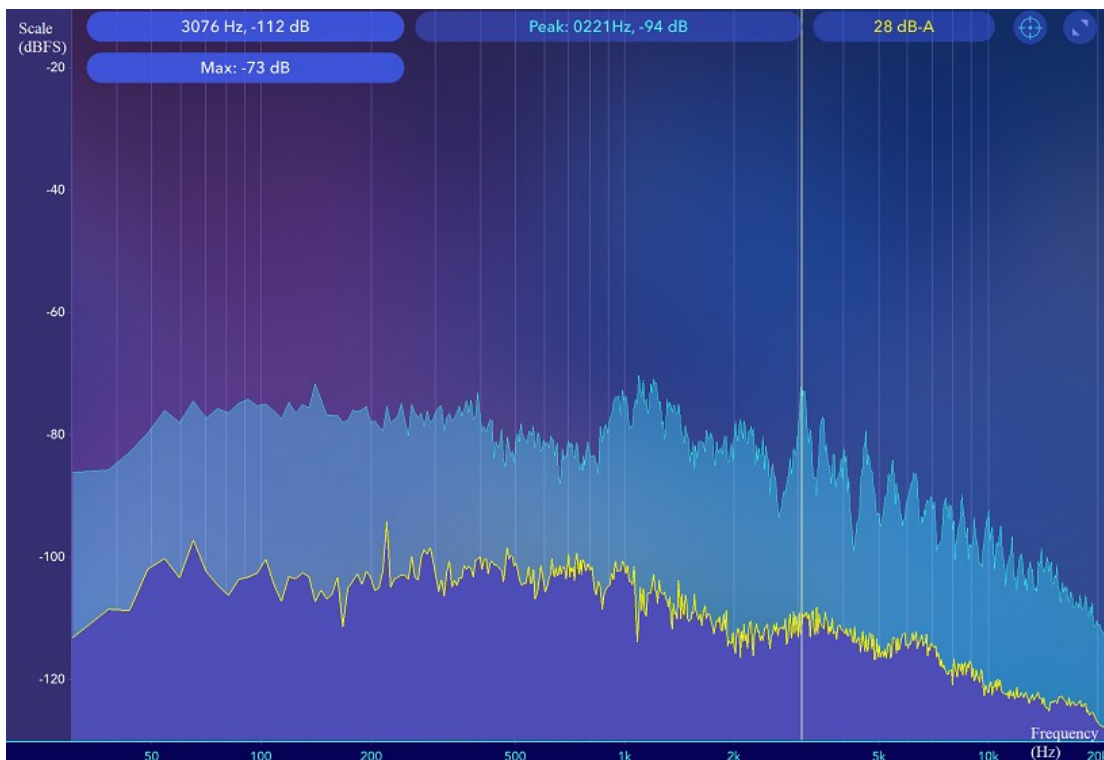
Světle modrá křivka představuje „otisk zvuku“ poklepu na vzorek č. 1 obsahující vodu\*



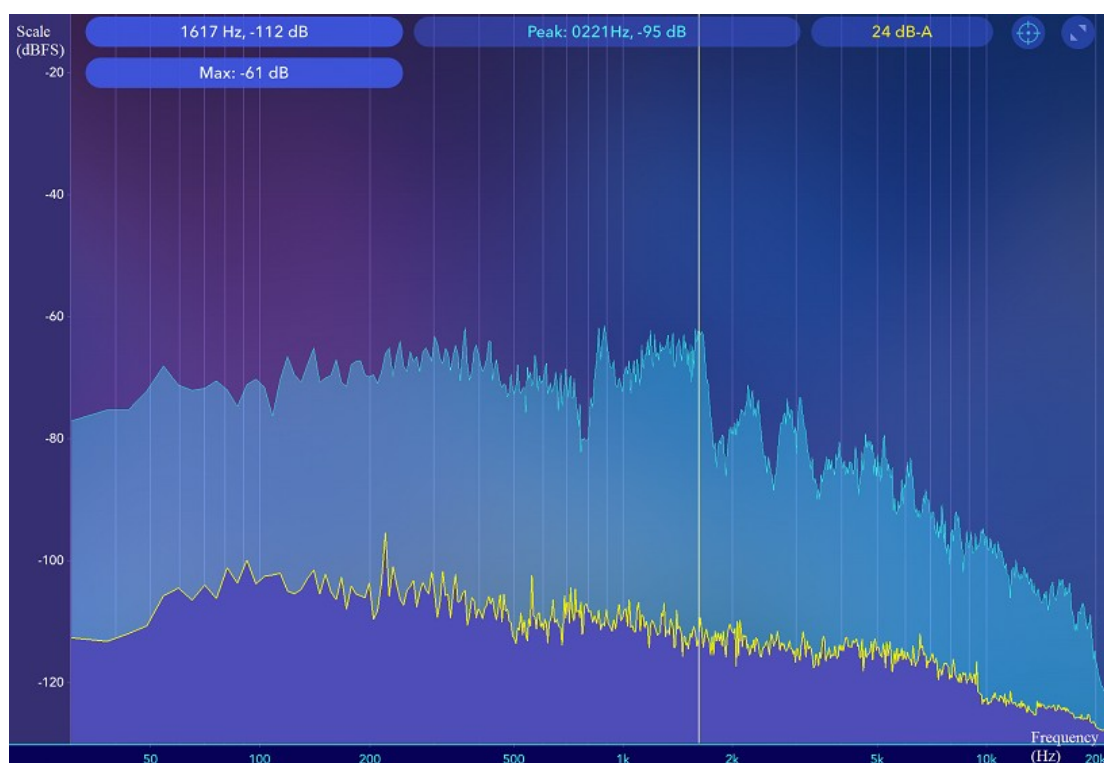
Světle modrá křivka představuje „otisk zvuku“ poklepu na vzorek č. 2 bez vody\*



Světle modrá křivka představuje „otisk zvuku“ poklepu na vzorek č. 2 obsahující vodu\*



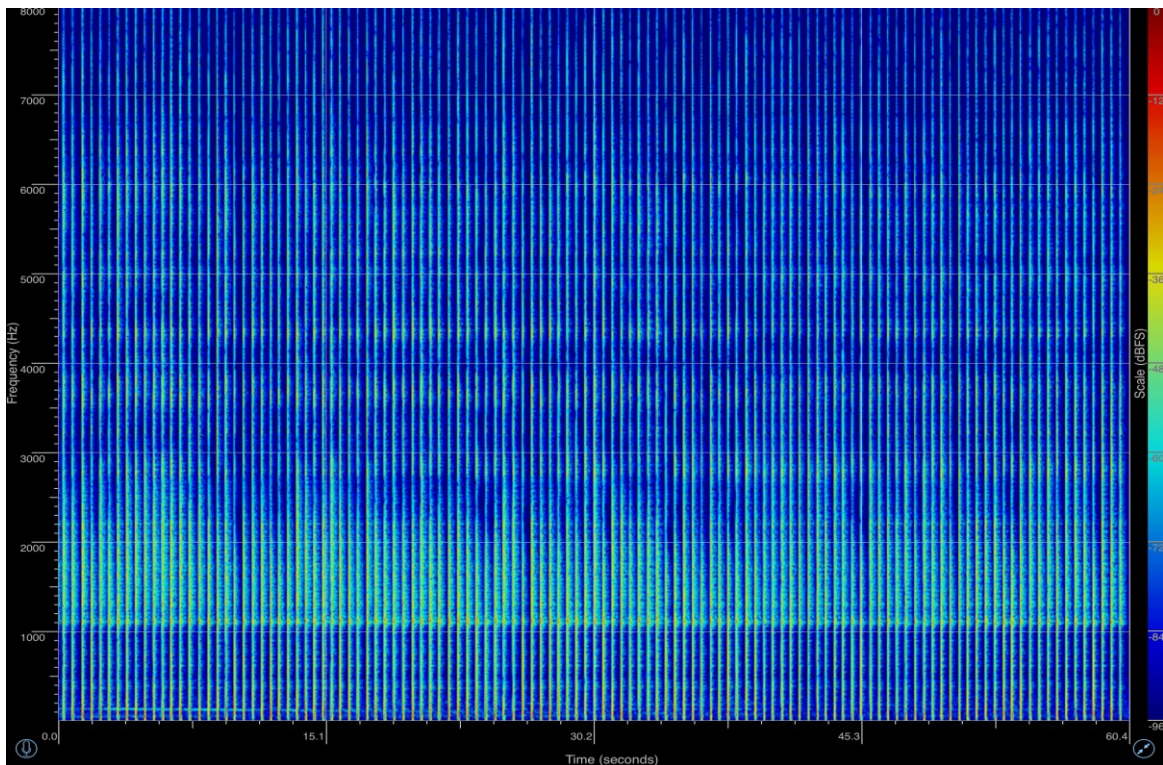
Světle modrá křivka představuje „otisk zvuku“ poklepu na vzorek č. 3 bez vody\*



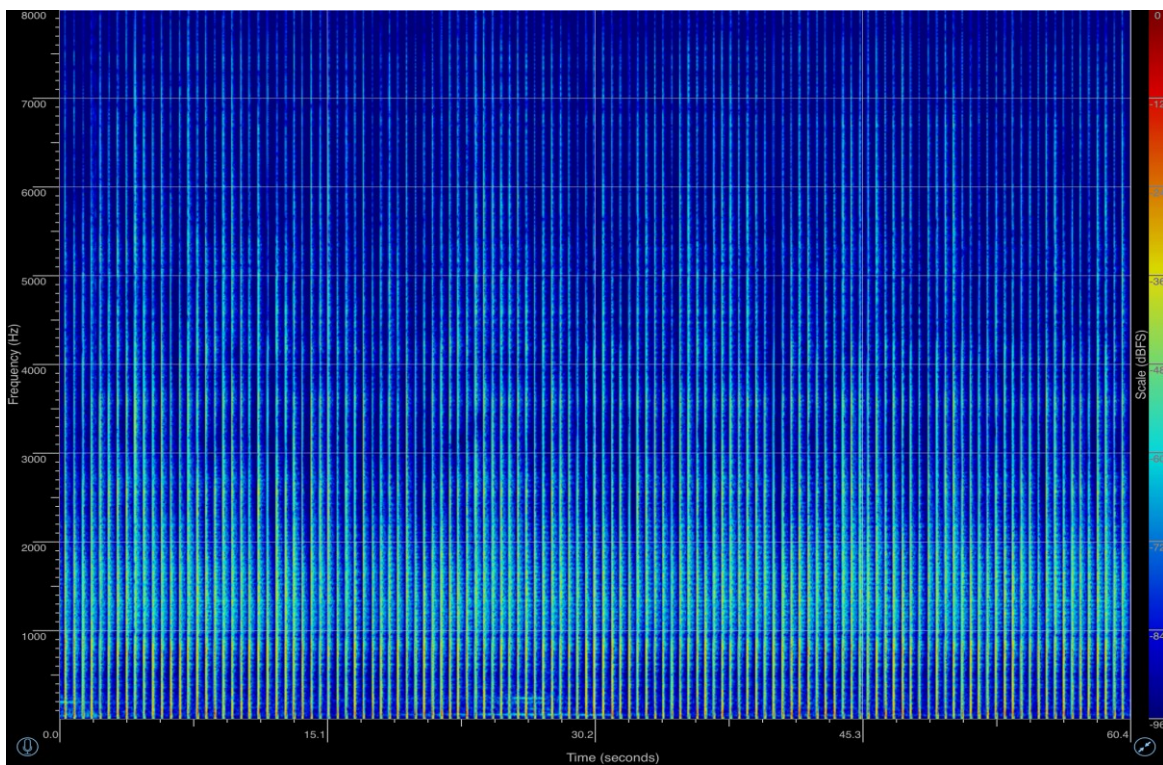
Světle modrá křivka představuje „otisk zvuku“ poklepu na vzorek č. 3 obsahující vodu\*

\*Pozn. Žlutá křivka není pro výsledky měření relevantní, představuje křivku intenzity zvuku v okamžiku ukládání grafu.

## PŘÍLOHA IV: GRAFICKÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZVUKU POKLEPU V SOFTWAREVÉ APLIKACI SPECTRUM VIEW

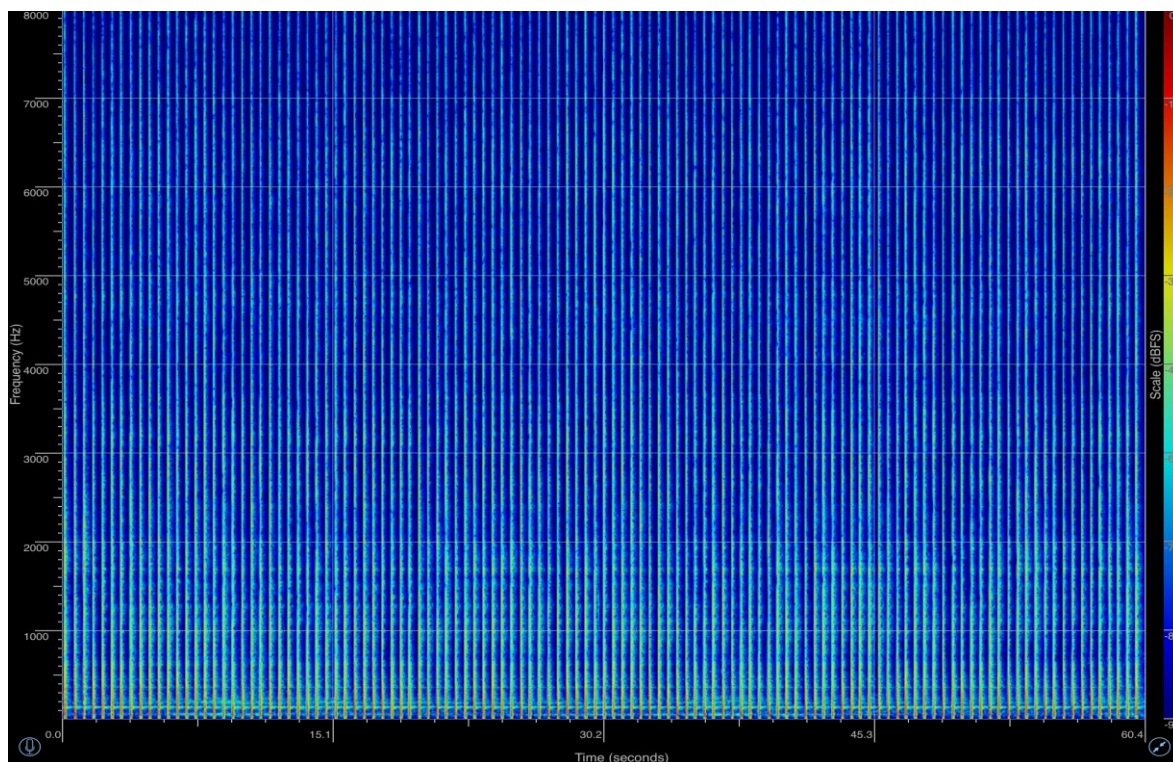


Spektrogram poklepu na vzorek č. 1 bez vody

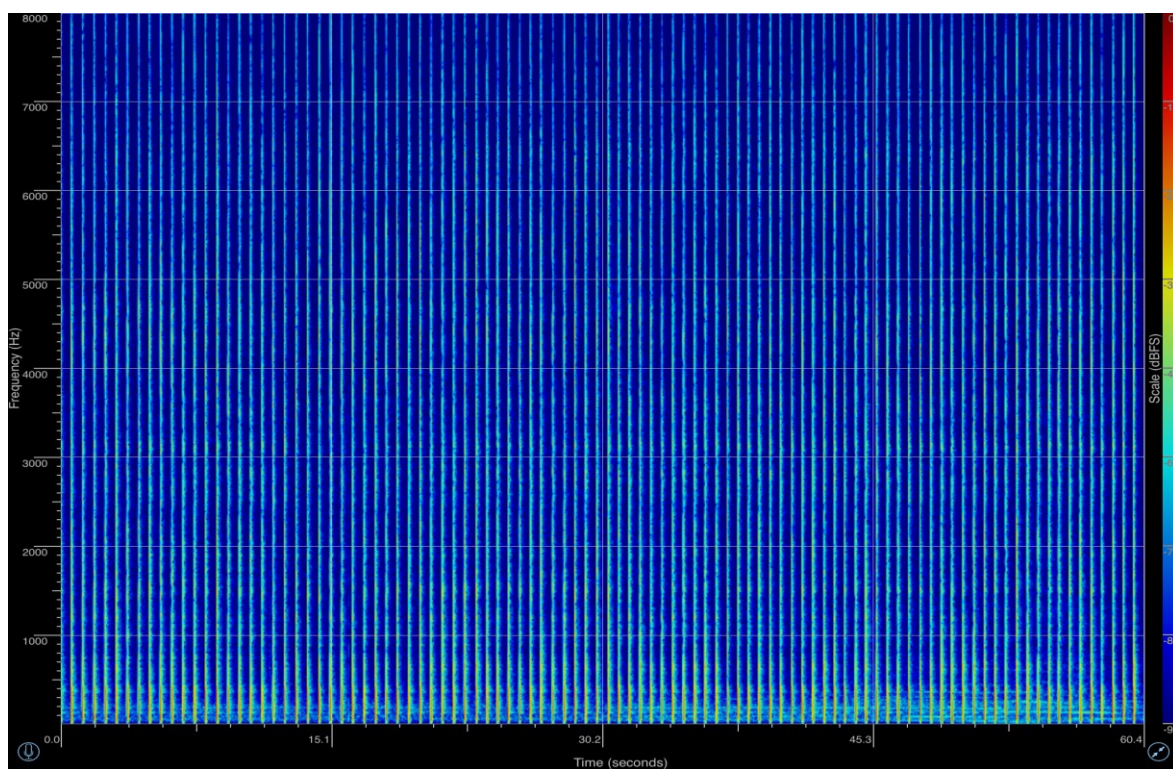


Spektrogram poklepu na vzorek č. 1 obsahující vodu

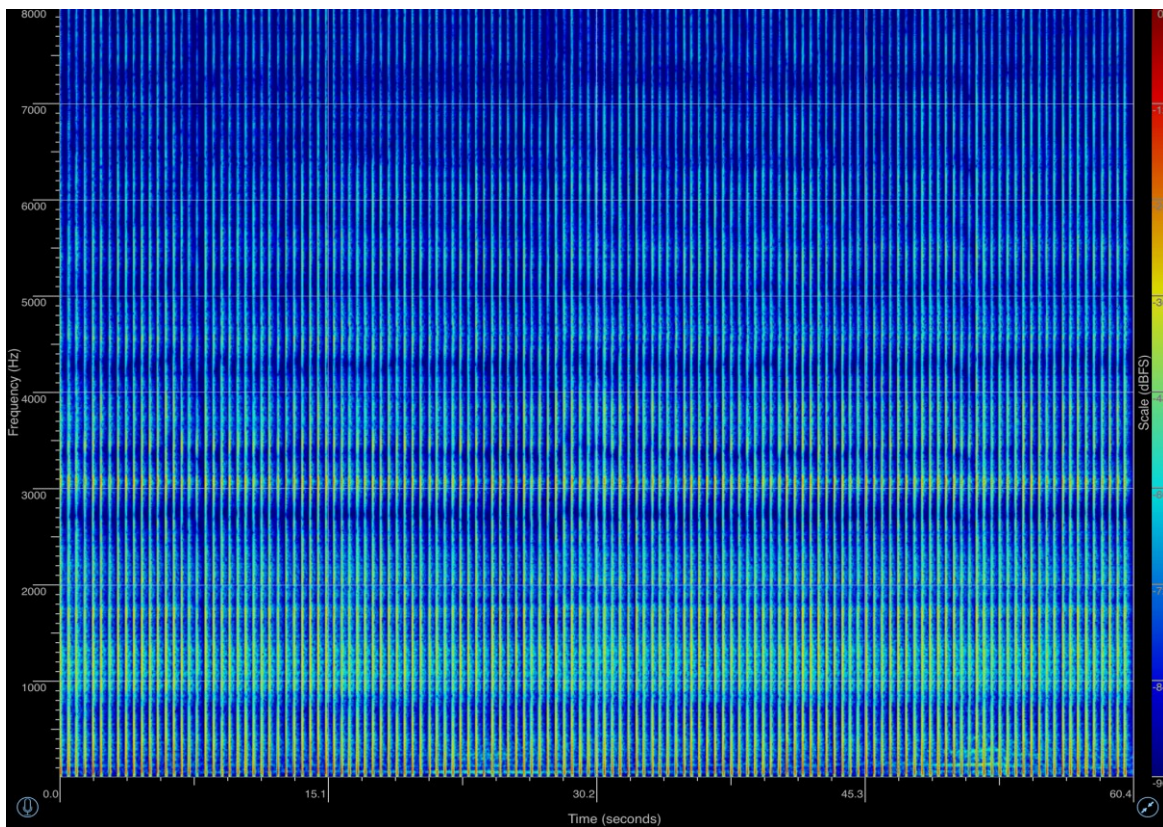




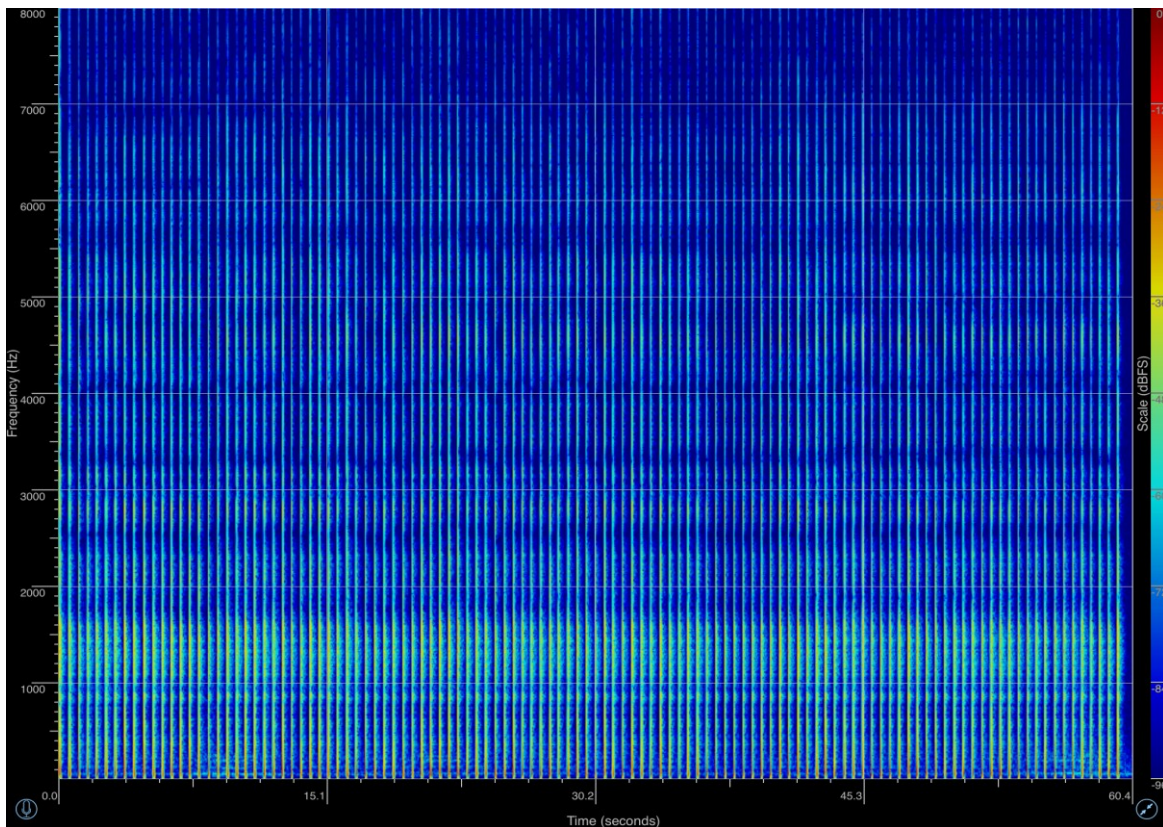
Spektrogram poklepu na vzorek č. 2 bez vody



Spektrogram poklepu na vzorek č. 2 obsahující vodu



Spektrogram poklepu na vzorek č. 3 bez vody



Spektrogram poklepu na vzorek č. 3 obsahující vodu