

Návrh způsobu tmelení kompozitních vad s dotvrzováním pomocí UV záření

Filip Stach

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Filip Stach
Osobní číslo:	T23645
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh způsobu tmelení kompozitních vad s dotvrzováním pomocí UV záření

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálů, rozdělení, výroba a využití v průmyslových aplikacích.
- Popis vad kompozitních materiálů.
- Zrealizujte experimentální výrobu kompozitu při zvolených technologických podmínkách pomocí polymerizačního autoklávu.
- Experimentálně vyhodnoťte kvalitu povrchu, navrhnete způsob tmelení s dotvrzováním pomocí UV záření.
- Závěr a diskuse dosažených výsledků.

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

Seznam doporučené literatury:

Barbero, Ever J., Introduction to composite materials design, Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group an informa business, Boca Raton, 2018.

ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ISBN 978-80-7454-015-8, 2011.

EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. 2009. Polymerní kompozitní materiály. Praha, nakladatelství SCIENTIA v Praze, 351s, ISBN 978-80-86960-29-6, 2009.

Jim Low, Yu Dong: Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications, Edition: 1st, Elsevier, ISBN 978-0128205129, 2021.

Jawaid Mohammad, Thariq Mohamed, Saba Naheed: Aging Mechanisms in Polymer Composite Materials. Elsevier, ISBN 978-0-08-102298-6, 2019.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem 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.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou oprav drobných povrchových vad kompozitních materiálů s využitím vytvrzovacích pryskyřic. Kompozity nacházejí široké uplatnění napříč průmyslovými odvětvími, a to především díky své vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Zároveň však mohou být náchylné k tvorbě defektů, ať už při výrobě, během provozu, nebo vlivem okolního prostředí. Práce se věnuje rozdělení a popisu nejčastějších typů vad, jejich příčinám i důsledkům. Hlavní důraz je kladen na návrh a popis způsobu lokální opravy těchto vad pomocí UV vytvrzovacích pryskyřic, které umožňují rychlé, přesné a efektivní opracování bez nutnosti rozsáhlého technologického zázemí. Součástí práce je rovněž popis základních metod výroby kompozitních materiálů, přehled základních typů pryskyřic, jejich vlastností a metody vytvrzování.

Klíčová slova: kompozity, UV vytvrzovací pryskyřice, oprava vad, výroba kompozitů, povrchové vady, průmyslové aplikace

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the issue of repairing minor surface defects in composite materials using curing resins. Composites are widely used across various industrial sectors, primarily due to their high strength and low weight. However, they can also be prone to the formation of defects, whether during manufacturing, in operation, or as a result of environmental influences. The thesis focuses on the classification and description of the most common types of defects, their causes, and their consequences. The main emphasis is placed on the design and description of a method for the local repair of these defects using UV-curing resins, which enable fast, precise, and efficient repairs without the need for extensive technological equipment. The work also includes an overview of basic composite manufacturing methods, a summary of the main types of resins, their properties, and curing processes.

Keywords: composites, UV-curing resins, defect repair, composite manufacturing, surface defects, industrial applications

Poděkování

Tímto děkuji vedoucí mé bakalářské práce paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, jak při teoretické, tak i při experimentální části. Za její rady, konzultace a připomínky, které mi pomohli při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PROBLEMATIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.1 ÚVOD DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PODLE MATRICE	13
1.2.1 Polymerní kompozity	13
1.2.2 Kovové kompozity	16
1.2.3 Keramické kompozity	17
1.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PODLE TYPU VÝZTUŽE	19
1.3.1 Kompozity vyztužené vlákny	19
1.3.2 Částicové kompozity	20
1.3.3 Vrstvené (laminární) kompozity	21
2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	23
2.1 RUČNÍ LAMINACE	23
2.2 METODA VAKUOVÉHO SÁČKU (VACUUM BAGGING)	26
2.3 RTM (RESIN TRANSFER MOLDING)	28
2.4 VINUTÍ VLÁKEN (FILAMENT WINDING)	30
2.5 AUTOMATICKÉ KLADENÍ PREPREGŮ	32
2.6 PULTRUZE	33
2.7 LISOVÁNÍ (COMPRESSION MOLDING)	34
3 POPIS VAD KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	36
3.1 VADY VZNIKAJÍCÍ PŘI VÝROBĚ	36
3.1.1 Delaminace	36
3.1.2 Pórovitost	37
3.1.3 Nedostatečná impregnace vláken	38
3.1.4 Přebytek nebo nedostatek pryskyřice	39
3.2 VADY VZNIKAJÍCÍ BĚHEM PROVOZU	40
3.2.1 Únava materiálu	40
3.2.2 Mikroskopické praskliny	41
3.2.3 Mechanické poškození (např. nárazy, škrábance)	41
3.2.4 Tepelné poškození (např. termální degradace)	42
3.2.5 Chemická degradace	42
3.3 VADY SPOJENÉ S ENVIRONMENTÁLNÍMI VLIVY	42
3.3.1 Vliv vlhkosti a absorpce vody	43
3.3.2 UV degradace	43
3.3.3 Koroze nebo interakce s agresivními prostředími	44
4 VYTVRZOVÁNÍ PRYSKYŘIC V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH.....	45

4.1	ROZDĚLENÍ VYTVRZOVACÍCH PRYSKYŘIC	45
4.2	ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PRYSKYŘIC	45
4.3	ZPŮSOBY VYTVRZOVÁNÍ PRYSKYŘIC	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
5	CÍL PRÁCE	48
6	EXPERIMENTÁLNÍ OPRAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	49
6.1	NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU OPRAVY	49
6.1.1	Vývojový diagram volby postupu opravy	50
6.2	POUŽITÉ POMŮCKY A MATERIÁLY	51
6.3	VOLBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	54
6.3.1	Vybrané vzorky vhodné pro opravu	54
6.3.2	Zkušební vzorky nevhodné pro opravu pomocí UV vytvrzování	57
6.4	VOLBA ZPŮSOBU OPRAVY JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ	59
6.5	PROVEDENÍ OPRAVY VZORKŮ	60
6.5.1	Aplikace pryskyřice na vzorky	60
6.5.2	Vytvrzení pryskyřice	64
6.5.3	Finální úpravy opraveného povrchu	66
6.6	ZHODNOCENÍ KVALITY OPRAVENÝCH POVRCHŮ	70
6.6.1	Kontrola povrchu	70
6.6.2	Porovnání stavu vzorků před a po opravě	70
6.6.3	Celkové zhodnocení úspěšnosti opravy	73
7	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ OPRAVY	74
	ZÁVĚR	76
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	82
	SEZNAM PŘÍLOH	83

ÚVOD

Kompozitní materiály se v posledních desetiletích staly klíčovou součástí mnoha průmyslových odvětví, především díky své vysoké pevnosti, nízké hmotnosti a širokým možnostem tvarování. Nejvýrazněji se uplatňují v letectví, automobilovém průmyslu, stavebnictví, či při výrobě sportovního vybavení. Vývoj těchto materiálů a jejich výrobních technologií výrazně přispěl ke zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností finálních výrobků a zároveň umožnil dosažení vyšší efektivity a úspor hmotnosti.

Jednou z klíčových etap při výrobě kompozitních dílů je správné vytvrzení pryskyřic, které zajišťuje propojení výztužných vláken a stabilitu výsledného materiálu. Volba vhodné pryskyřice a vytvrzovací technologie má zásadní vliv nejen na pevnostní charakteristiky, ale i na odolnost vůči teplotním změnám, chemickému působení nebo vlhkosti. Mezi moderní a stále častěji používané metody vytvrzování patří vytvrzování pomocí UV záření, které je rychlé, přesné a umožňuje vytvrzovat materiál jen v požadovaných místech.

Jedním z důležitých aspektů při použití kompozitních materiálů je však také jejich náchylnost k tvorbě vad, ať už při výrobě, během provozu, nebo vlivem okolního prostředí. Tyto vady mohou výrazně snížit funkčnost a životnost kompozitních dílů, a proto je jejich prevence, včasná detekce a vhodná oprava zásadní. Bakalářská práce se zaměřuje především na návrh způsobu opravy drobných povrchových vad kompozitních materiálů, které mohou vznikat během provozu nebo v důsledku nevhodného zpracování. Tato práce se zaměřuje na použití UV vytvrzovací pryskyřice při lokálních opravách těchto defektů.

Cílem práce je navrhnout efektivní, technologicky jednoduchý a ekonomicky dostupný postup tmelení kompozitních vad s následným vytvrzením pomocí UV záření. Tato metoda by měla umožnit rychlé opravy bez nutnosti demontáže nebo zásahu do struktury materiálu. Součástí práce je rovněž shrnutí vlastností kompozitních materiálů, jejich výrobních metod, typických vad a jejich důsledků, stejně jako přehled pryskyřic a vytvrzovacích technologií s důrazem na UV systémy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROBLEMATIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

1.1 Úvod do kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou moderní materiály vyznačující se kombinací jedinečných vlastností, jež však nelze dosáhnout použitím jednotlivých materiálových složek samostatně. Díky těmto vlastnostem se kompozitní materiály staly jednou z nejvýznamnějších oblastí výzkumu a aplikací v různých průmyslových odvětvích. Nejčastěji je lze využít v oblastech, kde je kladen důraz na vysoký poměr pevnosti vůči hmotnosti, odolnost vůči korozi a v neposlední řadě jejich schopnost přizpůsobit materiál specifickým podmínkám. [1;2]

Kompozitní materiály přinášejí značné výhody v porovnání s tradičními materiály, jako jsou například kovy či keramika, a to hlavně díky jejich schopnosti spojit různé materiálové složky. Těmi jsou polymery a skelná či uhlíková vlákna. Díky jejich kombinaci kompozity dosahují vlastností, které jsou klíčové pro náročné aplikace. To umožňuje výrobcům navrhovat odolnější a lehčí komponenty. Tím si zároveň výrobce zajistí snížení spotřeby energií a emisí, což je v moderním průmyslu stále více požadováno. [1;2]

Kompozitní materiály se rozdělují podle různých kritérií. Nejdůležitější kritéria jsou typ použité matrice a typ vyztužující složky. Toto rozdělení nám pomáhá lépe pochopit, jak jednotlivé složky ovlivňují vlastnosti kompozitních materiálů a jak je lze optimálně využít v praxi. [1;2;3]

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů podle matrice

Typ matrice kompozitního materiálu zásadně ovlivňuje jeho vlastnosti. Nejdůležitější vlastnosti jsou chemická odolnost, teplotní stabilita a flexibilita. Na základě matrice lze kompozitní materiály rozdělit do tří hlavních kategorií. [3;4]

1.2.1 Polymerní kompozity

Polymerní kompozity jsou jedna z nejpoužívanějších a nejběžnějších kategorií kompozitních materiálů. Jejich matrice se skládá z polymerních materiálů, které slouží jako pojivo. To zajišťuje spojení s vyztužující složkou. Polymerní kompozity se skládají ze dvou hlavních složek. [4;5;6]

První základní složkou je polymerní matrice, ta obklopuje vyztužující složku a zároveň zajišťuje soudržnost celého kompozitu. Typ matrice má zásadní vliv na vlastnosti

kompozitu. Hlavně jde o mechanickou pevnost, odolnost vůči teplotě a chemická odolnost. Rozlišujeme dva hlavní typy polymerů, využívané pro polymerní matrici: [4;5;6]

- a) **Termosetové polymery** (termosety) – Termosety (např. epoxidové, vinylesterové nebo polyesterové pryskyřice) získávají po vytvrzení pevnou strukturu, která již následně nereaguje na teplotu. Mají vysokou pevnost v tahu, jsou pevné a odolné vůči teplotě a chemikáliím. Právě epoxidové pryskyřice jsou jednou z nejběžnějších maticí pro vyztužení skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. [4;5;6;7]
- b) **Termoplastické polymery** (termoplasty) – Termoplasty (např. polypropylen nebo polyamid) lze opakovaně při zahřívání tvarovat. To umožňuje recyklaci a snadnější zpracování polymeru. Termoplasty jsou méně odolné vůči teplotě než termosety, avšak mají lepší houževnatost. To zlepšuje jejich odolnosti vůči nárazu. [4;5;6;7]

Druhou část polymerního kompozitu tvoří vyztužující složka. V polymerních kompozitech se vyskytuje ve formě vláken, částic nebo vrstev. To poskytuje danému materiálu tuhost, pevnost a mechanickou odolnost. Nejčastější materiály využívané pro vyztuže jsou: [2;5;6]

- a) **Skelná vlákna** – Poskytují materiálu vysokou pevnost, odolnost vůči korozi a také velmi dobrý poměr ceny na množství materiálu. Skelná vlákna jsou pro polymerní kompozity nejpoužívanějším vyztužujícím materiálem, a to obzvláště ve stavebním či automobilovém průmyslu. [2;5]



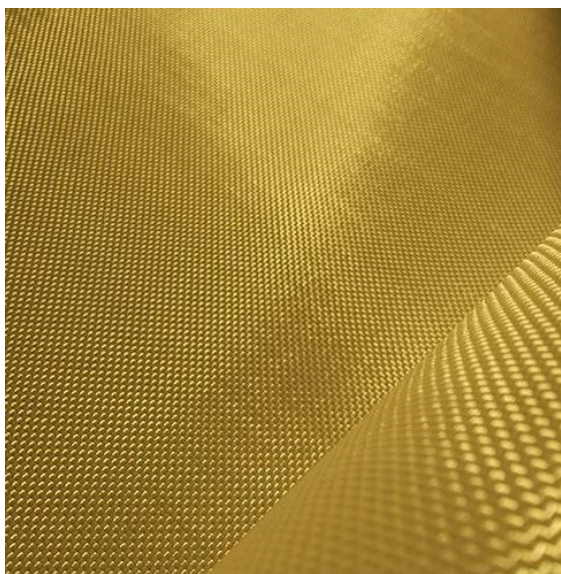
Obrázek 1 – Skelná vlákna

- b) **Uhlíková vlákna** – Přináší materiálu vysokou pevnost při nízké hmotnosti. Vlákná jsou velmi tuhá a odolná. Tyto vlákna se nejčastěji využívají tam, kde je důležitý poměr pevnosti vůči hmotnosti. Jde tedy především o sportovní náčiní, letectví a kosmonautiku. [2;4]



Obrázek 2 – Uhlíková vlákna

- c) **Aramidová vlákna** – Tyto vlákna jsou extrémně pevná, mají dobrou tepelnou odolnost a jsou odolná vůči nárazům (například Kevlar). Používají se tam, kde je požadována vysoká odolnost proti nárazu, například pro balistickou ochranu. [2;4]



Obrázek 3 – Aramidová vlákna

Vlastnosti polymerních kompozitů:

Polymerní kompozity nabízejí jedinečnou kombinaci vlastností, ty z nich činí ideální materiály pro aplikace, kde je důležitá pevnost, odolnost a nízká váha. Mezi hlavní výhody polymerních kompozitů patří následující vlastnosti. [1;2;6]

Díky nízké hustotě vyztužujících vláken a polymerních matic jsou polymerní kompozity výrazně lehčí než tradiční kovové materiály. Polymerní kompozity lze snadno formovat do nejrůznějších tvarů, což usnadňuje jejich využití pro složité geometrické struktury. Při správně zvolené kombinaci polymerní matrice a výztuže dosahují kompozity vysoké pevnosti v tlaku a tahu. Polymerní kompozity jsou obvykle odolné vůči chemikáliím, UV záření a vlhkosti. Tyto vlastnosti je činí vhodnými pro venkovní a náročné průmyslové aplikace. [2;6]

Aplikace polymerních kompozitů:

Polymerní kompozity nacházejí díky svým vlastnostem široké využití v mnoha odvětvích, například při výrobě sportovního vybavení, které vyžaduje nízkou hmotnost a vysokou pevnost (kola, lyže, tenisové rakety). Ve stavebnictví se používají při výrobě fasádních panelů, potrubí a dalších komponent, kde je podstatná pevnost, lehkost a odolnost vůči vnějším vlivům. Díky vysokému poměru pevnosti k hmotnosti a odolnosti proti povětrnostním podmínkám jsou polymerní kompozity klíčovým materiálem při výrobě letadel. [1;2;6]

1.2.2 Kovové kompozity

Jde o speciální typ kompozitních materiálů, které používají kov jako matici. Kovové kompozity se vyznačují vysokou pevností, tuhostí, odolností proti opotřebení a tepelnou odolností. To z nich dělá ideální volbu pro aplikace s vysokými mechanickými a tepelnými nároky. Nacházejí uplatnění především v leteckém, kosmickém, automobilovém a vojenském průmyslu. Kovové kompozity se skládají ze dvou hlavních složek: [4]

- a) **Kovová matrice** – Matrice je tvořena kovem, který zajišťuje soudržnost materiálu a přenáší zatížení mezi vyztužujícími částicemi nebo vlákny. Typ matrice určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti kompozitu, například hustota, elektrická vodivost a tepelná odolnost. Mezi nejpoužívanější kovové matrice patří hliník (dobrá pevnost při nízké hmotnosti), titan (vysoká pevnost, odolnost vůči korozi a výborná

tepelná stabilita), hořčík (velmi nízká hustota) nebo třeba nikl (odolnost vůči vysokým teplotám a chemickým vlivům). [4]

- b) **Vyztužující složka** – V kovových kompozitech poskytuje materiálu dodatečnou tuhost, pevnost a odolnost. Vyztužující složka může být ve formě vláken, částic nebo whiskerů (tzn. vlákna mikroskopických rozměrů). Bývá vyrobena z materiálů s tepelnou odolností a vysokou pevností. Mezi nejběžnější vyztužující materiály patří karbidy (tepelně odolné a velmi tvrdé), oxidy (vysoká tepelná odolnost a pevnost). Za zmínku také stojí boridová a nitridová vlákna. [4]

Vlastnosti kovových kompozitů:

Kovové kompozity se vyznačují kombinací kovových a kompozitních vlastností. Tyto vlastnosti z nich činí vhodné materiály pro náročné aplikace. Mezi hlavní výhody kovových kompozitů patří vysoká pevnost a tuhost, tepelná odolnost a odolnost vůči opotřebení. Dále je výhodou jejich poměrně jednoduché zpracování a tvarování, stejně jako u tradičních metod zpracování kovu (lití, obrábění či tváření). [1]

Aplikace kovových kompozitů:

Díky kombinaci vynikajících mechanických a tepelných vlastností nachází kovové kompozity využití v mnoha průmyslových odvětvích. V případě hliníkové či hořčíkové matrice se kovové kompozity využívají v automobilovém průmyslu. Konkrétně pro výrobu lehkých a zároveň pevných součástí (např. rámy a části motorů). Dále pro komponenty, které vyžadují extrémní pevnost a odolnost vůči teplotám (turbínové lopatky, kryty motorů či části trupu letadel). [1;4]

1.2.3 Keramické kompozity

Jde o druh kompozitních materiálů, kde je jako matrice využit keramický materiál. Keramické kompozity vynikají extrémně vysokou tepelnou odolností, tvrdostí a odolností vůči opotřebení. Těchto vlastností se využívá u součástí, kde je materiál vystaven vysokým teplotám, mechanickému namáhání nebo chemickým vlivům. Tyto kompozity nacházejí uplatnění především v leteckém, kosmickém a energetickém průmyslu. Keramické kompozity se skládají ze dvou hlavních složek: [4]

- a) **Keramická matrice** – Matrice zajišťuje stabilitu, tvar a základní mechanické vlastnosti kompozitu. Keramika je sama o sobě velmi křehká, to omezuje její využití ve formě čistého materiálu. Avšak v kombinaci s výztuží lze dosáhnout lepších

mechanických vlastností (např. zvýšená houževnatost nebo odolnost vůči praskání). Mezi nejběžnější keramické matrice patří oxidová, karbidová nebo nitridová keramika. [4]

- b) **Vyztužující složka** – Zvyšuje houževnatost, mechanickou pevnost a odolnost kompozitu vůči praskání. Je ve formě vláken, částic nebo whiskerů (tenké, krátká vlákna). Mezi nejčastěji používané vyztužující materiály patří oxidová, karbidová nebo nitridová vlákna. [4]

Vlastnosti keramických kompozitů:

Keramické kompozity nabízejí unikátní kombinaci vlastností, ty je odlišují od ostatních typů kompozitních materiálů. Mezi jejich přední vlastnosti patří vysoká tepelná odolnost, nízká hustota, odolnost vůči opotřebení a chemická odolnost. Oproti ostatním kompozitům jsou však křehké. [1]

Aplikace keramických kompozitů:

Keramické kompozity se využívají v celé řadě průmyslových odvětví, zejména v automobilovém průmyslu pro výrobu brzdových kotoučů. Díky své tvrdosti a odolnosti vůči nárazům se keramické kompozity používají také při výrobě balistické ochrany a pancéřování. V kosmickém a leteckém průmyslu se využívají pro komponenty vystavené extrémním teplotám. Příkladem mohou být jednotlivé komponenty dvouproudého motoru pro dopravní letadla firmy GE Aviation (obrázek 4). V neposlední řadě se používají v energetice (plynové turbíny či výměníky tepla). [1;4]



Obrázek 4 – Dvouproudý motor dopravního letadla firmy GE Aviation [8]

1.3 Rozdělení kompozitních materiálů podle typu výztuže

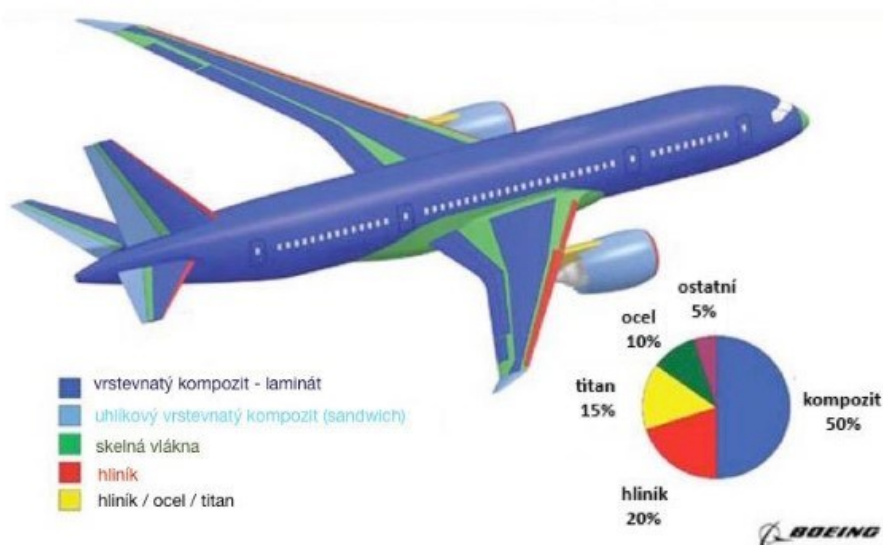
Kompozitní materiály můžeme klasifikovat dle druhu výztuže, ta zásadně ovlivňuje jejich vlastnosti. Výztuže hrají zásadní roli v přenosu zatížení a zajištění stability kompozitu. Typ a rozložení výztuže následně určuje konkrétní využití výsledného materiálu. Nejčastěji se kompozity dle typu výztuže rozdělují následovně. [9]

1.3.1 Kompozity vyztužené vlákny

Kompozity vyztužené vlákny jsou jedním z nejrozšířenějších typů kompozitních materiálů. Výztuž ve formě vláken je zodpovědná za přenos mechanického zatížení. Dále také za zvýšení pevnosti a tuhosti materiálu. Vlákná jsou zapouzdřena v matrici, ta zajišťuje soudržnost materiálu, rovnoměrně rozděluje zatížení a chrání výztužná vlákna před poškozením. Vláknové kompozity využívají několik různých typů vláken v závislosti na požadovaných vlastnostech pro výsledný materiál. [1;4;9]

Nejčastěji používanou výztuží jsou skleněná vlákna, a to hlavně díky své dostupnosti, nízkým nákladům a dobrým mechanickým vlastnostem. Skelná vlákna nám nabízejí vysokou pevnost v tahu, nízkou hustotu a odolnost vůči korozi. Nejčastěji používaným typem je tzv. E-sklo, které kombinuje dobré elektrické izolační vlastnosti a pevnost. [1;4;9]

Uhlíková vlákna mají výjimečně vysokou pevnost a tuhost, a to při zachování nízké hmotnosti. Ideální pro aplikace, kde je těžké dosáhnout vysokého poměru pevnosti k hmotnosti (letectví, kosmonautika či sportovní vybavení). [1;4;9]



Obrázek 5 – Uhlíkové kompozitní díly – letadlo Boeing 787 [6]

Aramidová vlákna jsou skupinou syntetických vláken odvozených od aromatických polyamidů. Ty se vyznačují výjimečně vysokou pevností, tuhostí a odolností proti teplotám a chemickým látkám. Aramidová vlákna mají pevnost několikanásobně vyšší než ocel při mnohem nižší hmotnosti. Tepelná stabilita vláken umožňuje jejich využití v extrémních teplotách (až do 500 °C bez zásadního snížení mechanických vlastností). Dále mají nízkou hustotu a jsou chemicky odolné vůči většině chemikálií. Odolnost proti oděru a nárazům umožňuje využití aramidových vláken pro ochranné vybavení (např. ochranné rukavice, přilby a neprůstřelné vesty). Mezi nejznámější zástupce aramidových vláken patří Kevlar. [1;4;9]

Keramická vlákna (např. z oxidu hlinitého či karbidu křemíku) mají vysokou tepelnou odolnost. Nacházejí uplatnění v prostředích s extrémními teplotami, například v žáruvzdorných součástech a v plynových turbínách. [1;4;9]

Přírodní vlákna jsou vyráběna z přírodních materiálů (např. len, bavlna nebo juta). Jsou šetrná k životnímu prostředí, tím pádem se využívají hlavně v ekologicky orientovaných aplikacích. Ačkoli nemají tak vysokou pevnost jako syntetická vlákna, jsou cenově dostupnější a biologicky odbouratelná. [1;4;9]

Podle uspořádání vláken dělíme kompozity na: [1;2;4]

- a) Jednosměrné kompozity – Vlákna jsou orientovaná pouze jedním směrem. To zajišťuje vysokou tuhost a pevnost v tomto směru. Tento typ kompozitů je však náchylný k selhání v ostatních směrech (tam, kde není výztuž přítomna). Používá se například v leteckém průmyslu, kde je zatížení předvídatelné.
- b) Křížené kompozity – Vlákna jsou orientovaná ve dvou směrech. To poskytuje vyváženější mechanické vlastnosti. Tyto kompozity se používají ve strukturálních aplikacích, kde je víceosé zatížení (např. rotorové listy větrných elektráren).
- c) Náhodně orientované kompozity – Vlákna jsou rozložena zcela náhodně, což zajišťuje rovnoměrné rozložení mechanických vlastností ve všech směrech. Tento typ kompozitů se využívá u některých plastů vyztužených skelnými vlákny.

1.3.2 Částicové kompozity

Jde o typ kompozitních materiálů, kde je výztuž tvořena částicemi. Částice jsou v materiálu rovnoměrně rozprostřené, to zajistí zlepšení tvrdosti, pevnosti či odolnosti proti opotřebení. Tento typ kompozitů má izotropní charakter, tzn. díky rovnoměrnému rozložení částic jsou

jejich mechanické vlastnosti ve všech směrech víceméně stejné. Výběr materiálu pro částicovou výztuž závisí na požadovaných vlastnostech výsledného kompozitu. Mezi nejčastěji používané patří: [1;2;4]

- a) **Keramické částice** – Oxidy (např. oxid hlinitý – Al_2O_3) zvyšují tvrdost a tepelnou odolnost kompozitu. Karbidy (karbid křemíku – SiC) a nitridy (nitrid boru – BN) zlepšují odolnost vůči opotřebení a tepelnou stabilitu. Keramické částice se často používají v metalurgii a v součástech, které musí odolávat vysokým teplotám.
- b) **Kovové částice** – Hliníkové či měděné částice se přidávají do keramických či polymerních matric. Zlepšují jejich tepelnou a elektrickou vodivost. Tyto kompozity se využívají například v elektrotechnice.
- c) **Uhlíkové částice** – Uhlíkové prášky nebo nanočástice se přidávají pro zlepšení mechanických vlastností, odolnosti proti opotřebení či elektrické vodivosti. Nanočástice uhlíku nachází uplatnění v moderních technologiích (např. výroba baterií a elektroniky).
- d) **Přírodní částice** – Organické částice (např. drcené kosti nebo skořápky) se používají v ekologických kompozitech nebo v biomedicínských aplikacích.

1.3.3 Vrstvené (laminární) kompozity

Vrstvené kompozity (známé také jako laminární kompozity) jsou tvořeny několika vrstvami materiálů spojených dohromady. Tyto vrstvy mohou být ze stejného i odlišného materiálu. Jsou uspořádány tak, aby poskytovaly požadované výsledné vlastnosti. Hlavní výhodou této struktury je možnost přizpůsobit vlastnosti kompozitu dle požadavků finální aplikace, a to prostřednictvím výběru materiálu a orientace vrstev. [1;2]

Vrstvené kompozity obvykle obsahují 3 základní typy vrstev. Nosné vrstvy zajišťují základní pevnost a tuhost daného materiálu. Často jsou tvořeny vláknovými materiály (např. skleněnými nebo uhlíkovými vlákny). Spojovací vrstvy (matrice) propojují jednotlivé vrstvy a zajišťují jejich soudržnost. Můžou být polymerní, kovové či keramické. Povrchové vrstvy chrání kompozit před vlivy okolního prostředí (chemikálie, vlhkost nebo mechanické poškození). [1;2]

Jednotlivé vrstvy kompozitu mohou být uspořádány jednosměrně (vlákna jsou v jednotlivých vrstvách orientovaná jedním směrem) nebo kříženě (vlákna jsou v každé vrstvě orientovaná pod určitým úhlem vůči sousedním vrstvám). Jednosměrné uspořádání

poskytuje vysokou pevnost v daném směru vedení vláken. Křížené naopak dosahují rovnoměrnějších vlastností ve všech směrech. [1;2;4]

Vrstvené kompozity mají hned několik výhod. Kromě vysoké tuhosti a pevnosti jsou lehké a odolné vůči delaminaci (oddělování vrstev). Kombinací různých materiálů a odlišnou orientací vrstev lze vytvořit materiál s optimálními vlastnostmi. Tloušťka vrstev ovlivňuje celkovou pevnost a tuhost materiálu. Vyšší počet vrstev obvykle zlepšuje odolnost vůči trhlinám a nárazům. [1;2]

2 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Postup, který zvolíme při výrobě kompozitních materiálů, nám určuje nejen jejich výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti, ale také jejich uplatnění v praxi. Proces zahrnuje integraci výztuže a matrice do jednoho celku při využití specifických metod. Ty zohledňují použitý typ materiálů, požadavky na finální produkt a ekonomické aspekty. [1;9]

Každá výrobní metoda má své výhody a limity, přičemž výběr vhodného postupu závisí na charakteristikách finálního výrobku. Ruční laminace je vhodná pro výrobu menších sérií a složitějších tvarů, zatímco technologie jako pultruze či vinutí vláken umožňují efektivní produkci větších dílů s přesně definovanými vlastnostmi. Moderní techniky (např. 3D tisk) navíc rozšiřují možnosti designu a funkcionality kompozitů. [1;9]

Cílem této kapitoly je představit hlavní metody výroby kompozitních materiálů a jejich specifické charakteristiky, včetně tradičních, pokročilých i inovativních přístupů.

2.1 Ruční laminace

Ruční laminace je jednou z nejstarších a nejjednodušších metod výroby kompozitních materiálů. Tento proces je založen na ručním nanášení výztuže a následném prosycování matricí (nejčastěji pryskyřicí) přímo na formu. Díky své jednoduchosti a nízkým nákladům na vybavení se tato metoda široce využívá zejména při výrobě menších sérií či prototypů. [1;2;5]

Princip ruční laminace:

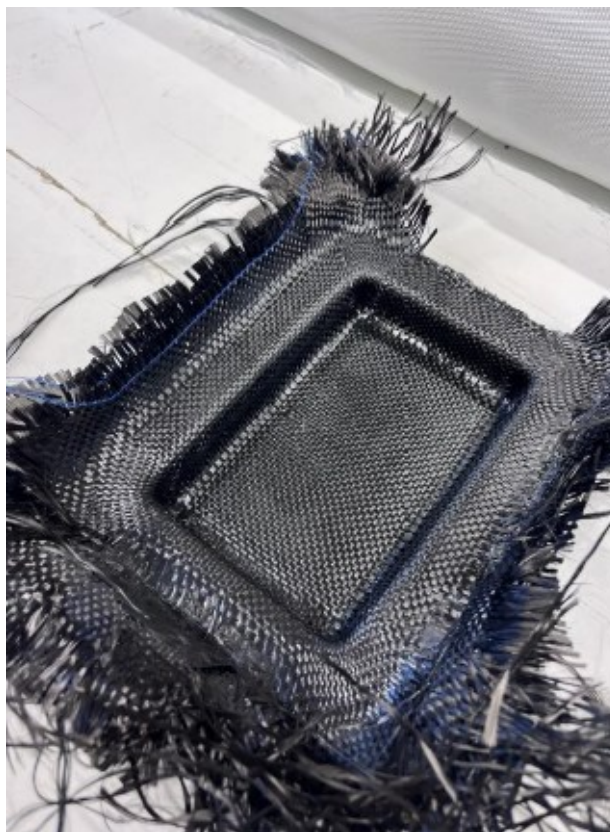
Při ruční laminaci se do předem připravené formy postupně pokládají vrstvy výztuže (např. skelných, uhlíkových nebo aramidových vláken). Tyto vrstvy jsou postupně prosycovány kapalnou pryskyřicí, která zajišťuje spojení vláken a vytváří pevný kompozitní celek. Pro aplikaci pryskyřice se používají štětce, válečky nebo stěrky. Následně se odstraní zachycené vzduchové bubliny, což zlepšuje mechanické vlastnosti výsledného dílu. Po vytvrzení pryskyřice (buď za pokojové teploty nebo v peci) je díl připraven k použití. [1;2;5]



Obrázek 6 – Princip ruční laminace [10]



Obrázek 7 – Tvarování jednotlivých vrstev tkaniny a jejich prosycování pryskyřicí pomocí válečku



Obrázek 8 – Hotový výrobek před odstraněním přebytečného materiálu

Výhody ruční laminace:

Hlavní výhodou ruční laminace jsou nízké náklady na vybavení. Pro tento proces není nutné žádné specializované zařízení, což snižuje počáteční investice. Tato metoda umožňuje snadno vyrábět díly s komplexními tvary. Vhodné především pro výrobu menších sérií. [1;2;5]

Nevýhody ruční laminace:

Největší nevýhodou této metody je její pracnost. Proces je zcela závislý na manuální práci, což zvyšuje její časovou náročnost. Oproti pokročilejším metodám může mít ruční laminace nižší přesnost rozložení vláken a tím pádem i nižší homogenitu materiálu u výsledného výrobku. [1;2;5]

Aplikace:

Ruční laminace nachází uplatnění zejména tam, kde není vyžadována vysoká přesnost či mechanická odolnost. Typickými produkty jsou lodní trup, karoserie automobilů, menší nádrže nebo dekorativní prvky. Přestože má tato metoda své limity, stále je ceněna pro svou jednoduchost a přístupnost, zejména v malovýrobě. [1;2;5]

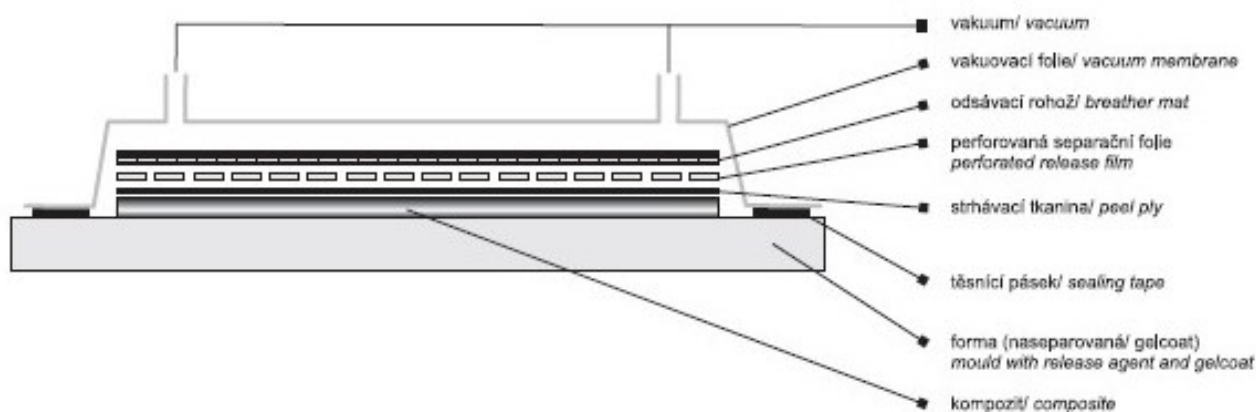
2.2 Metoda vakuového sáčku (vacuum bagging)

Metoda vakuového sáčku je vylepšená technika laminace, která zlepšuje výslednou kvalitu a mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. U této metody se k rovnoměrnému stlačení vrstev kompozitu během vytvrzování využívá podtlak. Díky tomu je dosaženo lepší homogenity materiálu, minimalizuje se počet vzduchových bublin a odstraní se přebytečná pryskyřice. [2;9]

Princip metody:

Proces začíná přípravou formy, do které se postupně pokládají vrstvy výztuže (obvykle skelná, uhlíková nebo aramidová vlákna). Tyto vrstvy jsou následně prosycovány matricí, typicky epoxidovou či polyesterovou pryskyřicí. Na připravený laminát se následně položí separační fólie a absorpční tkanina (ta pohlcuje přebytečnou pryskyřici). Celý výrobek je zakrytý pružnou vakuovou fólií, která je pevně utěsněna podél okrajů formy. [2;9]

Pomocí vakuové pumpy se z prostoru pod fólií odsaje vzduch, čímž se vytvoří podtlak. Ten zajišťuje rovnoměrné stlačení vrstev. Díky tomu dochází ke zvýšení hustoty laminátu, odstranění nežádoucích dutin a zlepšení mechanických vlastností. Proces vytvrzování pak probíhá při pokojové teplotě nebo za zvýšené teploty v peci. [2;9]



Obrázek 9 – Princip metody vakuového sáčku [11]

Výhody metody vakuového sáčku:

Podtlakem je dosaženo vyšší pevnosti a tuhosti materiálu, a to díky snížení obsahu vzduchu a rovnoměrnému rozložení pryskyřice. Absorpční tkanina odstraňuje přebytečnou pryskyřici, což snižuje hmotnost výsledného dílu a zlepšuje poměr výztuže vůči matici. Metoda je zároveň vhodná pro výrobu součástí různých tvarů i velikostí. [2;9]

Nevýhody metody vakuového sáčku:

Potřebné vybavení (vakuové pumpy a speciální fólie) zvyšuje oproti ruční laminaci počáteční investici. Proces vyžaduje pečlivou přípravu a přesnost, to zvyšuje časovou náročnost metody. Ani tato metoda není vhodná pro větší produkci, a to kvůli delším výrobním cyklům. [2;9]

Aplikace:

Metoda vakuového sáčku se používá zejména v odvětvích, kde je kladen důraz na vysokou kvalitu a pevnost materiálů. Příkladem jsou letecký, lodní a automobilový průmysl (lehké a pevné komponenty letadel, lodní trupy, konstrukce závodních vozidel). Metoda se využívá i pro výrobu různého sportovního vybavení (lyže, snowboardy a další kompozitní produkty). [2;9]



Obrázek 10 – Umístění formy do vakuovacího pytle a následné odsávání vzduchu



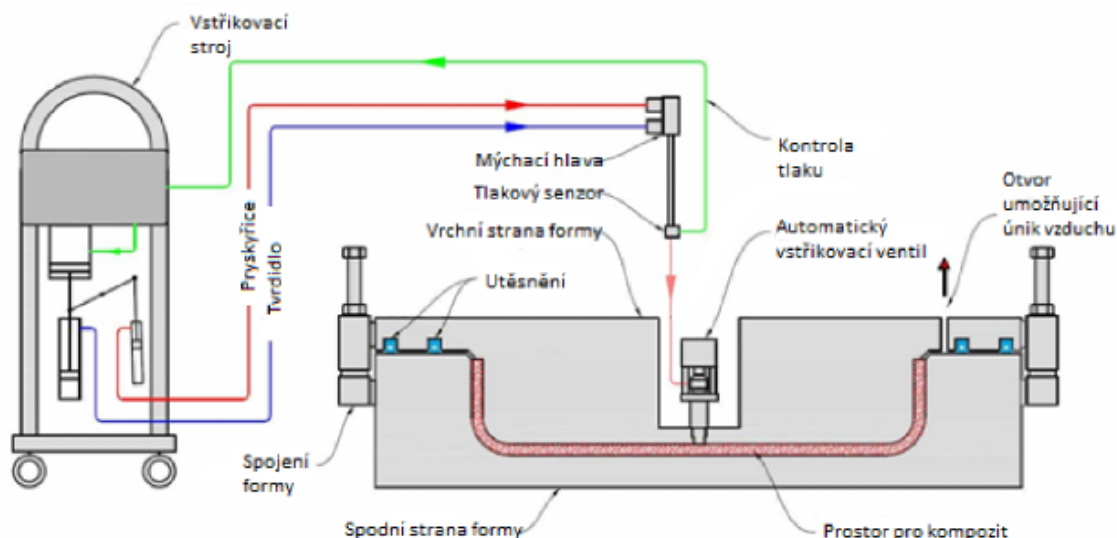
Obrázek 11 – Vložení formy do předehřáté pece a detailní pohled na pohledovou stranu finálního výrobku

2.3 RTM (Resin Transfer Molding)

Jde o pokročilou metodu výroby kompozitních materiálů. Tento proces je uzavřenou technikou, která umožňuje přesné tvarování a efektivní prosycení výztuže pryskyřicí, čímž se dosahuje velmi vysoké kvality výsledného produktu. [1;9;12]

Princip RTM:

Metoda RTM začíná přípravou formy, ta se skládá ze dvou částí – horní a spodní. Celá forma se ošetří vrstvou zabráňující přilepení kompozitu k formě. Do formy se předem vloží suchá výztuž (např. skelná, uhlíková nebo aramidová vlákna) ve formě tkaniny nebo rohoží. Forma se pevně uzavře a utěsní. Do jejího vnitřního prostoru je následně vstřikovává kapalná pryskyřice (obvykle epoxidová či polyesterová) pomocí vstřikovacích kanálků. Pod tlakem pryskyřice proniká do všech mezer výztuže a zajišťuje dokonalé prosycení. Po naplnění formy a vytvrzení pryskyřice (většinou za zvýšené teploty) je forma otevřena a hotový kompozitní díl může být vyjmut. [1;2;9;12]



Obrázek 12 – Technologie RTM, upraveno podle [13]

Výhody RTM:

Díky uzavřenému procesu je dosaženo rovnoměrného rozložení pryskyřice, vysoké pevnosti a estetického povrchu. Výsledná kvalita produktů je tedy velmi vysoká. Přebytková pryskyřice je téměř eliminována, což snižuje celkové náklady. RTM umožňuje opakovatelnou a rychlou produkci, což je výhodné pro střední a velké série. [1;9;12]

Nevýhody RTM:

Výroba forem a nákup potřebného vybavení (např. vstřikovací systémy) zvyšuje počáteční náklady. Metoda je omezena složitostí dílů, proces je totiž vhodný pro výrobu dílů s relativně jednoduchými tvary. RTM má vysoké nároky na přesnost. Kvalitní výsledky závisí na přesné přípravě formy a na správném nastavení parametrů vstřikování. [1;9;12]

Aplikace:

RTM je široce využíván v průmyslových odvětvích, kde je vyžadována vysoká kvalita, nízká hmotnost a estetický vzhled výsledných kompozitních dílců. Příklady využití jsou různé, od sportovního vybavení (lyže, rakety, jízdní kola), designových kusů nábytku s hladkým povrchem, až po karosářské díly v automobilovém průmyslu. Pomocí technologie RTM se také vyrábějí strukturální části letadel, jako jsou panely trupu, kryty motorů, dveře nebo vnitřní výplně kabin [1;9;12]



Obrázek 13 – Části trupu dopravního letadla vyrobené technologií RTM [14]

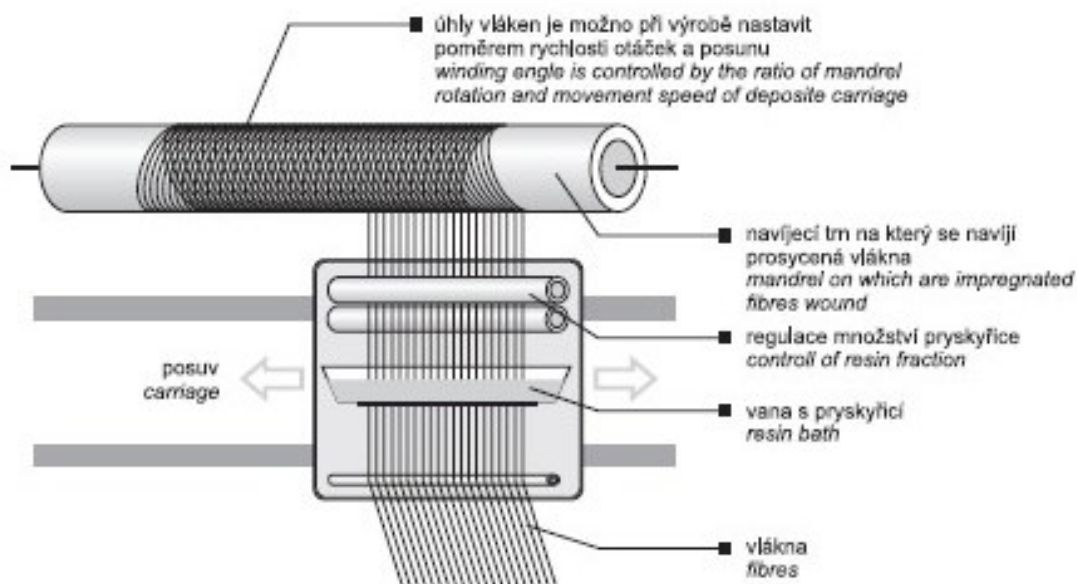
2.4 Vinutí vláken (Filament Winding)

Vinutí vláken je speciální technika výroby kompozitních materiálů, která umožňuje efektivní produkci strukturálních dílů s vysokou pevností a tuhostí. Tento proces využívá kontinuální vlákna impregnovaná matricí, která jsou navíjena na rotační formu podle přesně definovaného vzoru. [1;9]

Princip metody:

Během procesu jsou vlákna (skelná, uhlíková či aramidová) vedena přes impregnační lázeň, kde se prosycují pryskyřicí. Následně jsou pod kontrolovaným napětím navíjena na rotační formu (tzv. jádro či trn). Vláknům lze navíjet pod různými úhly, což umožňuje přizpůsobení mechanických vlastností výsledného dílu konkrétním požadavkům. Po dokončení vinutí je forma s kompozitem podrobena vytvrzování, často za zvýšené teploty. Po vytvrzení je forma odstraněna (u dutých dílů, jako jsou potrubí) nebo ponechána jako součást konstrukce. [1;9]

Rozlišujeme různé typy vinutí vláken. U kruhového vinutí jsou vlákna navíjena kolem osy formy (vysoká pevnost v obvodovém směru). Při podélném vinutí jsou vlákna navíjena podél osy formy (zlepšení pevnosti v axiálním směru). U takzvaného helikálního vinutí jsou vlákna navíjena pod úhlem k ose formy, což zajišťuje kombinovanou pevnost v podélném i obvodovém směru. [1;9]



Obrázek 14 – Princip vinutí vláken [15]

Výhody metody vinutí vláken:

Proces umožňuje různě střídat orientaci vláken pro zvýšení mechanických vlastností (vysoká pevnost a tuhost). Automatizace celého procesu zajišťuje vysokou produktivitu a konzistenci kvality. Tenkostěnné konstrukce vyrobené touto metodou mají vynikající poměr pevnosti k hmotnosti. [1;9]

Nevýhody metody vinutí vláken:

Nevýhodou této metody je její omezené využití. Proces je vhodný zejména pro výrobu rotačně symetrických dílů, jako jsou válce nebo trubky. Zároveň je zařízení pro vinutí vláken nákladné a vyžaduje odbornou obsluhu. Celý proces vyžaduje vysokou přesnost, přesné řízení napětí vláken a parametrů vinutí. [1;9]

Aplikace:

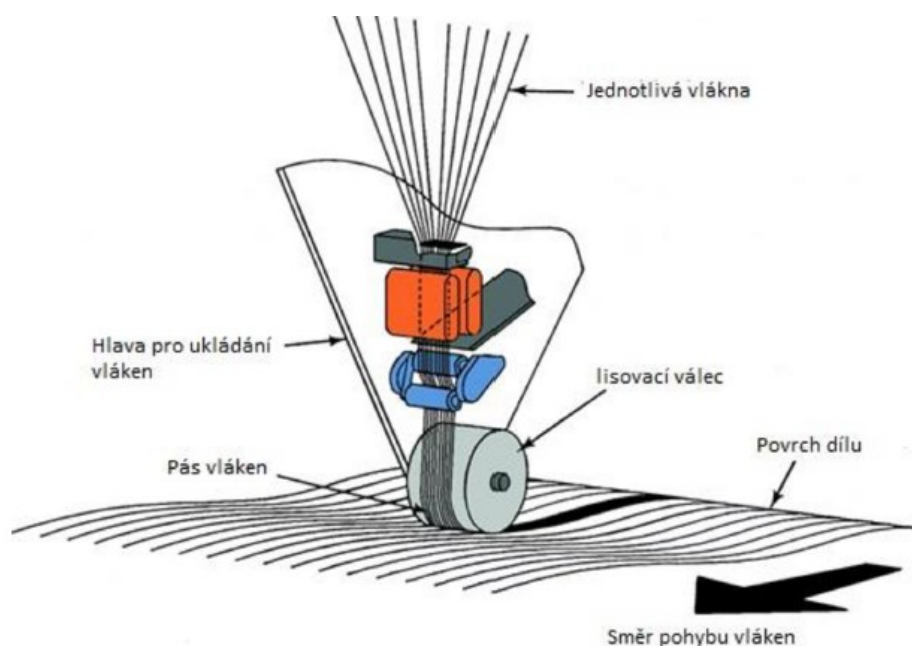
Tato metoda se hodí především pro výrobu tlakových nádob a palivových nádrží pro letecký a kosmický průmysl. Využívá se také při výrobě potrubí (především chemický průmysl), tlakových nádob a palivových nádrží. Dále se touto metodou vyrábí také například veslovací lodě a rybářské pruty. [1;9;16]



Obrázek 15 – Tlaková nádrž vyrobená technologií vinutí vláken [16]

2.5 Automatické kladení prepregů

Oproti technologii vinutí vláken se při automatickém kladení používají pásy z prepregů. K nanášení se využívá robotické rameno a díky němu je tato technologie použitelná i pro nerotační díly (např. křídla letadel). To umožňuje větší využití kompozitních materiálů právě v leteckém průmyslu, kdy je možné dělat velké jednolitě části. [1;9;17]



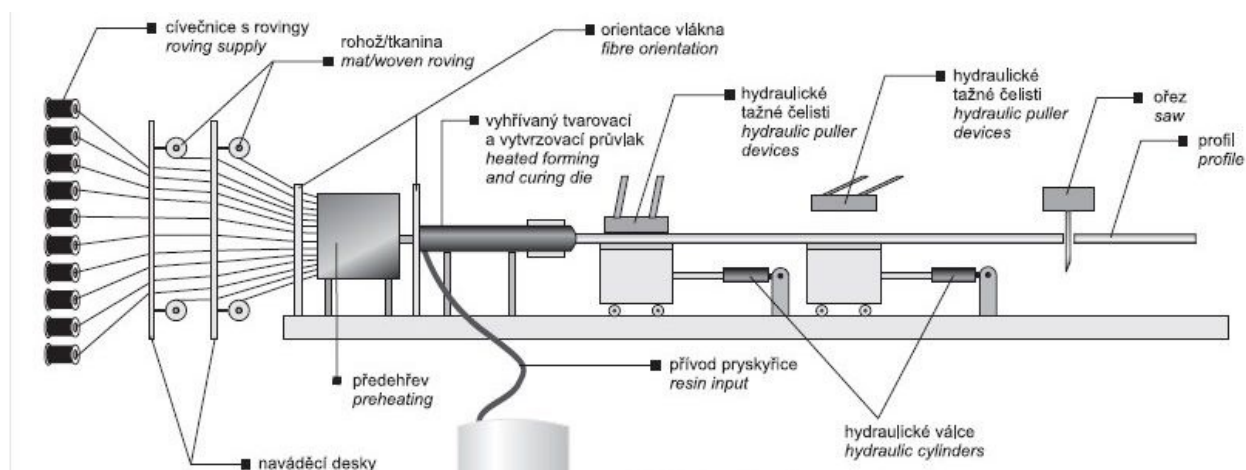
Obrázek 16 – Technologie automatického kladení prepregů, upraveno podle [17]

2.6 Pultruze

Pultruze je plně automatizovaná a velmi efektivní technika kontinuální výroby kompozitních profilů s konstantním průřezem. Název metody vychází z anglického slova „pull“ (táhnout), protože proces zahrnuje tahání vláken skrze impregnační lázeň a formu, kde dochází k vytvrzení pryskyřice. [9]

Princip pultruze:

Proces začíná navíjením kontinuálních vláken (skelná, uhlíková nebo aramidová vlákna) z cívek do vedení, kde jsou tažena do impregnační lázně obsahující kapalnou matici (obvykle epoxidovou či polyesterovou pryskyřici). Po nasycení vláken pryskyřicí jsou tažena skrze vyhřívanou kovovou formu, která jim dává požadovaný tvar a zároveň matici vytvrzuje. Hotový kompozitní profil je dále kontinuálně řezán na požadovanou délku. [9]



Obrázek 17 – Princip pultruze [18]

Výhody pultruze:

Jde o vysoce produktivní metodu, a to díky kontinuální výrobě velkého množství profilů v krátkém čase. Automatizace metody zajišťuje homogenní materiálové vlastnosti a přesné rozměry profilů. Výsledné profily mají vysokou pevnost a tuhost. Během procesu výroby vzniká malé množství odpadu, to snižuje výrobní náklady této metody. [9]

Nevýhody pultruze:

Metoda pultruze je vhodná pouze pro výrobu dílů s konstantním průřezem (tyče, trubky nebo desky). Zařízení pro pultruzi a formy jsou poměrně nákladné. Tato vysoká počáteční investice do metody pultruze může být překážkou pro menší výrobce. [9]

Aplikace:

Pultruzní profily nacházejí využití v mnoha oblastech díky své nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a odolnosti. Zejména v energetice (konstrukce izolátorů a kabelových tras), chemickém průmyslu (odolné trubky a nádrže pro chemikálie) a pro výrobu lehkých komponentů pro vlaky, autobusy a lodě. [9;19]



Obrázek 18 – Různorodé typy profilů vyrobené pultruzí [19]

2.7 Lisování (Compression Molding)

Lisování je jednou z nejrozšířenějších technik výroby kompozitních materiálů, zejména pro výrobu složitých tvarů a dílů s vysokou pevností. Tento proces zahrnuje umístění směsi vláken a matrice (nebo předem připraveného polotovaru) do formy, kde je materiál pod tlakem tvarován a vytvrzován. [4;7]

Princip lisování:

Proces začíná přípravou formy, která může být vyhřívána nebo studená (závisí na použité matrici). Do formy se vkládá předem připravená směs výztužných vláken (např. skelných, uhlíkových) a pryskyřice, případně pre-pregy. Po zavření formy působí tlak na vložený materiál, což zajišťuje jeho rovnoměrné rozložení a vyplnění všech částí formy. Během lisování často dochází k tepelnému vytvrzení matrice, což zvyšuje pevnost a stabilitu hotového produktu. Po dostatečném vytvrzení je díl z formy vyjmut a dále upraven (např. ořezáním přebytečných částí). [7]

Lisování kompozitních materiálů lze rozdělit do několika typů podle způsobu zpracování. Lisování za tepla se využívá především u termosetových pryskyřic, které při

zvýšené teplotě procházejí vytvrzovacím procesem. Oproti tomu lisování za studena je vhodné pro termoplasty, kde není nutné zahřívání formy, čímž se snižuje energetická náročnost celého procesu. Další variantou je transferové lisování, při němž je materiál nejprve předeřtát a následně přenesen do formy, kde dochází k jeho finálnímu tvarování. [7]

Výhody lisování:

Mezi hlavní výhody lisování patří vysoká produktivita, jelikož tento proces je rychlý a umožňuje efektivní sériovou výrobu. Forma zajišťuje vysokou rozměrovou přesnost a kvalitní povrchovou úpravu výrobků. Metoda zároveň umožňuje výrobu složitých a detailních dílů. [4;7]

Nevýhody lisování:

Vyšší náklady na formy mohou být limitujícím faktorem, protože jejich výroba je finančně i časově náročná, což znevýhodňuje tuto metodu pro malé série. Dále existují materiálová omezení, protože ne všechny materiály jsou vhodné pro lisování za vysokých teplot. [4;7]

Aplikace:

Lisování nachází uplatnění v široké škále průmyslových odvětví, kde je kladen důraz na vysokou pevnost, přesnost a estetickou kvalitu výrobků. V automobilovém průmyslu se tato technologie využívá k výrobě interiérových dílů, krytů motoru a různých strukturálních komponentů, které musí splňovat přísné požadavky na mechanické vlastnosti i vzhled. V leteckém průmyslu se lisované kompozitní materiály uplatňují při konstrukci lehkých a zároveň odolných dílů, což přispívá ke snížení hmotnosti letadel a zvýšení jejich palivové účinnosti. Další oblastí využití je spotřební průmysl, kde se lisování používá k výrobě krytů elektronických zařízení a sportovního vybavení, které vyžaduje vysokou pevnost při zachování nízké hmotnosti. [4;7]

3 POPIS VAD KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

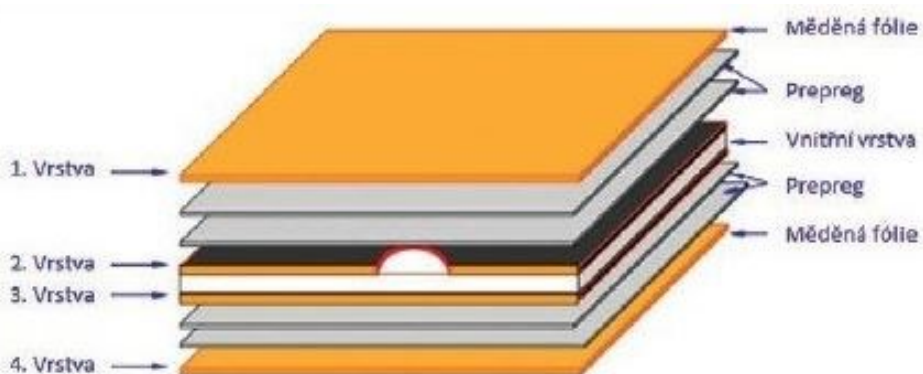
Kompozitní materiály se vyznačují vysokou pevností, nízkou hmotností a odolností vůči vnějším vlivům. Přesto se u nich mohou vyskytovat různé vady, které ovlivňují jejich mechanické vlastnosti, životnost a funkčnost. Tyto vady mohou vznikat během výroby, provozu nebo vlivem prostředí, ve kterém jsou kompozity používány. [1;20]

3.1 Vady vznikající při výrobě

Výroba kompozitních materiálů zahrnuje různé technologické procesy, během nichž mohou vznikat vady ovlivňující kvalitu finálního produktu. Mezi nejčastější příčiny těchto vad patří nedostatečná kontrola výrobních podmínek, nekvalitní materiály či technologické chyby. Tyto vady mohou vést ke snížení pevnosti materiálu, zvýšení křehkosti či zkrácení životnosti. [1;20]

3.1.1 Delaminace

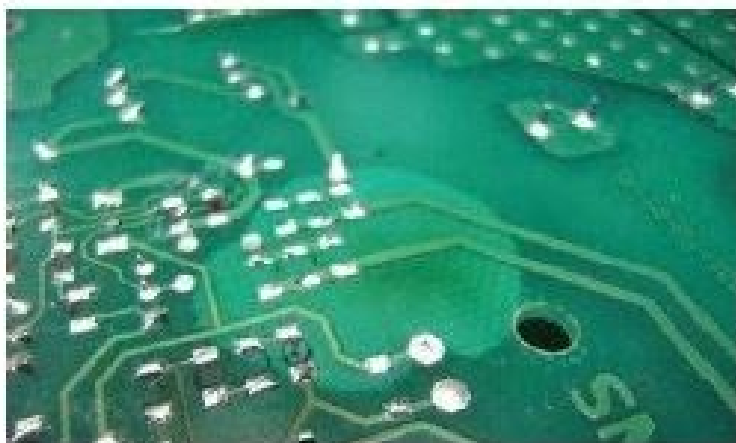
Delaminace je jednou z nejčastějších vad, která se vyskytuje u kompozitních materiálů (zejména u vrstvených). Jde o oddělení jednotlivých vrstev materiálu, což narušuje jeho strukturální integritu a negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Tento problém může vznikat nejen při výrobním procesu, ale i během provozu kompozitních součástí. [20]



Obrázek 19 – Složení jednotlivých vrstev desky [21]

Během výroby je delaminace často způsobena špatnou adhezí mezi vrstvami. Tato situace nastává například v důsledku nedostatečné impregnace vláken, použití nekvalitních lepidel nebo nevhodného množství pryskyřice. Dalším častým problémem je přítomnost nečistot (prach, mastnota či vlhkost), které se mohou dostat mezi vrstvy a bránit jejich kvalitnímu propojení. Nesprávné nastavení vstupních technologických parametrů, jako jsou teplota, tlak nebo doba vytvrzování, dále zvyšuje riziko vzniku této vady. [20]

Delaminace se však může objevit i během provozu kompozitních materiálů. Mechanické zatížení (rázy, vibrace nebo nadměrné ohýbání) může iniciovat oddělení vrstev, zvláště pokud materiál podléhá dlouhodobému cyklickému namáhání. Únava materiálu postupně oslabuje vazby mezi vrstvami, což vede k jejich oddělení. Dalším významným faktorem jsou tepelné cykly, při nichž dochází k opakovanému zahřívání a ochlazování materiálu. Tyto změny způsobují rozdílnou tepelnou roztažnost jednotlivých složek kompozitu, což přispívá k delaminaci. [20]

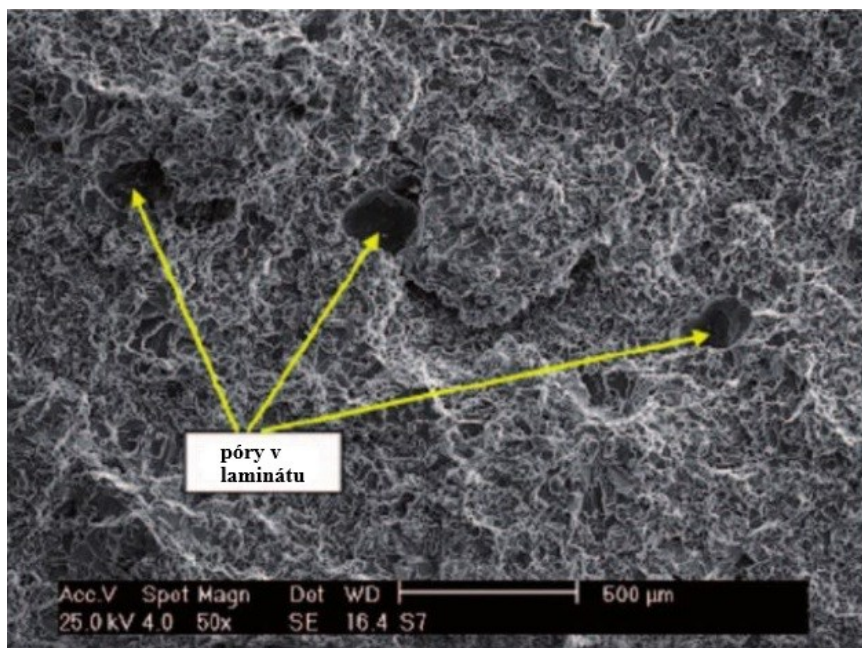


Obrázek 20 – Změna barvy desky v místě delaminace [21]

Důsledky delaminace jsou často závažné. Tento jev vede ke snížení pevnosti materiálu, protože oddělené vrstvy nemohou společně přenášet zatížení. Ztráta tuhosti je dalším problémem, který negativně ovlivňuje schopnost konstrukce odolávat mechanickému namáhání. V aplikacích, jako je letectví nebo automobilový průmysl, může delaminace způsobit selhání klíčových součástí, což představuje riziko havárie a ohrožení bezpečnosti. [20]

3.1.2 Pórovitost

Pórovitost je typická vada kompozitních materiálů, která se projevuje přítomností drobných dutin nebo bublin uvnitř struktury materiálu. Tyto póry vznikají zejména během výrobního procesu a výrazně ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti kompozitů (pevnost, tuhost a odolnost vůči únavovému zatížení). Přítomnost pórů zvyšuje křehkost materiálu a snižuje jeho schopnost efektivně přenášet zatížení. [6;20;22]



Obrázek 21 – Pórovitost na lomové ploše u kompozitu s kovovou maticí [22]

Příčiny pórovitosti lze nalézt především v technologii výroby. Nedostatečné odvětrání během procesu vytvrzování, špatná impregnace vláken nebo nevhodné dávkování pryskyřice mohou vést k zachycení vzduchu uvnitř materiálu. Póry mohou vznikat také vlivem rychlého vytvrzování, při kterém se uvolňují plyny, které nestačí uniknout. [6;20;22]

Pórovitost má závažné důsledky pro mechanické vlastnosti kompozitu. Póry slouží jako iniciátory trhlin, což snižuje pevnost materiálu a urychluje vznik lomů při cyklickém namáhání. Snižená hustota způsobená přítomností pórů negativně ovlivňuje také tuhost a tepelnou vodivost kompozitu. [6;20;22]

3.1.3 Nedostatečná impregnace vláken

Nedostatečná impregnace vláken je vážnou vadou kompozitních materiálů, která může výrazně ovlivnit jejich mechanické vlastnosti, zejména pevnost a tuhost. K této vadě dochází, když pryskyřice není rovnoměrně distribuována mezi vlákna, což vede k vzniku oblastí, kde je nedostatečná adheze mezi maticí a výztuží. Tento problém může nastat v průběhu výrobního procesu, především při laminování nebo při procesu vstřikování pryskyřice, pokud není materiál správně impregnován. [6;20;23]

Příčiny této vady zahrnují nedostatečný tlak či teplotu během procesu výroby, špatnou kontrolu směsi pryskyřice, nebo nesprávné nastavení vakuových systémů, které mohou mít za následek špatné rozprostření pryskyřice v laminátu. Rychlé vytvrzování nebo použití

nevhodného druhu pryskyřice, která nepenetruje dostatečně hluboko do vláken, může rovněž vést k nedostatečné impregnaci. [6;20;23]



Obrázek 22 – Nedostatečná impregnace vláken na okrajích kompozitu [23]

Bez adekvátní adheze mezi matricí a výztuží nemohou vlákna efektivně přenášet zatížení, což vede ke snížení pevnosti materiálu. Tento nedostatek pevnosti v oblasti spoje může způsobit delaminaci nebo vznik trhlin během zatěžování, čímž se významně zkracuje životnost kompozitu. [6;20;23]

3.1.4 Přebytek nebo nedostatek pryskyřice

Přebytečná pryskyřice se v materiálu objevuje, když není správně řízen proces impregnace nebo lisování. Nadměrné množství pryskyřice může vést ke vzniku oblastí s nízkou koncentrací vláken, což snižuje pevnost kompozitu v požadovaných směrech. Tyto oblasti mohou být náchylné k tvorbě trhlin nebo delaminaci při zatížení (pryskyřice samotná nemá takovou pevnost a tuhost jako výztužná vlákna). Kromě toho přebytečná pryskyřice zvyšuje celkovou hmotnost kompozitu. [1]

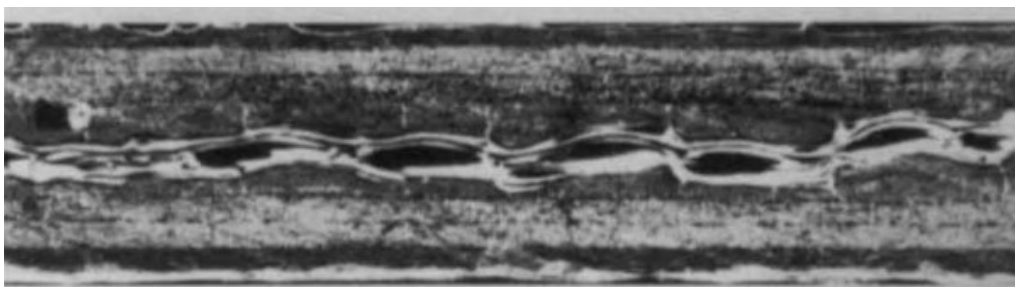
Nedostatek pryskyřice naopak způsobuje nedostatečné propojení mezi jednotlivými vlákny, což vede ke snížení soudržnosti jednotlivých vrstev a k tvorbě porézních oblastí. Tyto oblasti s nedostatečnou impregnací mohou být oslabené a náchylné ke vzniku trhlin při mechanickém nebo tepelném namáhání. Nedostatečné množství pryskyřice rovněž zvyšuje riziko delaminace a celkové snížení životnosti materiálu. [1]

3.2 Vady vznikající během provozu

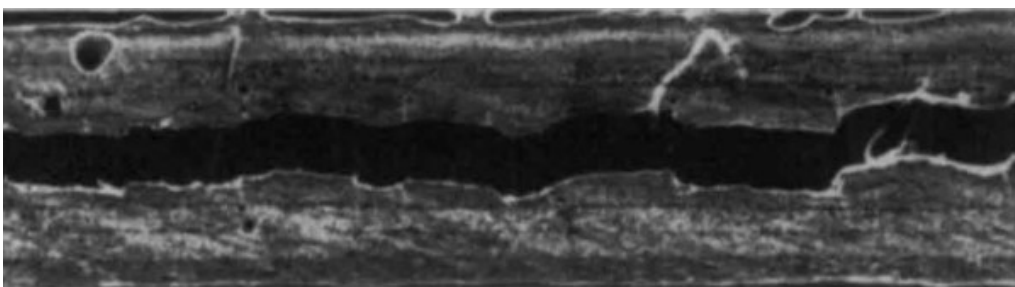
Vady, které vznikají během provozu kompozitních materiálů, představují významnou hrozbu pro jejich spolehlivost, životnost a mechanickou odolnost. Na rozdíl od výrobních vad, které jsou zpravidla výsledkem nedostatků při samotné výrobě, jsou provozní vady důsledkem vnějšího zatížení, opotřebení nebo interakce s okolním prostředím během používání kompozitního materiálu. Tyto vady se často objevují v důsledku mechanického namáhání, teplotních změn, vlivů prostředí nebo chemické degradace. [1;20]

3.2.1 Únava materiálu

Tento jev nastává v důsledku opakovaného cyklického zatížení. I při zátěži pod úrovní mezní pevnosti materiálu může docházet k postupnému hromadění mikroskopických poruch, což vede ke vzniku trhlin a k jejich následnému šíření. Dlouhodobé působení tohoto jevu může mít fatální dopad na strukturu a funkčnost kompozitu. [6;20]



Obrázek 23 – Laminát při statickém zatížení [20]



Obrázek 24 – Laminát po 50 cyklech únavového zatížení [20]

Mezi nejčastější projevy únavy materiálu patří vznik mikrotrhlin v matrici, praskání na rozhraní mezi vlákny a matricí, delaminace a ztráta kohezních vlastností. Tyto vady vedou ke snížení únosnosti a tuhosti kompozitu, což se projevuje poklesem mechanické pevnosti. Únava materiálu výrazně zkracuje životnost kompozitů. Mikrotrhliny a další defekty mohou postupně oslabovat strukturu a zvyšovat riziko katastrofického selhání, zejména v kritických

aplikacích, jako jsou letecké a automobilové konstrukce, lodní průmysl nebo energetika. Včasné neodhalení únavy může vést k náhlému a nevratnému poškození konstrukce. [6;20]

3.2.2 Mikroskopické praskliny

Mikroskopické praskliny (mikrotrhliny) představují drobná poškození uvnitř struktury kompozitních materiálů, která vznikají během provozu v důsledku různorodého mechanického a environmentálního namáhání. I když jsou tyto vady zprvu velmi malé, mohou se časem rozšiřovat a negativně ovlivňovat mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost, tuhost a odolnost vůči dalšímu poškození. [20;24]



Obrázek 25 – Snímek mikroskopické praskliny pomocí elektronového mikroskopu [24]

Mikrotrhliny se často objevují nejprve v matrici kompozitního materiálu, odkud se mohou dále šířit na rozhraní mezi matricí a výztužnými vlákny. Tyto praskliny obvykle nejsou viditelné pouhým okem, ale jejich přítomnost lze odhalit pomocí nedestruktivních diagnostických metod (např. ultrazvuková inspekce, rentgenová tomografie nebo mikroskopické analýzy). I když jednotlivé mikrotrhliny mají zpočátku zanedbatelný dopad na mechanické vlastnosti, jejich hromadění může vést k postupnému oslabování materiálu, delaminaci či k snížení životnosti materiálu. [20;24]

3.2.3 Mechanické poškození (např. nárazy, škrábance)

Mechanické poškození zahrnuje viditelné i skryté vady, které vznikají při působení vnějších sil na kompozitní materiály během jejich provozu. Ačkoliv se jedná o běžné typy vad, mohou mít závažné dopady na mechanické vlastnosti a celkovou životnost materiálu. Poškození může být povrchové (např. škrábance), které oslabují estetické vlastnosti a mohou sloužit

jako iniciátory dalších defektů. Hlubší poškození, jako jsou praskliny nebo vrstvené defekty (např. delaminace), ovlivňuje vnitřní strukturu kompozitu a výrazně snižuje jeho pevnost a tuhost. Následkem nárazu může být i tzv. „skryté poškození“, které není pouhým okem viditelné, ale narušuje mechanickou celistvost materiálu. [25]

3.2.4 Tepelné poškození (např. termální degradace)

Tepelné poškození je jedním z největších problémů, kterým mohou kompozitní materiály čelit během provozu. Tento typ degradace nastává v důsledku vystavení materiálu nevhodným teplotám (přehřátí, nedostatečné chlazení, rychlá změna teplot), které přesahují jeho konstrukční limity. Výsledkem je často snížení mechanických vlastností (změna tuhosti a pevnosti), změna rozměrů (či estetického vzhledu materiálu) nebo dokonce selhání celé struktury. [6;7]

3.2.5 Chemická degradace

Chemická degradace je proces, při kterém dochází k narušení struktury kompozitních materiálů vlivem působení chemických látek nebo agresivního prostředí. Tento typ poškození se nejčastěji projevuje v průmyslových odvětvích, kde jsou kompozity vystaveny chemikáliím, jako jsou kyseliny, zásady, rozpouštědla nebo mořská voda. Důsledkem chemické degradace bývá snížení mechanických vlastností, rozklad matrice nebo poškození vazby mezi matricí a výztuží. [6;7]

Projevy chemické degradace mohou zahrnovat změnu vzhledu materiálu (např. zmatnění či blednutí) nebo tvorbu puchýřků na povrchu. V některých případech může být degradace patrná až po delším období, kdy dojde k výraznému poklesu pevnosti nebo pružnosti materiálu. Mikroskopické vyšetření odhaluje porušení vazeb na úrovni rozhraní matrice a výztuže, případně vznik mikrotrhlin, které mohou dále zhoršovat mechanické vlastnosti. [6;7]

3.3 Vady spojené s environmentálními vlivy

Environmentální vlivy mají významný dopad na vlastnosti a životnost kompozitních materiálů. Mezi hlavní faktory, které způsobují vady, patří vlhkost, UV záření a chemické látky přítomné v prostředí. Tyto vlivy mohou narušit mikrostrukturu materiálů či oslabit vazby mezi matricí a výztuží. Dlouhodobé působení nepříznivých podmínek může vést k předčasnému selhání kompozitů. [1;7;20]

3.3.1 Vliv vlhkosti a absorpce vody

Vlhkost a absorpce vody představují jeden z nejčastějších environmentálních problémů, které ovlivňují vlastnosti kompozitních materiálů. Kompozity, zejména ty s polymerní matricí, mají tendenci absorbovat vodu z okolního prostředí, což vede ke změnám ve struktuře a vlastnostech materiálu. Voda může pronikat do mikrotrhlin nebo do mezifází mezi matricí a výztuží, kde narušuje jejich adhezní vazby. To má za následek snížení pevnosti, tuhosti a únavové odolnosti kompozitu. [6;7]

Absorpce vody způsobuje bobtnání matrice, což vyvolává vnitřní napětí v materiálu. Tato napětí mohou vést ke vzniku nebo zvětšení mikrotrhlin, čímž se dále oslabuje celistvost kompozitu. Projevy vlhkosti na kompozitech zahrnují pokles mechanických vlastností, jako jsou pevnost v tahu a modul pružnosti, což se přímo promítá do omezení jejich životnosti. V některých případech může dojít ke zhoršení estetických vlastností materiálu (např. změna barvy nebo vznik skvrn na povrchu). [6;7]

Prevenčí negativních účinků vlhkosti je použití voděodolných matric (epoxidové systémy s nízkou absorpcí vody) a ochranných povrchových vrstev (gelcoat nebo různé ochranné nátěry). Důležitým opatřením je také správné zpracování kompozitů, které minimalizuje vznik vad, například mezer nebo nedostatečné impregnace vláken. [6;7]

3.3.2 UV degradace

Ultrafialové (UV) záření představuje významný degradační faktor pro kompozitní materiály, zejména ty s polymerní matricí. UV záření má dostatečnou energii na narušení chemických vazeb v matrici, což vede k postupnému zhoršování mechanických a estetických vlastností kompozitu. Tento typ degradace je obzvláště závažný u kompozitů používaných ve venkovním prostředí, kde jsou vystaveny dlouhodobému působení slunečního záření. [6;7]

UV degradace se projevuje řadou vizuálních i strukturálních změn. Mezi nejčastější vizuální příznaky patří zežloutnutí nebo vyblednutí povrchu, ztráta lesku a vznik mikrotrhlin na povrchu kompozitu. Mikrotrhliny nejen narušují estetiku materiálu, ale také vytvářejí cesty pro pronikání vlhkosti a dalších agresivních látek, což dále urychluje celkovou degradaci. U některých typů kompozitů může UV záření způsobit ztrátu adheze mezi matricí a výztuží, což vede k delaminaci a poklesu celkové strukturální integrity. Tento proces je zesílen, pokud je kompozit vystaven dalším faktorům, jako jsou změny teplot nebo mechanické zatížení. [7]

Ochrana kompozitů proti UV degradaci zahrnuje několik přístupů. Nejčastěji se používají UV stabilizátory nebo absorbéry, které se přidávají přímo do polymerní matrice během výroby. Další možností je aplikace povrchových ochranných vrstev, například speciálních nátěrů, gelcoatů nebo fólií, které blokují či odrážejí UV záření. Tyto opatření nejen zvyšují odolnost kompozitů vůči UV záření, ale také prodlužují jejich celkovou životnost. [7]

3.3.3 Koroze nebo interakce s agresivními prostředími

Kompozitní materiály jsou obecně považovány za odolné vůči korozi a chemickému působení ve srovnání s tradičními materiály, jako jsou kovy. Nicméně v některých podmínkách může dojít k poškození i těchto materiálů, zejména v důsledku interakce s agresivními chemikáliemi, solným prostředím, kyselinami, zásadami nebo organickými rozpouštědly. Tyto látky mohou postupně narušit strukturu matrice i vazbu mezi matricí a výztuží. [6;7]

Chemická koroze kompozitů se nejčastěji projevuje ztrátou mechanické pevnosti, delaminací nebo degradací povrchu. Polymerní matrice může při dlouhodobém vystavení agresivnímu prostředí nabobtnat, ztratit soudržnost nebo se rozložit na molekulární úrovni. Dalším významným problémem je působení solného prostředí, zejména v pobřežních oblastech nebo při aplikacích, kde je kompozit vystaven posypovým solím. Sůl může pronikat do mikrotrhlin nebo porézních částí materiálu a urychlovat proces degradace. Podobně agresivní prostředí, jako jsou kyselé deště nebo průmyslové emise, mohou postupně snižovat životnost kompozitních konstrukcí. [6;7]

Ochrana proti korozi a chemickému poškození spočívá především v prevenci. Používají se speciální ochranné vrstvy, jako jsou chemicky odolné nátěry, gelcoaty nebo fólie, které zabraňují přímému kontaktu agresivních látek s kompozitem. Dále je možné optimalizovat složení matrice, například volbou chemicky odolnějších pryskyřic nebo aditiv, která zvyšují odolnost materiálu vůči konkrétním chemickým látkám. [6;7]

4 VYTVRZOVÁNÍ PRYSKYŘIC V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH

Vytvrzování pryskyřic je zásadní proces při výrobě kompozitních materiálů. Ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti, tepelnou odolnost a celkovou kvalitu materiálu. Tento proces spočívá v přeměně kapalné pryskyřice na pevnou síťovanou strukturu, která zajišťuje spojení výztužných vláken a dodává materiálu požadované vlastnosti. Vytvrzování může probíhat různými způsoby v závislosti na typu použité pryskyřice a technologii vytvrzování. [9]

4.1 Rozdělení vytvrzovacích pryskyřic

Vytvrzovací pryskyřice se dělí na dvě hlavní skupiny podle svého chemického složení a způsobu vytvrzování: [9]

- a) **Epoxidové pryskyřice** – Vytvrzují se chemickou reakcí s tvrdidly (např. aminy nebo anhydridy) a obvykle vyžadují vyšší teplotu pro úplné vytvrzení. Vyznačují se vysokou pevností, houževnatostí, odolností vůči chemikáliím a nízkým smrštěním během vytvrzování. Mají o něco větší viskozitu než polyesterové pryskyřice.
- b) **Polyesterové pryskyřice** – Používají se běžně v kombinaci s peroxidovými iniciátory (např. MEKP = methyl ethyl keton peroxid), které spouštějí polymerizaci. Jsou cenově dostupnější než epoxidové pryskyřice, ale vykazují vyšší smrštění a nižší mechanickou pevnost.

4.2 Základní vlastnosti pryskyřic

Používané pryskyřice mají několik klíčových parametrů, které ovlivňují jejich zpracování a konečné vlastnosti kompozitu: [9]

- **Doba gelace** – Časový interval, během kterého dochází k přechodu pryskyřice z kapalného do gelového stavu. Tento parametr je důležitý pro určení vhodného času na manipulaci s materiálem.
- **Viskozita** – Udává míru odporu pryskyřice vůči toku. Nižší viskozita umožňuje lepší impregnaci výztužných vláken, zatímco vyšší viskozita zajišťuje vyšší tloušťku vrstvy a snazší kontrolu procesu nanášení.
- **Exotermická reakce** – Během vytvrzování pryskyřic dochází k uvolňování tepla. Nadměrné teplo může vést k nežádoucím deformacím nebo tvorbě vnitřního pnutí v materiálu.

4.3 Způsoby vytvrzování pryskyřic

Správná volba pryskyřice a metody vytvrzování je klíčová pro dosažení požadovaných vlastností kompozitního materiálu. Každý způsob vytvrzování má své specifické výhody i omezení, které je nutné brát v úvahu při návrhu a výrobě kompozitních dílů. Existují různé metody vytvrzování pryskyřic v závislosti na typu použitého materiálu a požadovaných vlastnostech finálního výrobku: [9]

- **Chemické vytvrzování** – Probíhá prostřednictvím chemické reakce s tvrdidly, která iniciují polymerizaci a síťování pryskyřice. Používá se u epoxidových a polyesterových systémů.
- **Tepelné vytvrzování** – Vytvrzování za zvýšené teploty zajišťuje lepší mechanické vlastnosti a zkracuje dobu vytvrzení. Často se využívá v autoklávech nebo pecích.
- **UV vytvrzování** – Používá se pro speciální na světlo citlivé pryskyřice (např. epoxidové), které reagují na UV záření. Tato metoda umožňuje velmi rychlé vytvrzení, ale vyžaduje přístup světla ke všem částem materiálu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a popsat efektivní postup opravy drobných povrchových vad kompozitních materiálů s využitím vytvrzovacích pryskyřic, konkrétně systému vytvrzovaného pomocí UV záření. Práce si klade za cíl zhodnotit možnosti tohoto způsobu opravy z hlediska rychlosti, přesnosti a praktické použitelnosti při minimálním technologickém zázemí. Současně je záměrem práce představit výhody a omezení této metody ve srovnání s běžnými způsoby oprav kompozitů.

Součástí práce je rovněž shrnutí teoretických poznatků týkajících se kompozitních materiálů, jejich výroby, vad a způsobů vytvrzování pryskyřic. Na základě těchto informací je poté v experimentální části navržen konkrétní technologický postup opravy povrchových defektů s použitím UV pryskyřice a ověření jeho funkčnosti na praktickém vzorku.

Cíle bakalářské práce můžeme shrnout do následujících bodů:

I. Teoretická část bakalářské práce:

- Popis základních vlastností a využití kompozitních materiálů.
- Rozbor základních způsobů výroby kompozitních materiálů
- Přehled nejčastějších vad kompozitů, jejich příčin a důsledků.
- Charakteristika základních typů pryskyřic a jejich vytvrzovacích metod.

II. Experimentální část bakalářské práce:

- Návrh technologického postupu pro opravu drobných povrchových vad kompozitních materiálů pomocí UV vytvrzovacích pryskyřic.
- Praktické ověření tohoto postupu na vybraných vzorcích kompozitních materiálů.
- Vyhodnocení výsledků opravy z hlediska kvality výsledného povrchu a funkčnosti opravené plochy.

6 EXPERIMENTÁLNÍ OPRAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Tato kapitola se zaměřuje na praktickou část bakalářské práce, ve které je prověřena možnost opravy drobných povrchových vad kompozitních materiálů pomocí UV vytvrzovacích pryskyřic. Cílem experimentu je ověřit účinnost zvoleného postupu opravy, zhodnotit kvalitu opravených povrchů a posoudit případná omezení nebo výhody této technologie. Součástí praktické části je návrh technologického postupu, výběr a příprava vhodných zkušebních vzorků, výběr způsobu opravy, samotná realizace oprav a následné vyhodnocení kvality povrchů po vytvrzení.

6.1 Návrh technologického postupu opravy

Pro experimentální opravu kompozitních materiálů byla zvolena metoda využívající UV vytvrzovací pryskyřici, která umožňuje rychlé a cílené lokální opravy povrchových vad bez nutnosti rozsáhlého vybavení a dlouhých vytvrzovacích časů. Při návrhu technologického postupu byly zohledněny zejména jednoduchost aplikace, dostupnost pomůcek a možnost snadného vyhodnocení výsledků.

Navržený technologický postup zahrnuje následující kroky:

1. Příprava opravovaného povrchu

- Odstranění nečistot a případného uvolněného materiálu z oblasti defektu pomocí brusného papíru a čistého hadříku.
- Odmaštění povrchu (např. technickým lihem) před aplikací pryskyřice.
- Případné zdrsňení okolní plochy pro lepší přilnavost pryskyřice.

2. Aplikace UV vytvrzovací pryskyřice

- Nanesení vhodného množství pryskyřice do místa defektu pomocí párátka, špendlíku či vatové tyčinky podle velikosti a charakteru vady.
- Zajištění rovnoměrného rozprostření pryskyřice v místě opravy.

3. Vytvrzení pomocí UV záření

- Osvit opraveného místa UV lampou ze vzdálenosti přibližně 1–2 cm po dobu stanovenou výrobcem pryskyřice (orientačně 60–120 sekund).

- Kontrola průběhu vytvrzení a případné doplnění pryskyřice v případě nerovností či propadnutí.

4. Opracování opraveného povrchu

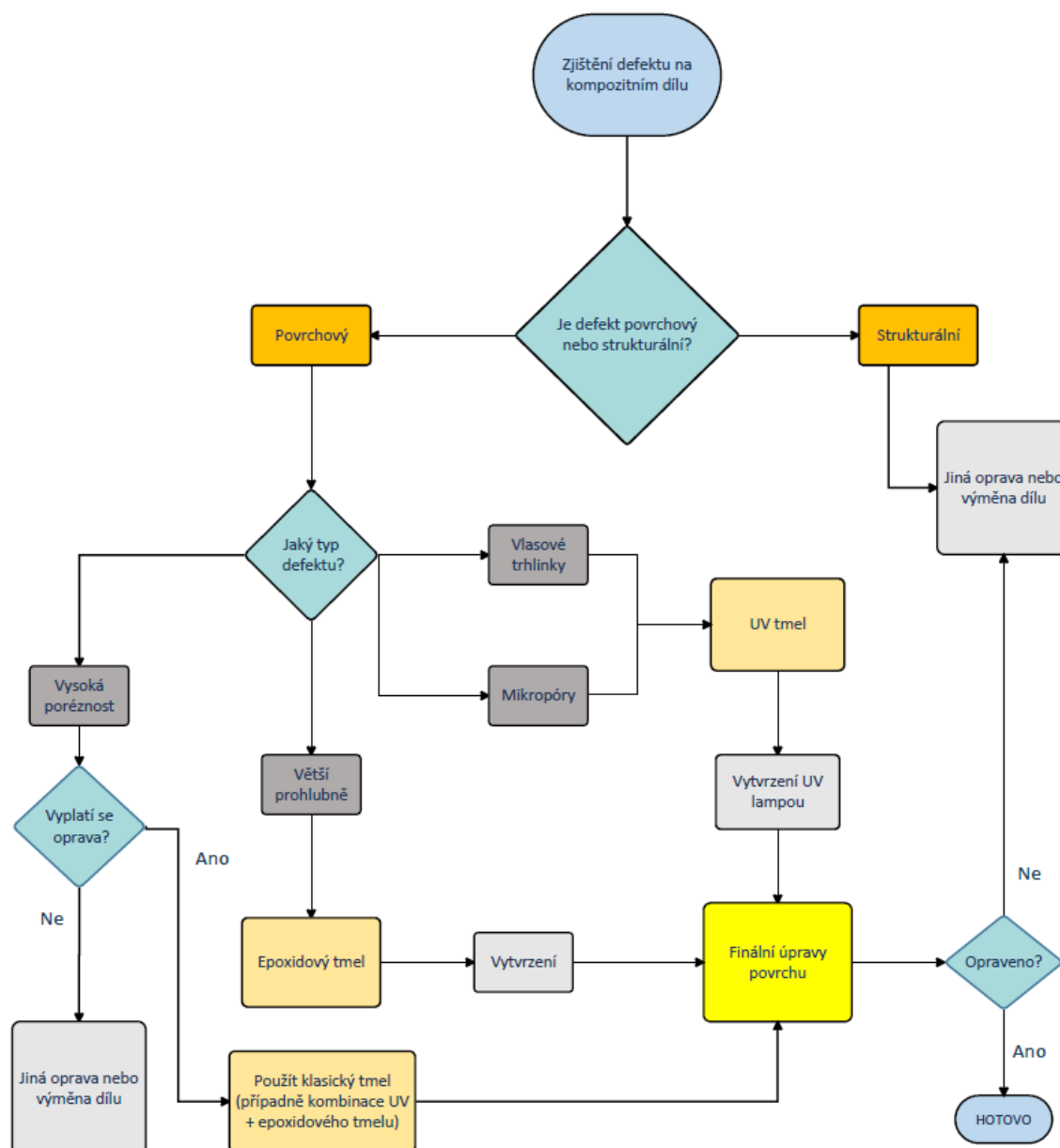
- Po vytvrzení zarovnání povrchu brusným papírem odpovídající zrnitosti.
- Finální kontrola povrchové kvality vizuálně i pohmatem.

Navržený postup umožňuje efektivní lokální opravy zejména drobných trhlin, vrypů, bublin nebo pórů na kompozitních materiálech a lze jej využít jak v dílenských podmínkách, tak přímo v provozu při údržbě kompozitních dílů. Pro přehlednější znázornění volby konkrétního postupu opravy byl dále sestaven vývojový diagram, který je uveden v následující kapitole.

6.1.1 Vývojový diagram volby postupu opravy

Před samotným provedením opravy kompozitního dílu je vhodné provést posouzení typu a rozsahu defektu, na jehož základě se určí vhodný postup opravy. Za tímto účelem byl sestaven vývojový diagram (obrázek č. 26), který přehledně znázorňuje jednotlivé kroky při volbě opravné technologie.

Schéma zohledňuje rozlišení mezi povrchovými a strukturálními vadami a dále rozděluje povrchové defekty dle jejich charakteru na mikropóry, vlasové trhlinky, větší prohlubně a oblasti s vysokou porézností. Pro jednotlivé typy defektů jsou následně doporučeny vhodné postupy opravy, ať už s využitím UV tmelu, epoxidového tmelu, nebo případná kombinace obou technologií.



Obrázek 26 – Vývojový diagram volby postupu opravy

6.2 Použité pomůcky a materiály

Při experimentální opravě byly použity následující pomůcky a materiály:

- **UV vytvrzovací lampa** – přenosná UV lampa (obrázek 27) určená pro vytvrzování pryskyřic (viz technický list v Příloze 1).



Obrázek 27 – Car System UV vytvrzovací lampa

- **UV vytvrzovací pryskyřice** – čirá pryskyřice (obrázek 28) vhodná pro lokální opravy povrchových vad na kompozitních materiálech, s krátkou dobou vytvrzení (viz technický list v Příloze 2).



Obrázek 28 – Car System UV vytvrzovací pryskyřice

6.3 Volba zkušebních vzorků

Pro experimentální opravy byly zvoleny zkušební vzorky, které reprezentují běžně se vyskytující povrchové vady kompozitních materiálů. Vzorky byly rozděleny na dvě základní skupiny – vhodné a nevhodné pro opravu pomocí UV vytvrzování.

6.3.1 Vybrané vzorky vhodné pro opravu

Mezi vzorky vybrané k opravě byly zařazeny především kompozitní díly s drobnými povrchovými defekty, jako jsou:

- **Mikrotrhliny a menší praskliny** – umožňující jednoduchou aplikaci pryskyřice a její snadné vytvrzení.
- **Malé důlky a rýhy** – defekty, které nezasahují hluboko do struktury materiálu a lze je tak snadno zaplnit.
- **Oděrky a plošné nerovnosti** – povrchové poškození vhodné pro lokální opravu.



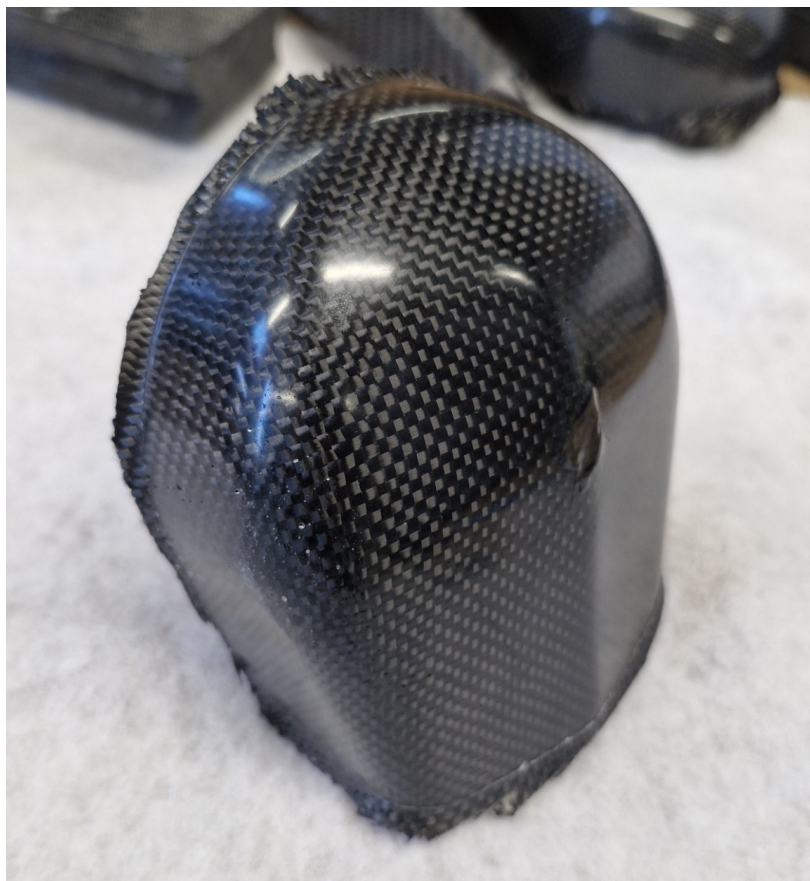
Obrázek 30 – Vzorek č.1



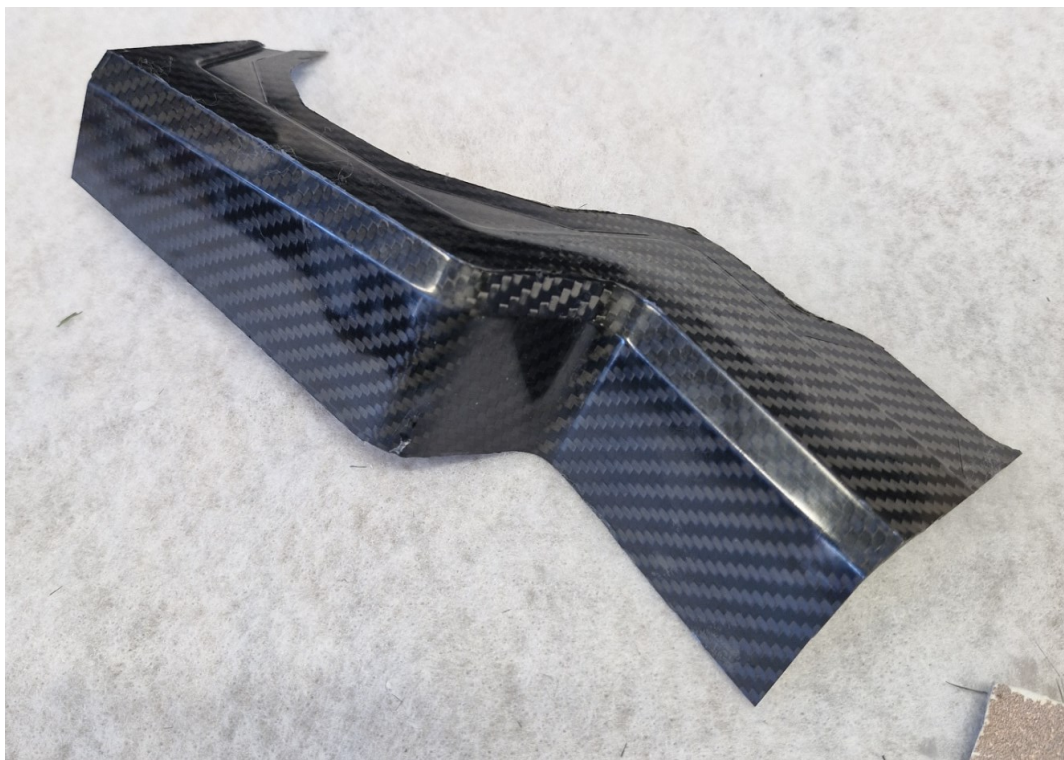
Obrázek 31 – Vzorek č.2



Obrázek 32 – Vzorek č.3



Obrázek 33 – Vzorek č.4



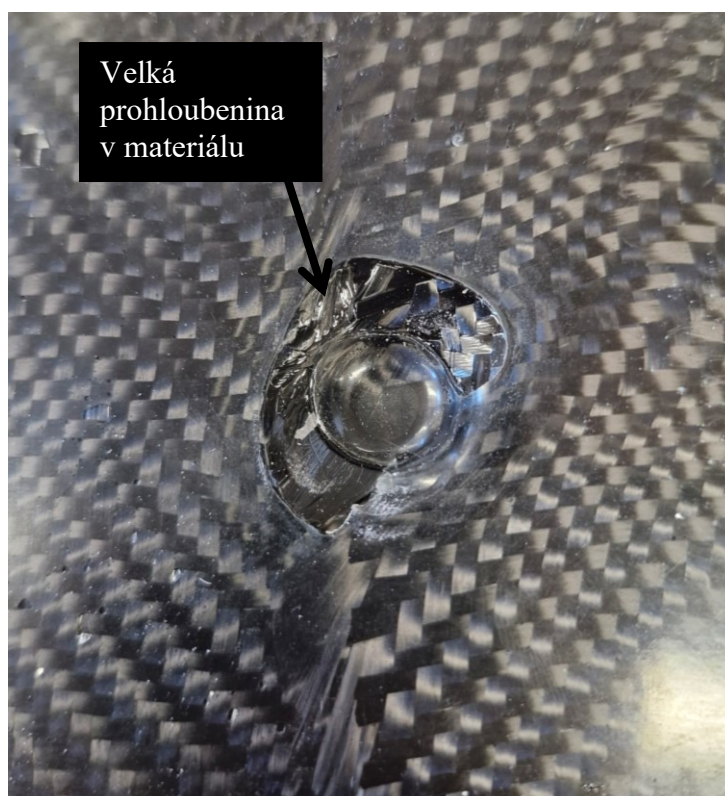
Obrázek 34 – Vzorek č.5

Tyto vzorky byly zvoleny zejména pro jejich dostupnost a reprezentativnost běžných provozních vad na kompozitech.

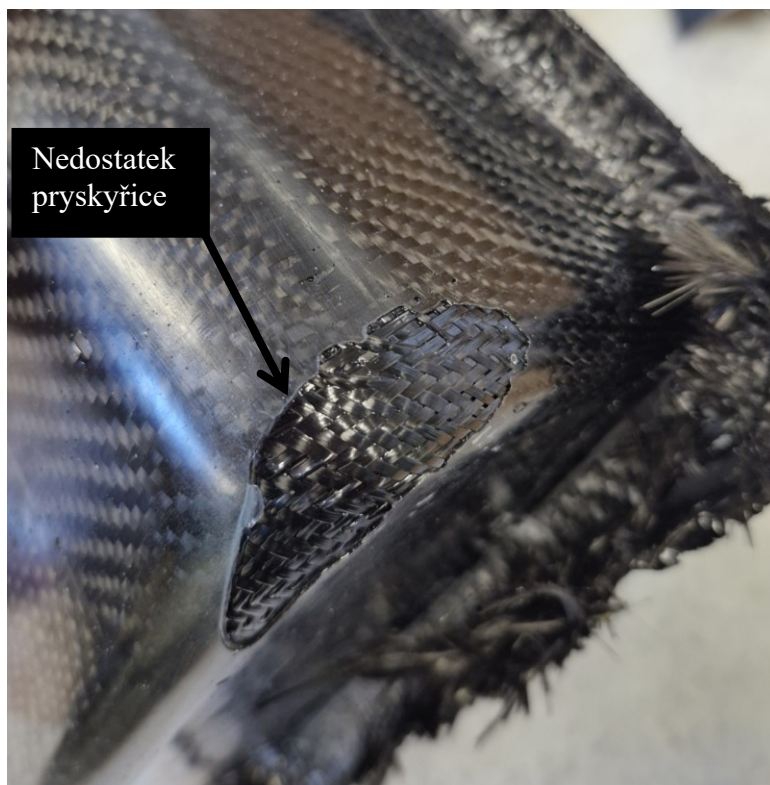
6.3.2 Zkušební vzorky nevhodné pro opravu pomocí UV vytvrzování

Z opravy byly naopak vyloučeny vzorky, u nichž by použití UV vytvrzovací pryskyřice nebylo efektivní nebo technicky možné. Tyto vzorky budou pouze zmíněny a zdůvodněny v rámci hodnocení vhodnosti opravných metod.

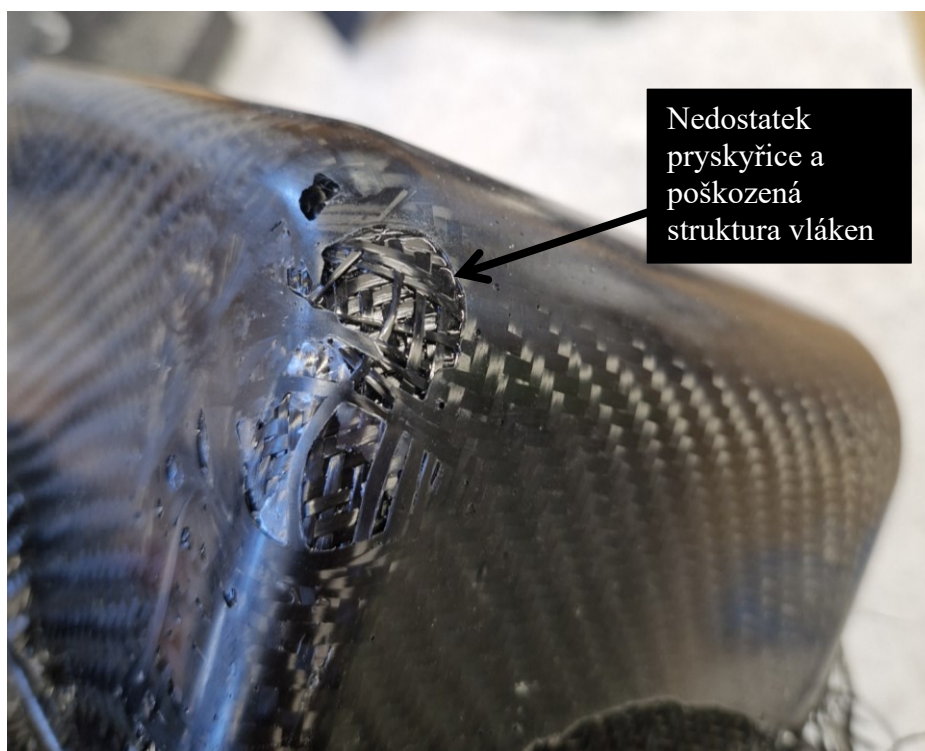
- **Větší praskliny procházející hlouběji do materiálu** – vyžadující komplexnější opravu a použití jiných metod.
- **Defekty v místě delaminování jednotlivých vrstev** – u nichž by lokální aplikace pryskyřice nebyla schopna obnovit původní pevnost materiálu.
- **Vady v těžko přístupných místech s omezeným přístupem světla UV lampy** – kde by nebylo možné zajistit dostatečné vytvrzení.



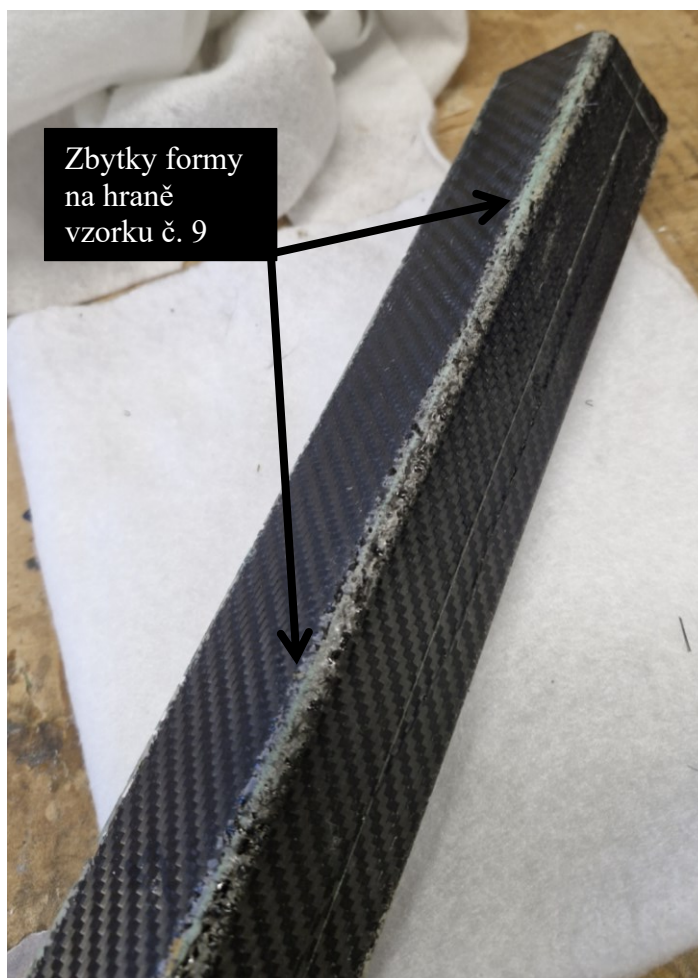
Obrázek 35 – Vzorek č.6



Obrázek 36 – Vzorek č.7



Obrázek 37 – Vzorek č.8



Obrázek 38 – Vzorek č.9

6.4 Volba způsobu opravy jednotlivých vzorků

Na základě charakteru vad a typu kompozitního materiálu byl zvolen jednotný postup opravy pro všechny vybrané vzorky s drobnými povrchovými defekty. Jako nejvhodnější metoda se ukázala lokální aplikace čiré UV vytvrzovací pryskyřice, která umožňuje rychlé a přesné zacelení povrchových vad, a to bez nutnosti složitých technologických zařízení. Zvolený způsob opravy je následující:

- **U drobných mikrotrhlin a povrchových prasklin** – aplikace malého množství pryskyřice přímo do defektu pomocí párátko nebo špendlíku, následné vytvrzení UV lampou.
- **U plošných nerovností a oděrek** – nanesení tenké vrstvy pryskyřice na poškozenou plochu, její rozprostření do roviny (např. vatovou tyčinkou) a následné vytvrzení.

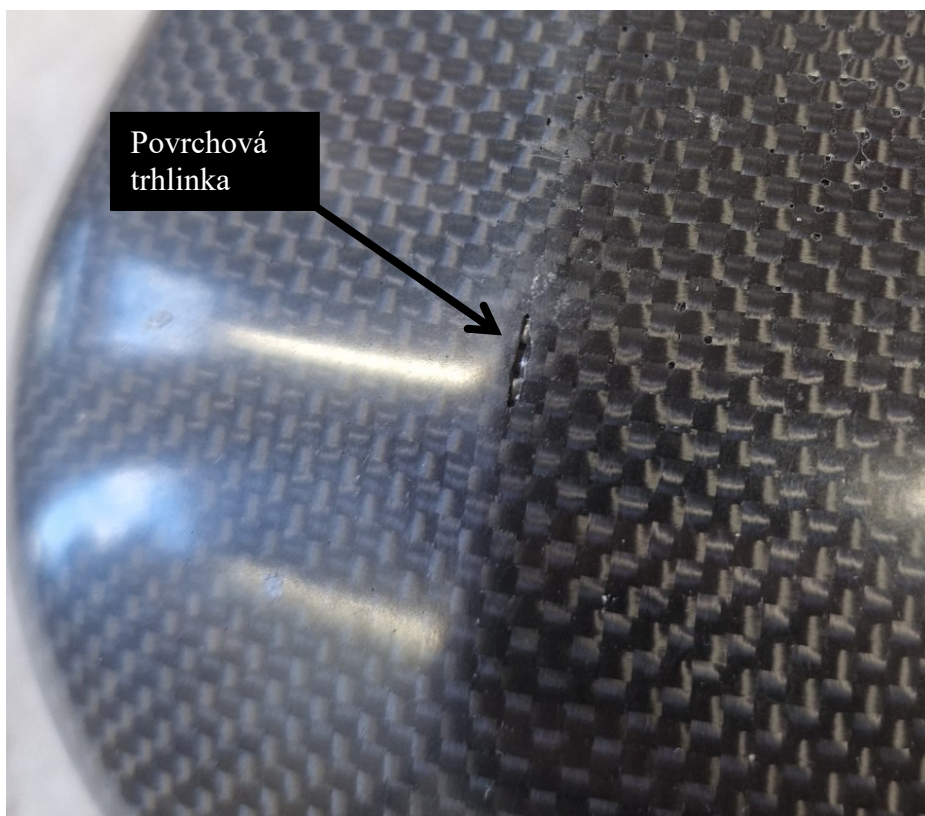
Tento způsob opravy byl zvolen pro svou jednoduchost, dostupnost pomůcek a možnost snadného provedení bez potřeby náročného technologického zázemí.

6.5 Provedení opravy vzorků

Samotná oprava byla rozdělena do tří základních kroků: aplikace pryskyřice na vzorky, její vytvrzení a finální úprava povrchu. U všech vzorků byl použit shodný technologický postup, rozdíl se projevil pouze v množství použitého materiálu a době potřebné k finální úpravě povrchu.

6.5.1 Aplikace pryskyřice na vzorky

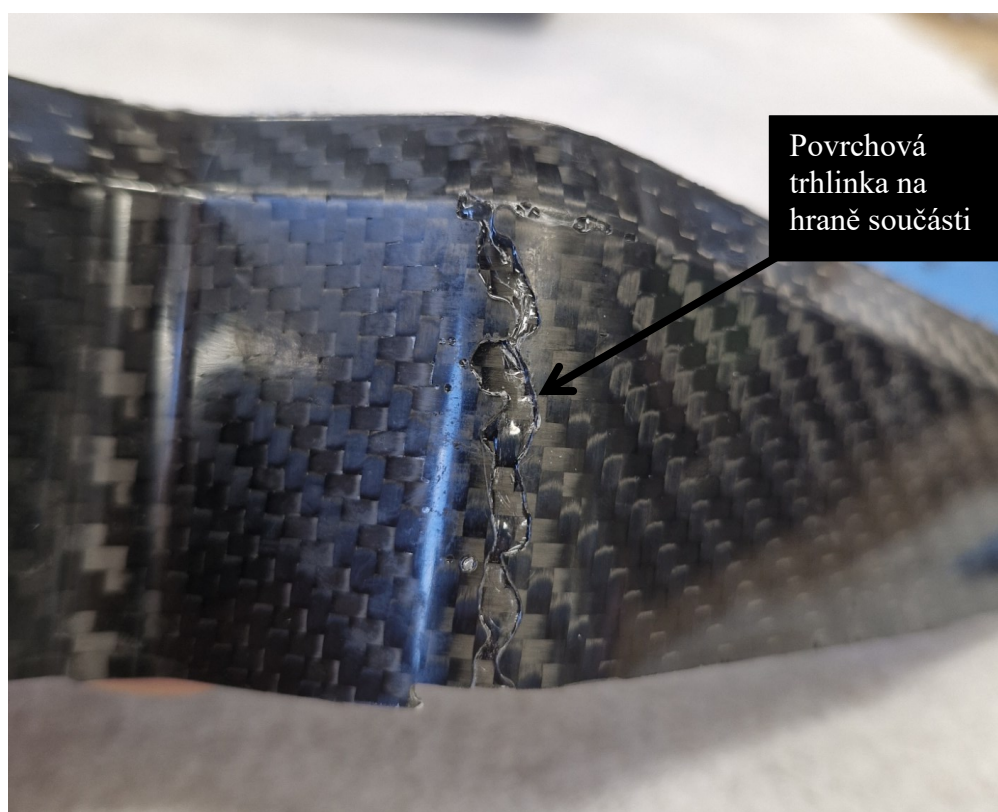
Před aplikací pryskyřice byla povrchová vada na každém vzorku lehce zdrsňena hrubším brusným papírem. Tato povrchová úprava nám následně zajistí lepší přilnutí pryskyřice.



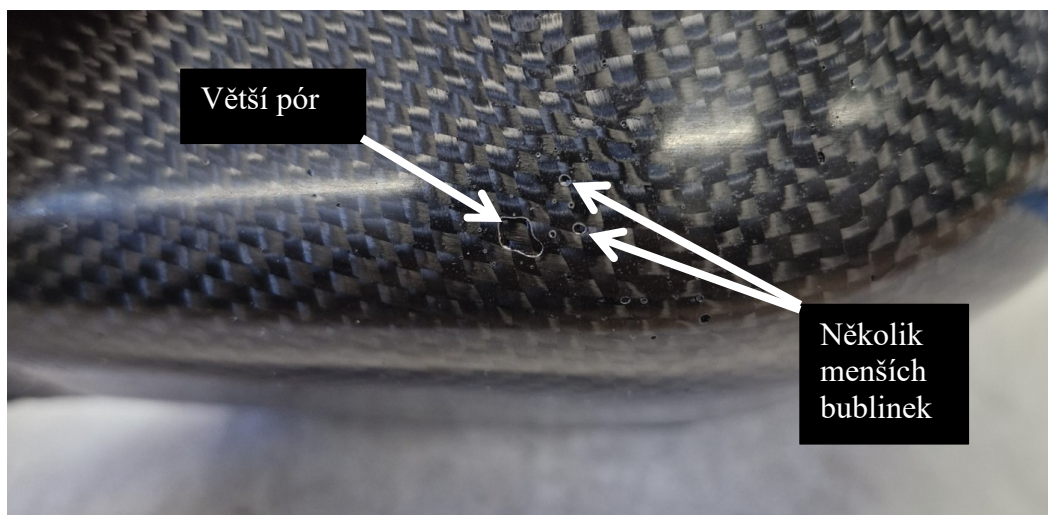
Obrázek 39 – Detail vady vzorku č.1



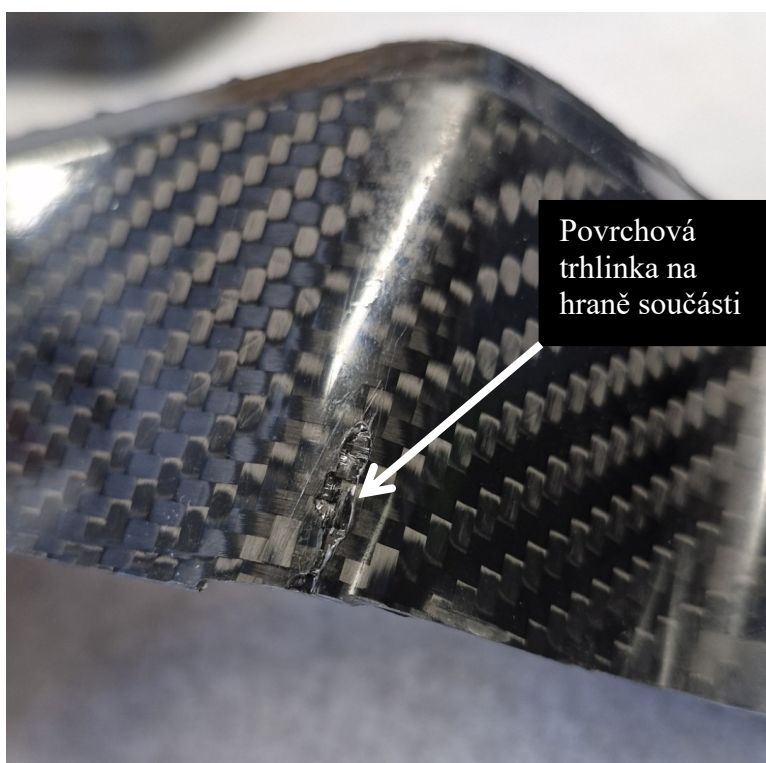
Obrázek 40 – Detail vady vzorku č.2



Obrázek 41 – Detail vady vzorku č.3



Obrázek 42 – Detail vady vzorku č.4



Obrázek 43 – Detail vady vzorku č.5

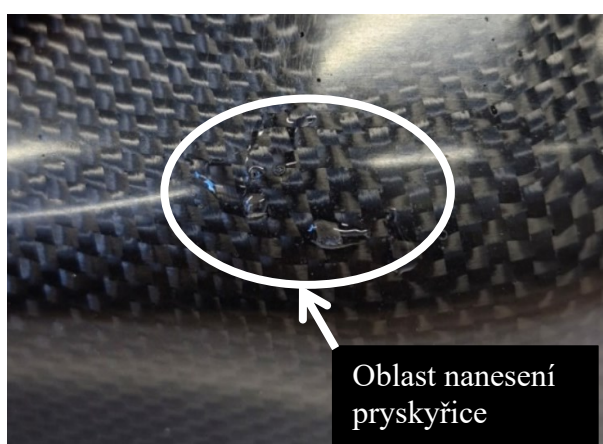
Po zbroušení povrchu vady byla pomocí párátko nebo špendlíku nanесena čirá UV vytvrzovací pryskyřice přímo do místa defektu. U hlubších nerovností (vzorek č.3) byl materiál aplikován ve dvou vrstvách. Po nanесení byla pryskyřice rozprostřena tak, aby co nejlépe vyplnila celý defekt a mírně přesahovala opravovanou vadu.



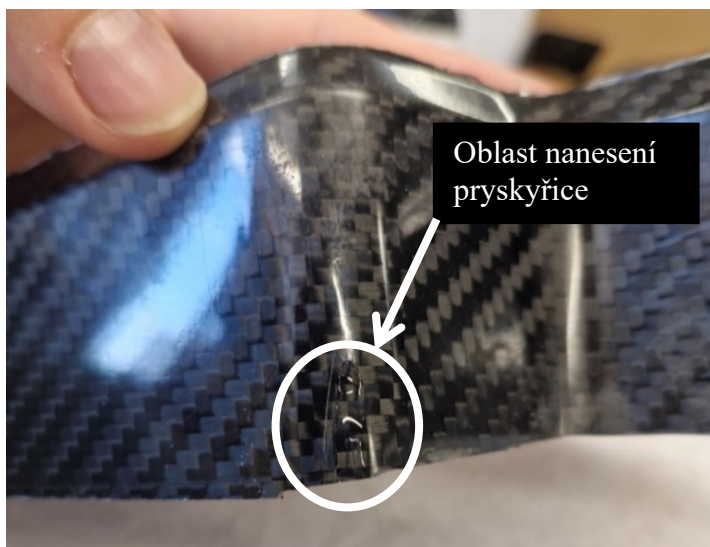
Obrázek 44 – Nanesená pryskyřice na vzorku č.2



Obrázek 45 – Nanesená druhá vrstva pryskyřice na vzorku č.3



Obrázek 46 – Nanesená pryskyřice na vzorku č.4



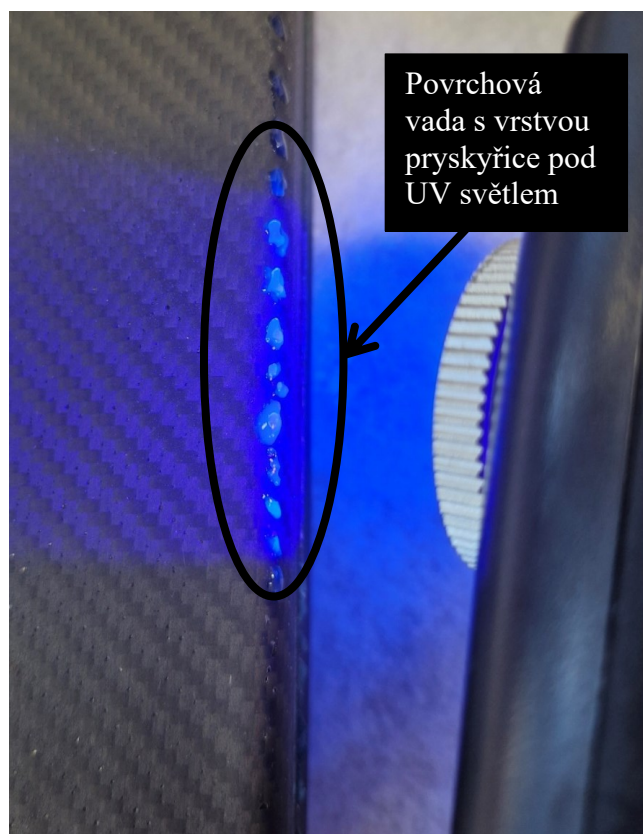
Obrázek 47 – Nanesená pryskyřice na vzorku č.5

6.5.2 Vytvrzení pryskyřice

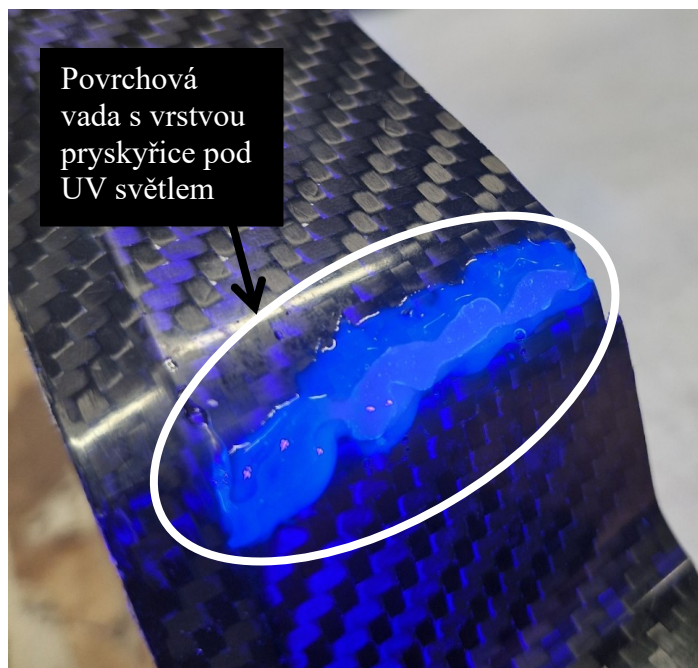
Aplikovaná pryskyřice byla následně vytvrzena pomocí přenosné UV lampy (obrázek č.27). Vzorek byl vystaven UV záření po dobu 1 minuty dle doporučení výrobce, uvedeného v technickém listu pryskyřice (Příloha 2). U vzorku č. 3 byly obě vrstvy pryskyřice vytvrzeny samostatně, aby bylo dosaženo optimální pevnosti a kvality opravy.



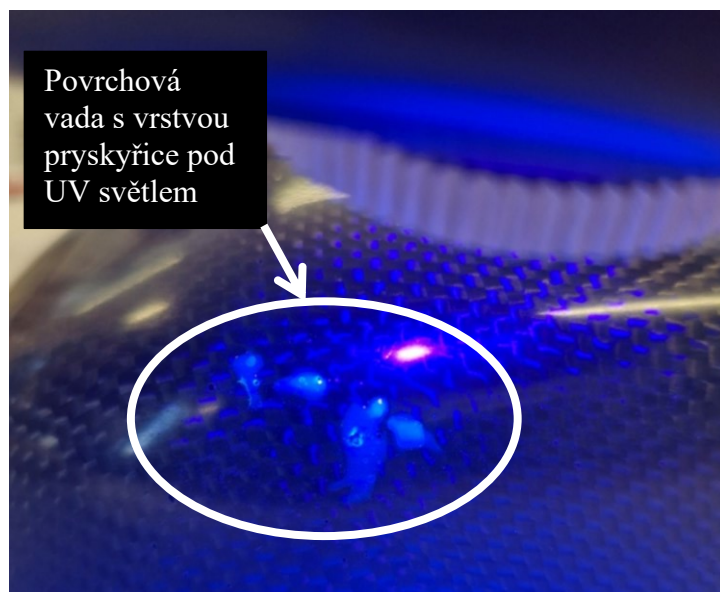
Obrázek 48 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 1



Obrázek 49 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 2



Obrázek 50 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 3



Obrázek 51 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 4



Obrázek 52 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 5

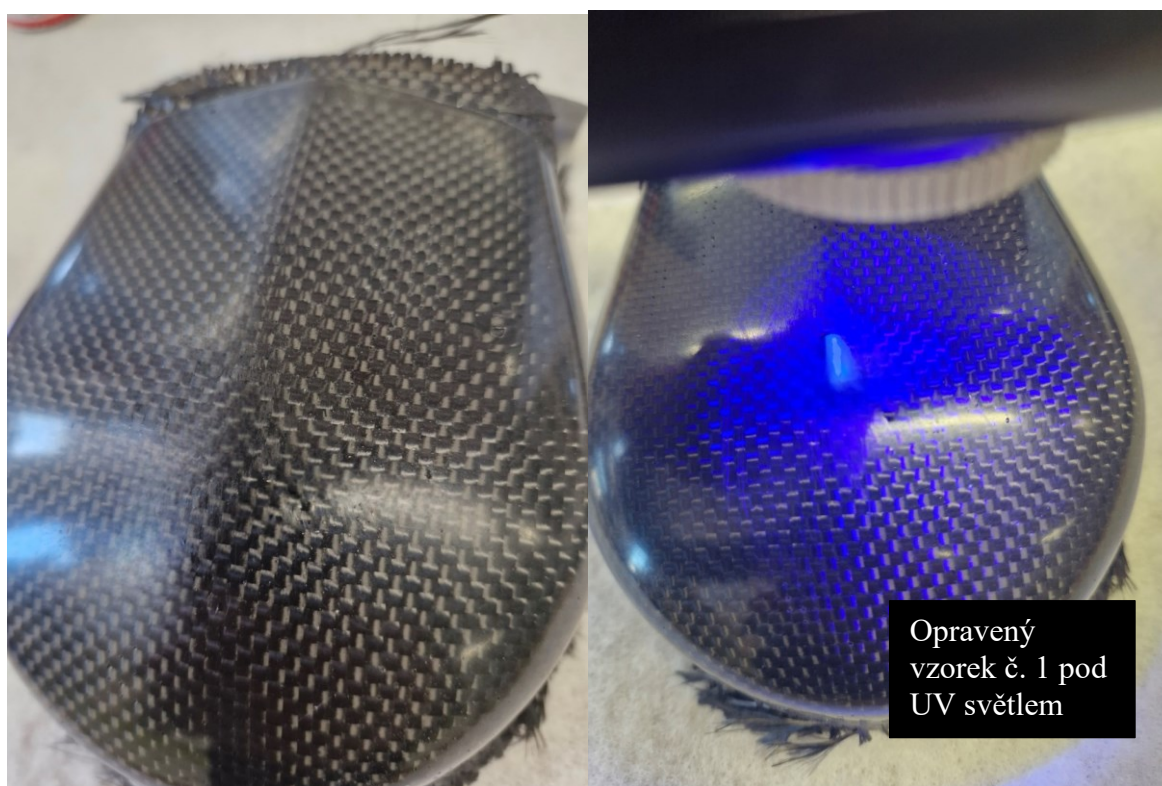
6.5.3 Finální úpravy opraveného povrchu

Po dokončení vytvrzení pryskyřice je nezbytné provést finální úpravy opraveného povrchu tak, aby byla zajištěna nejen jeho funkčnost, ale i estetická kvalita. V této fázi dochází především k zarovnání povrchu a odstranění případných nerovností, které mohly vzniknout během aplikace nebo vytvrzování pryskyřice.

Nejprve je povrch opraveného místa obroušen středně jemným brusným papírem zrnitosti P600, kterým se odstraní drobné nerovnosti a povrch se připraví na další jemnější opracování. Pro dosažení rovnoměrného a hladkého povrchu je poté použit jemný brusný papír P1000. V závěrečné fázi je opravené místo přebroušeno velmi jemným brusným

papírem P2000, který zajišťuje hladký, opticky sjednocený povrch bez viditelných přechodů mezi původním materiálem a místem opravy.

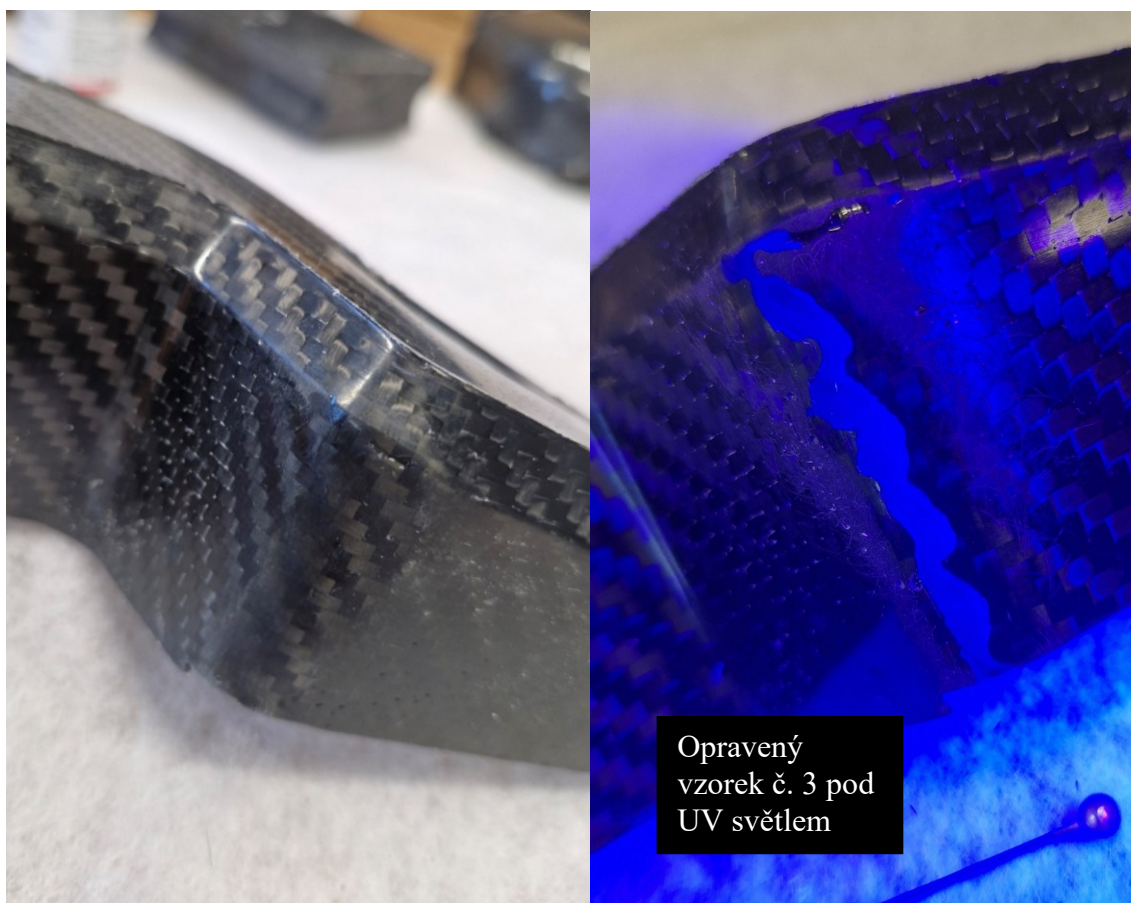
Kromě broušení se podle potřeby provádí také leštění povrchu, a to buď ručně, nebo pomocí lešticí pasty a jemné tkaniny. Leštěním se zvýší lesk povrchu a odstraní se drobné škrábance, které mohly vzniknout během předchozího broušení. V některých případech může být finální úprava zakončena nanesením ochranného nátěru nebo transparentního laku, zejména pokud je povrch vystaven vyšší mechanické nebo chemické zátěži.



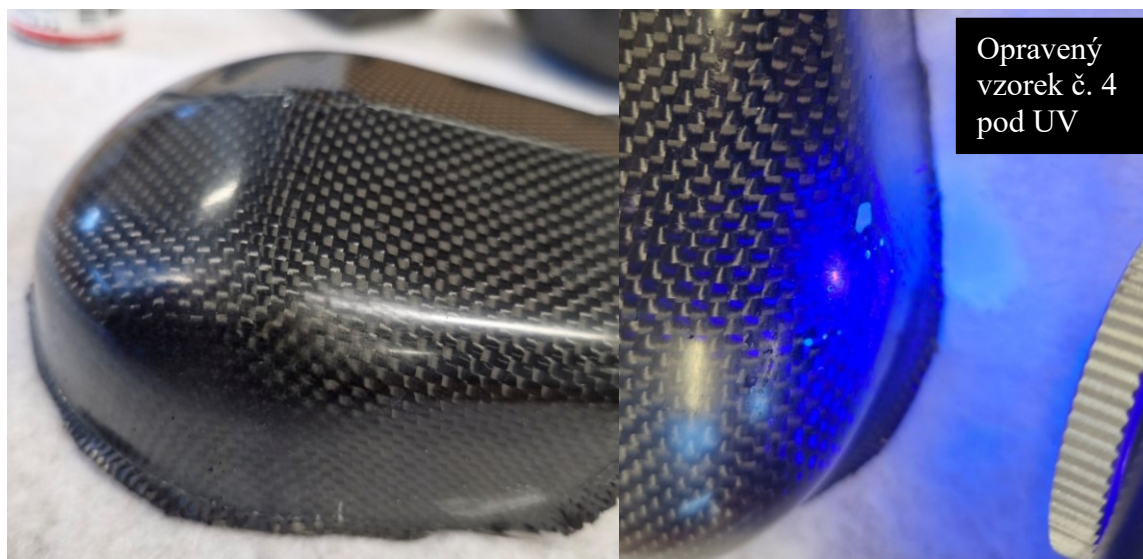
Obrázek 53 – Opravený vzorek č. 1



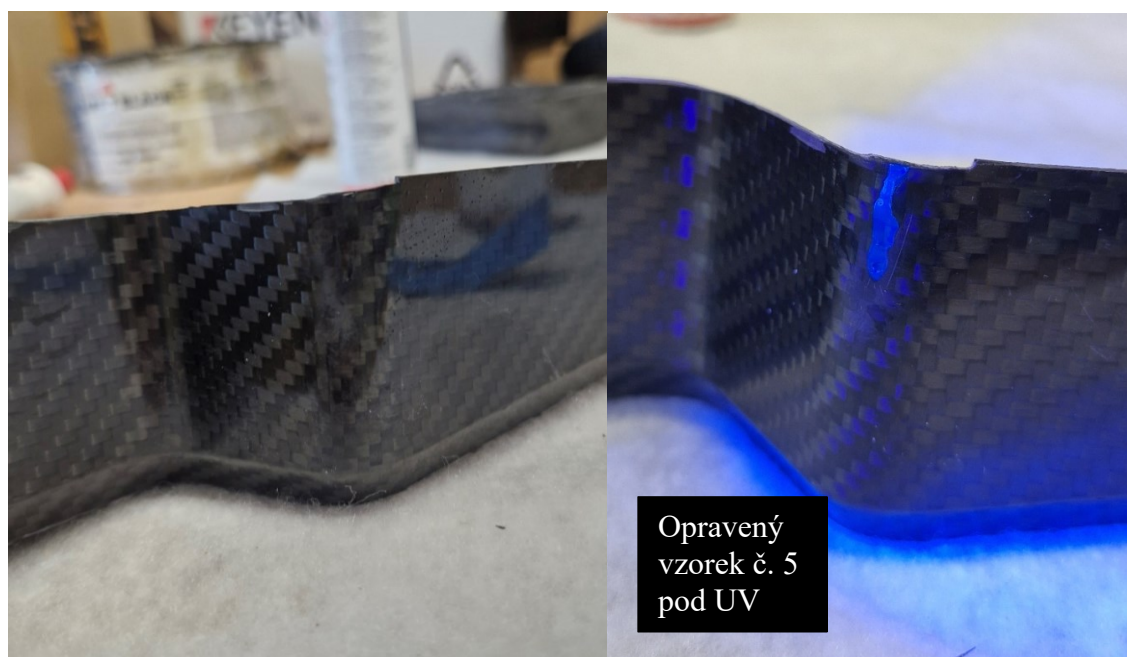
Obrázek 54 – Opravený vzorek č. 2



Obrázek 55 – Opravený vzorek č. 3



Obrázek 56 – Opravený vzorek č. 4



Obrázek 57 – Opravený vzorek č. 5

Cílem těchto finálních úprav bylo, aby opravené místo vizuálně i funkčně co nejlépe odpovídalo původnímu stavu materiálu. Správně provedená finální úprava přispívá k prodloužení životnosti opraveného dílu a minimalizuje riziko vzniku dalších defektů v místě opravy.

6.6 Zhodnocení kvality opravených povrchů

Po dokončení opravy všech vybraných vzorků byla provedena kontrola a hodnocení kvality výsledných povrchů. Cílem bylo ověřit, zda zvolený postup a použité materiály vedly k odstranění vad a dosažení požadované povrchové úpravy. Hodnocení probíhalo vizuální kontrolou, kontrolou hladkosti povrchu a srovnáním s původním stavem před opravou.

6.6.1 Kontrola povrchu

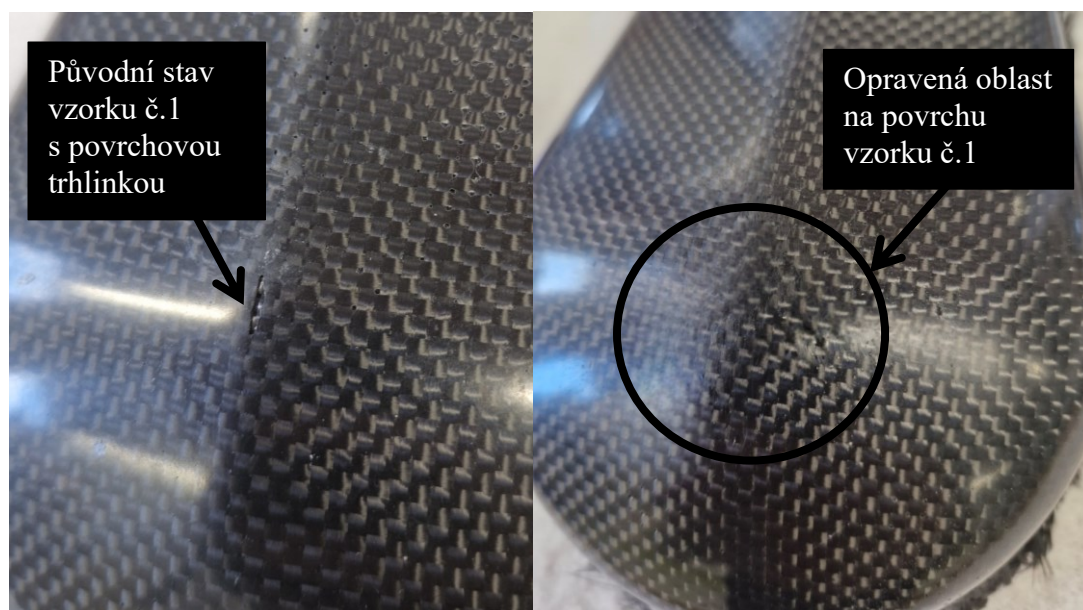
Každý opravený vzorek byl nejprve podroben vizuální kontrole za denního světla a následně i pod umělým osvětlením. Posuzováno bylo:

- zda byla povrchová vada kompletně vyplněna,
- zda opravené místo nevytváří viditelné nerovnosti nebo odchylky oproti okolní ploše,
- zda nedošlo k tvorbě bublin, trhlinek či jiných defektů v opravené oblasti.

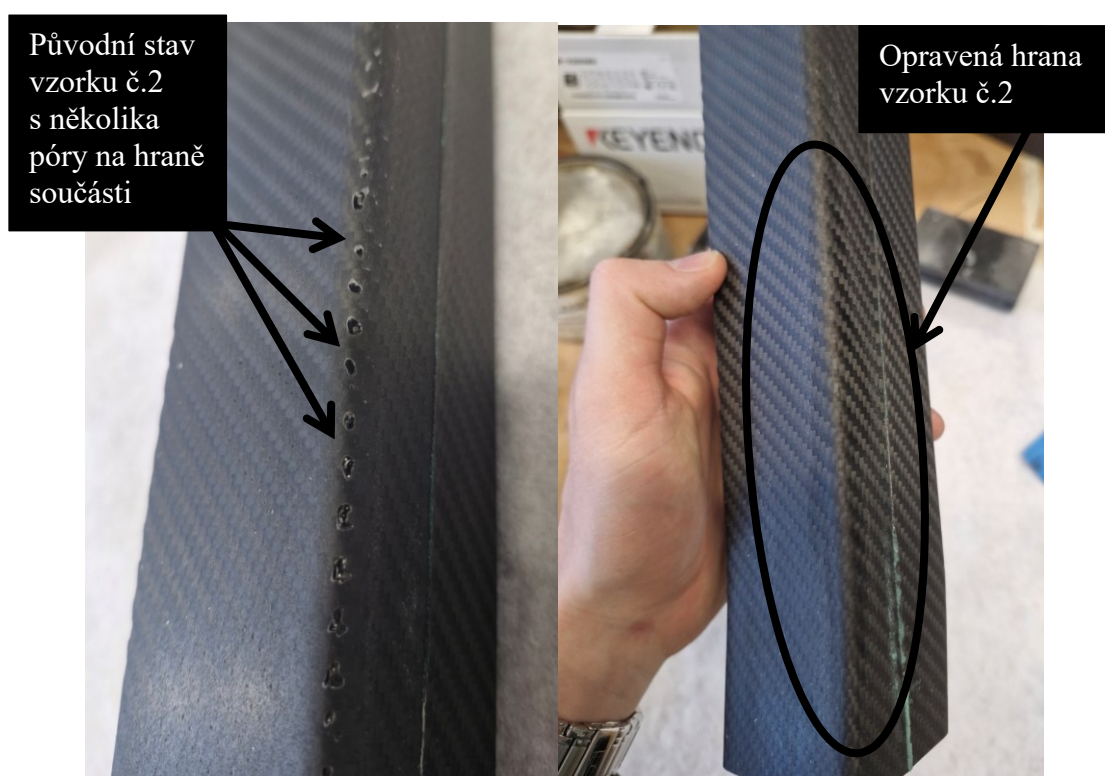
Součástí kontroly byla také kontrola hladkosti povrchu dotykem, kdy byl povrch jemně přejet prstem, aby bylo možné zjistit případné nerovnosti nebo ostré hrany po broušení. Ve všech případech bylo dosaženo vizuálně a hmatově uspokojivého výsledku.

6.6.2 Porovnání stavu vzorků před a po opravě

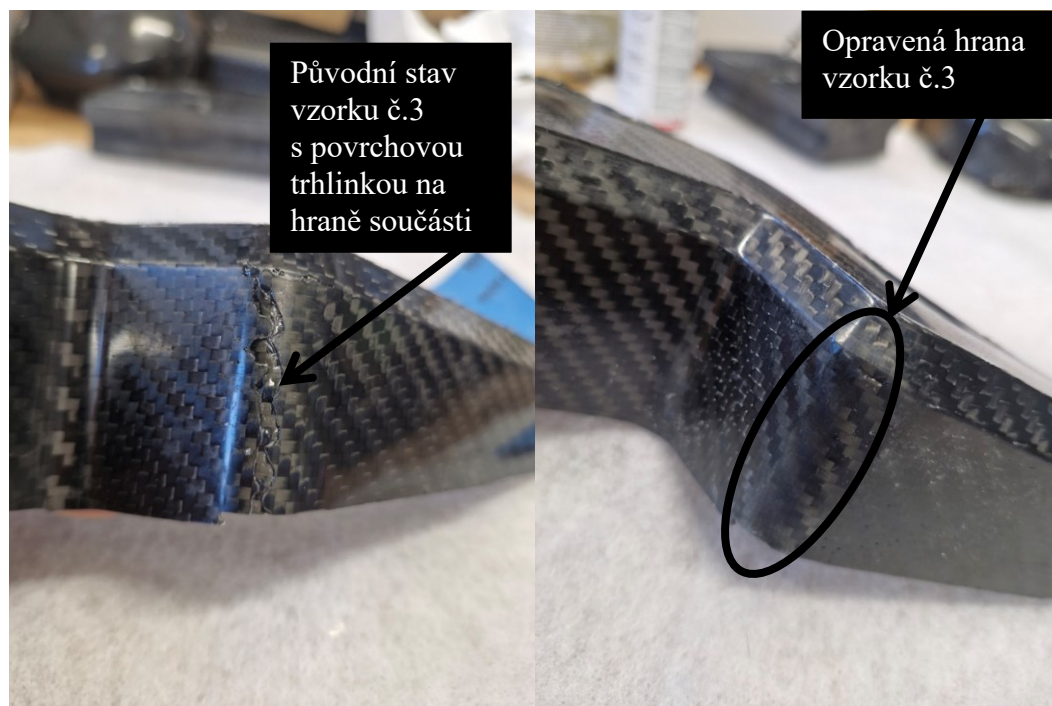
V této části jsou jednotlivé zkušební vzorky porovnány ve stavu před provedením opravy a po jejím dokončení. U každého vzorku jsou uvedeny fotografie dokumentující původní poškození povrchu a stav po aplikaci UV vytvrzovací pryskyřice a následné povrchové úpravě.



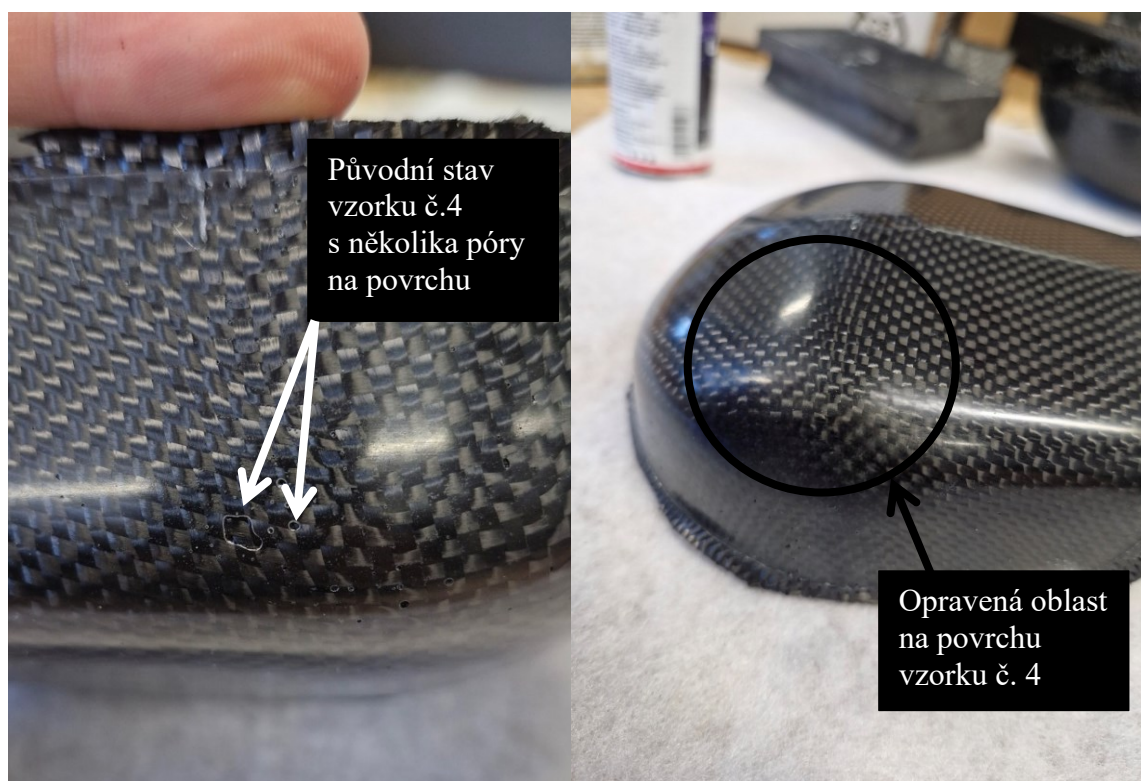
Obrázek 58 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 1



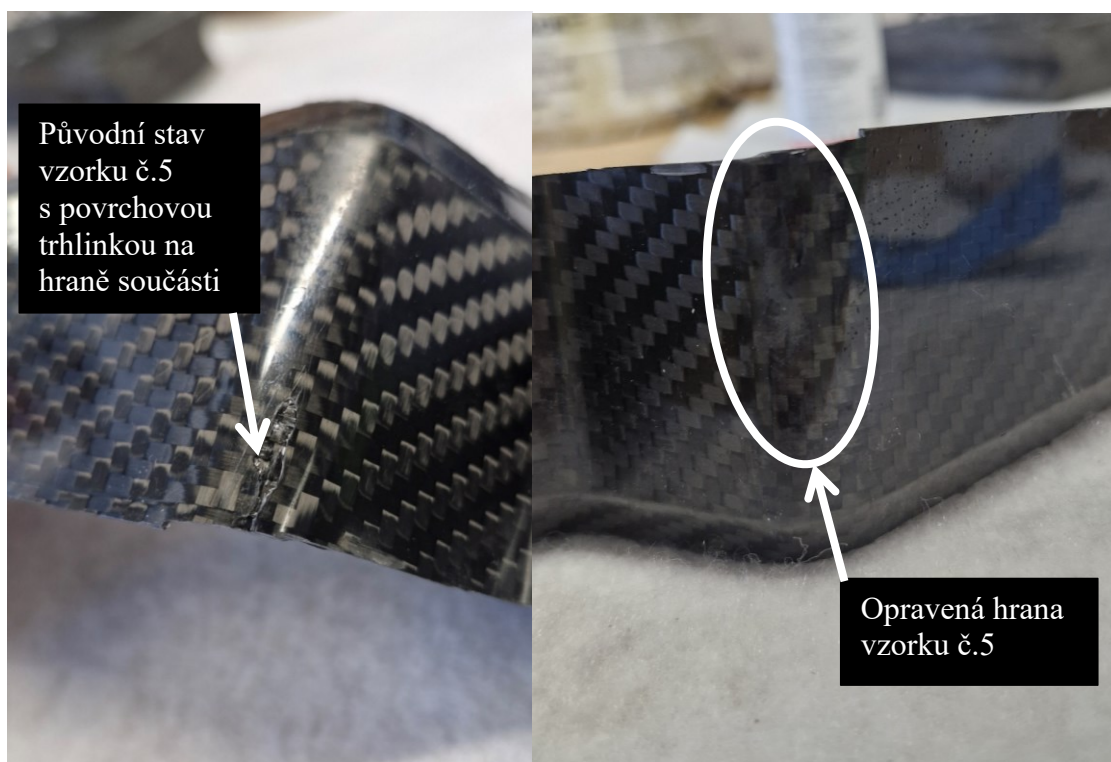
Obrázek 59 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 2



Obrázek 60 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 3



Obrázek 61 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 4



Obrázek 62 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 5

6.6.3 Celkové zhodnocení úspěšnosti opravy

Na základě provedené kontroly lze konstatovat, že zvolená metoda opravy drobných povrchových vad pomocí UV vytvrzovací pryskyřice byla ve všech případech úspěšná. Opravené povrchy vykazovaly dobré mechanické i vizuální vlastnosti a splňovaly požadovaná kritéria na hladkost a sjednocení s okolním materiálem.

Výhodou této metody je její rychlost, jednoduchost a možnost provádění bez potřeby složitého technologického zázemí. Nevýhodou zůstává omezené využití u hlubších nebo rozměrnějších vad a u materiálů, které nejsou dostatečně propustné pro UV záření. Tyto limity však byly při výběru vzorků a návrhu postupu zohledněny. Celkové výsledky experimentální části tak potvrdily vhodnost využití UV vytvrzovacích pryskyřic pro rychlé lokální opravy drobných povrchových vad kompozitních materiálů.

7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ OPRAVY

Na základě provedené praktické části lze konstatovat, že oprava drobných povrchových vad kompozitních materiálů pomocí UV vytvrzovacích pryskyřic představuje efektivní a dostupné řešení, zejména pro lokální opravy menších defektů. Metoda se ukázala jako rychlá, přesná a nenáročná na rozsáhlé technologické zázemí, což umožňuje její využití jak v menších dílnách, tak i v průmyslové výrobě.

Výsledky jednotlivých oprav potvrdily, že UV pryskyřice dobře vyplňuje drobné rýhy, škrábance, malé póry a bublinky. Výhodou této metody je její rychlé vytvrzení, které výrazně zkracuje celkový čas opravy ve srovnání s klasickými dvousložkovými systémy nebo tepelným vytvrzováním. Během praktického testování se však ukázalo, že efektivita metody závisí na typu vady a stavu opraveného povrchu.

Specifickou situací jsou povrchy s vysokou porézností, kde dochází k nasávání pryskyřice do drobných pórů. To vyžaduje opakované aplikace, pečlivé broušení a další vytvrzování, což se promítá do výrazného prodloužení času opravy. Typickým příkladem mohou být kompozitní díly s neuzavřenou povrchovou vrstvou, poškozené struktury typu honeycomb, nebo povrchy s rozsáhlými síťovitými prasklinami.

V takových případech je nutné zvážit ekonomickou výhodnost opravy. Zatímco u menších dílů, případně u drahých a těžko dostupných komponentů se i časově náročnější oprava vyplatí, u běžně vyráběných dílů s velkou povrchovou vadou nebo výraznou porézností může být z ekonomického hlediska výhodnější výroba nového kusu. Důležitým faktorem je v těchto situacích nejen čas potřebný k opravě, ale i množství použité pryskyřice, náklady na práci a potřebné vybavení.

Z praktického hlediska se tedy metoda UV vytvrzování nejlépe osvědčila při opravách drobných škrábanců, oděrek, mělkých rýh a menších pórů či bublinek. Zkrátka všude, kde stačí aplikovat vrstvu pryskyřice jednorázově a následně ji rychle vytvrdit. Naopak u porézních povrchů a rozsáhlejších poškození je vhodné pečlivě zvážit, zda bude oprava přínosná, nebo zda není efektivnější výroba nového dílu.

Výhodou této metody zůstává její snadná dostupnost, jednoduchost použití a možnost aplikace i v terénu bez nutnosti složitého zázemí. Přínosná může být nejen pro jednotlivce, například v oblasti hobby výroby nebo údržby, ale i pro firmy zabývající se servisem kompozitních produktů, kde umožní rychlé zásahy bez nutnosti vyřazování drahých dílů z provozu.

Celkové zhodnocení výsledků potvrzuje, že metoda lokální opravy pomocí UV vytvrzovacích pryskyřic má své opodstatněné místo při údržbě a opravách kompozitních materiálů a její efektivita roste úměrně s jednoduchostí a velikostí opravované vady.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat problematiku povrchových vad kompozitních materiálů a navrhnout technologický postup jejich lokální opravy pomocí UV vytvrzovacích pryskyřic. Kompozitní materiály díky svým vlastnostem nacházejí široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích, avšak zároveň vykazují jistou náchylnost k tvorbě defektů během výroby, provozu i v důsledku působení okolního prostředí. Práce proto nejprve zpracovala teoretickou část, která se zaměřila na obecné vlastnosti kompozitů, metody jejich výroby a popis nejčastějších typů vad, včetně jejich příčin a možných důsledků.

V praktické části byl vypracován technologický postup opravy povrchových vad kompozitních vzorků pomocí UV vytvrzovacích pryskyřic. Byly zvoleny vhodné zkušební vzorky, na kterých následně proběhlo samotné opravení vad. Opravené vzorky byly podrobeny vizuální kontrole a celkovému zhodnocení kvality opravených povrchů. Součástí hodnocení bylo rovněž porovnání původního stavu vzorků s výsledkem po opravě.

Z praktické části vyplynulo, že metoda lokální opravy pomocí UV pryskyřic je efektivní zejména u drobných povrchových defektů, jako jsou jemné rýhy, škrábance nebo menší póry a bublinky. Výhodou tohoto postupu je jednoduchost, rychlost aplikace a nenáročnost na technologické vybavení, což umožňuje její využití nejen ve větších firmách, ale i pro drobné zakázkové opravy či údržbu v menších provozech. Naopak u povrchů s vyšším počtem pórů, hlubších nerovností nebo větších plošných poškození se oprava stává časově i materiálově náročnou a ekonomicky méně výhodnou. V takových případech může být pro firmy efektivnější vyrobit díl nový než investovat do zdlouhavé opravy. Metoda se tedy nejvíce osvědčuje u menších vad na viditelných nebo funkčně významných plochách, kde je nutné dosáhnout kvalitního povrchového vzhledu a zároveň zkrátit dobu odstávky.

Bakalářská práce tak naplnila stanovené cíle a přinesla ucelený přehled problematiky oprav kompozitních materiálů s využitím UV vytvrzovacích pryskyřic. Z výsledků vyplývá, že tato metoda má své uplatnění především při opravách drobných vad a v případech, kdy je kladen důraz na rychlost a kvalitu opravy bez nutnosti složitého technologického zázemí. Pro budoucí výzkum by bylo vhodné zaměřit se na možnosti automatizace tohoto procesu nebo testování nových typů UV pryskyřic s lepšími mechanickými vlastnostmi a vyšší odolností vůči vnějším vlivům.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. LIN, Kuen Y. Composite Materials Overview for Engineers [online]. In: William E. Boeing Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, b.r. [cit. 2022-04-19].
2. GAY, Daniel a Suong V. HOA. Composite materials: design and applications. 2nd. ed. Boca Raton: CRC, 2007, xiv, 548 s.: il. ISBN 978-1-4200-4519-2.
3. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
4. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
5. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2002. ISBN 80-7204-248-3.
6. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Online. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/?book=180-polymery>. [cit. 2025-02-26].
7. Ducháček, V., 2006. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 80-7080-617-6.
8. GE Aerospace: GE Aviation Aircraft Engine. Online. In: 2018. Dostupné z: <https://www.stratviewresearch.com/blog/GE-Aviation-opens-Ceramic-Matrix-Composites-CMC-facility-in-Alabama>. [cit. 2024-12-18].
9. CAMPBELL, F. C. Structural Composite Materials. Materials Park (Ohio): ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.
10. *Ruční kladení (hand lay-up)*. Online. In: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. 2019. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/hand-lay-up/>. [cit. 2025-02-18].
11. *Lisování pomocí vakua (vacuum bagging)*. Online. In: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. 2019. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>. [cit. 2025-02-18].

12. GARDINER, Ginger. Composites World: HP-RTM on the rise [online]. 2015 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/hp-rtm-on-the-rise>
13. ALENEZI, Khaled. Behavior of A 3D Reinforced Glass Fiber I-beam Under Three Point Bend Test [online]. 2017 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322750848_Behavior_of_A_3D_Reinforced_Glass_Fiber_I-beam_Under_Three_Point_Bend_Test
14. *Resin Transfer Molding process in aerospace*. Online. In: GRECHO Fiberglass. 2022. Dostupné z: <https://www.grechofiberglass.com/news/what-is-the-characteristic-of-the-resin-transfer-moldingrtm/>. [cit. 2025-04-08].
15. *Navíjení (filament winding)*. Online. In: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. 2020. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>. [cit. 2025-02-18].
16. *Filament Winding Boosts Production Efficiency for Selip*. Online. In: Magnum Venus Products. 2020. Dostupné z: <https://www.mvpind.com/serviceexperience/case-studies/filament-winding-selip/>. [cit. 2025-04-08].
17. Addcomposites [online]. Espoo, Finland, 2021 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/composites-additive-manufacturing-past-present-and-future>
18. *Pultruze (tažení)*. Online. In: Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů. 2019. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>. [cit. 2025-02-18].
19. *Fibre Glass Pultruded Products*. Online. In: Fibre composites. 2005. Dostupné z: <https://www.fibrecomposites.com.au/pultruded.html>. [cit. 2025-04-08].
20. REIFSNIDER, K.L. *Fatigue of Composite Materials*. Volume 4. Elsevier, 2012. ISBN 0444597182, 9780444597182.
21. BELUCZ, Jakub. Delaminace – co to vlastně je? Online. *DPS Elektronika od A do Z*. 04/2017, s. 1. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:51900/delaminace-co-to-vlastne-je->. [cit. 2024-12-18].

22. FARAHANY, Saeed. Investigation on tungsten inert gas welding of in situ Al-15 and 20 Mg 2 Si composites with an Al-Si filler. Online. *JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS*. 2012. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235998082_Investigation_on_tungsten_in_ert_gas_welding_of_in_situ_Al-15_and_20_Mg2Si_composites_with_an_Al-Si_filler. [cit. 2024-12-18].
23. AUSTERMAN, Vera. *Inadequate fiber impregnation at the edges of the preform*. Online. In: ResearchGate. 2022. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/nadequate-fiber-impregnation-at-the-edges-of-the-preform_fig1_359083743. [cit. 2025-02-22].
24. ADALI, Sarp. *Temperature Effect on Mechanical Properties of Carbon, Glass and Hybrid Polymer Composite Specimens*. Online. In: ResearchGate. 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-resin-micro-cracks-of-C-a-and-G-b-composite-specimens_fig4_328822012. [cit. 2025-02-25].
25. EL-HAJJAR, Rani a SHAMS, Seyedmohammad. Effects of scratch damage on progressive failure of laminated carbon fiber/epoxy composites. Online. *ScienceDirect*. 2012. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020740312002676>. [cit. 2025-04-08].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Skelná vlákna.....	14
Obrázek 2 – Uhlíková vlákna.....	15
Obrázek 3 – Aramidová vlákna	15
Obrázek 4 – Dvouproudý motor dopravního letadla firmy GE Aviation [8].....	18
Obrázek 5 – Uhlíkové kompozitní díly – letadlo Boeing 787 [6].....	19
Obrázek 6 – Princip ruční laminace [10]	24
Obrázek 7 – Tvarování jednotlivých vrstev tkaniny a jejich prosycování pryskyřicí pomocí válečku	24
Obrázek 8 – Hotový výrobek před odstraněním přebytečného materiálu	25
Obrázek 9 – Princip metody vakuového sáčku [11]	26
Obrázek 10 – Umístění formy do vakuovacího pytle a následné odsávání vzduchu.....	27
Obrázek 11 – Vložení formy do předehřáté pece a detailní pohled na pohledovou stranu finálního výrobku.....	28
Obrázek 12 – Technologie RTM, upraveno podle [13]	29
Obrázek 13 – Části trupu dopravního letadla vyrobené technologií RTM [14]	30
Obrázek 14 – Princip vinutí vláken [15]	31
Obrázek 15 – Tlaková nádrž vyrobená technologií vinutí vláken [16].....	32
Obrázek 16 – Technologie automatického kladení prepregů, upraveno podle [17]	32
Obrázek 17 – Princip pultruze [18].....	33
Obrázek 18 – Různorodé typy profilů vyrobené pultruzí [19].....	34
Obrázek 19 – Složení jednotlivých vrstev desky [21]	36
Obrázek 20 – Změna barvy desky v místě delaminace [21]	37
Obrázek 21 – Pórovitost na lomové ploše u kompozitu s kovovou maticí [22].....	38
Obrázek 22 – Nedostatečná impregnace vláken na okrajích kompozitu [23].....	39
Obrázek 23 – Laminát při statickém zatížení [20]	40
Obrázek 24 – Laminát po 50 cyklech únavového zatížení [20].....	40
Obrázek 25 – Snímek mikroskopické praskliny pomocí elektronového mikroskopu [24]..	41
Obrázek 26 – Vývojový diagram volby postupu opravy	51
Obrázek 27 – Car System UV vytvrzovací lampa	52
Obrázek 28 – Car System UV vytvrzovací pryskyřice	52
Obrázek 29 – Brusné papíry.....	53
Obrázek 30 – Vzorek č.1.....	54
Obrázek 31 – Vzorek č.2.....	55
Obrázek 32 – Vzorek č.3.....	55

Obrázek 33 – Vzorek č.4	56
Obrázek 34 – Vzorek č.5	56
Obrázek 35 – Vzorek č.6	57
Obrázek 36 – Vzorek č.7	58
Obrázek 37 – Vzorek č.8	58
Obrázek 38 – Vzorek č.9	59
Obrázek 39 – Detail vady vzorku č.1	60
Obrázek 40 – Detail vady vzorku č.2	61
Obrázek 41 – Detail vady vzorku č.3	61
Obrázek 42 – Detail vady vzorku č.4	62
Obrázek 43 – Detail vady vzorku č.5	62
Obrázek 44 – Nanesená pryskyřice na vzorku č.2	63
Obrázek 45 – Nanesená druhá vrstva pryskyřice na vzorku č.3	63
Obrázek 46 – Nanesená pryskyřice na vzorku č.4	63
Obrázek 47 – Nanesená pryskyřice na vzorku č.5	64
Obrázek 48 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 1	64
Obrázek 49 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 2	65
Obrázek 50 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 3	65
Obrázek 51 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 4	66
Obrázek 52 – Vytvrzování pryskyřice pomocí UV lampy na vzorku č. 5	66
Obrázek 53 – Opravený vzorek č. 1	67
Obrázek 54 – Opravený vzorek č. 2	68
Obrázek 55 – Opravený vzorek č. 3	68
Obrázek 56 – Opravený vzorek č. 4	69
Obrázek 57 – Opravený vzorek č. 5	69
Obrázek 58 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 1	71
Obrázek 59 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 2	71
Obrázek 60 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 3	72
Obrázek 61 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 4	72
Obrázek 62 – Porovnání stavu před a po opravě u vzorku č. 5	73

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al_2O_3	oxid hlinitý
BN	nitrid boru
MEKP	methyl ethyl keton peroxid
RTM	vysokotlaké vstřikování
SiC	karbid křemíku
UV	ultrafialové záření

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technický list CS UV Smart Lamp

Příloha P II: Technický list CS UV Clear Coat

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST CS UV SMART LAMP

TECHNICAL DATA SHEET



CS UV Smart Lamp

UV Smart Lamp

V04
01/2019

:: CHARACTERISTIC

The Carsystem UV Smart Lamp is an UV hand lamp which is perfectly suited for drying UV products. Due to the adjustable magnetic foot you can use the accumulated UV lamp even on vertical application areas. Through the hook it is easy to hang up the lamp wherever it is possible.

:: APPLICATION

The CS UV Smart Lamp can be used for the drying of the CS UV Clear. The UV hand lamp is perfectly suited for drying processes of UV products in Spot Repair.

:: PRODUCT DATA

Technical data

Watt:	5 watt
Charging time:	4 hours
Running time:	4,5 hours
Weight:	310 g
Product dimensions:	190x56x29mm
Charge cable:	USB + Charging station
Battery:	3.7V 2.6Ah Li-Ion
Working temperature:	-10 - 40°C
Certificate:	IP65 IK07

:: HANDLING

The UV Smart Lamp is suitable for drying an area with a diameter of 10cm. To use the complete drying area the lamp should be fixed to the car body and bent two steps towards the surface.

The use of the CS UV Smart lamp is only permitted with the use of UV glasses. We can offer you our CS UV glasses (154.263) to provide the needed protection.

Caution:

- Avoid looking directly into the light source
- Do not use the lamp near open flames
- Switch off the lamp when not in use
- Only use this lamp for the purpose it is designed to, all modifications are strictly prohibited
- Protect the charge cable against oil, heat and sharp objects to prevent problems caused by damages

It is prohibited to dispose old devices in household rubbish. The old devices have to be handed over to suitable recycling facilities or returned to the distributor / manufacturer of the product.

If you have further questions about the disposal of the product or the disposal regulations of your country please contact the distributor / manufacturer of the product.

:: SAFETY ISSUES

The before mentioned technical data and information, especially the recommendations for applying and using our products, are based on our current knowledge and experience when applied under normal conditions. In practice, the materials, surfaces or site conditions are so different that no warranty regarding the working results or liability, arising out of any relationship, can be inferred neither from this information nor from a verbal consultation, expect we are charged with intent or gross negligence. In this case the user is obliged to prove that he has informed us about all points required for a proper and promising judgement in writing, in time and completely. Patent rights of any third party are to be observed. Furthermore, our general sales and delivery terms and conditions and the latest Technical Data Sheet, which should be demanded, apply.

Directions for handling and waste disposal are in our Material Safety Data Sheet and the specifications of the Employers Liability Insurance Association for the chemical industry.

Copyright VOSSCHEMIE

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST CS UV CLEAR COAT

TECHNICAL DATA SHEET



CS UV Clear UV Clear Coat

V02
11/2019

:: CHARACTERISTIC

The Carsystem UV Clear is perfectly suited to fill small holes and pores on the topcoat.

ATTENTION - Due to the insufficient adhesion the UV Clear is only limited usable on edge constructions. Therefore, the UV Clear is only punctually usable.

:: PRODUCT DATA

Technical data

Colour: transparent
Density at 20°C: 1.1 g/cm³
Storage: 24 months in a closed original container in dark storage

VOC - compliant
UV drying

:: HANDLING

Surface:

The surface must be clean, dry and free of greases. We recommend to clean the surface in advance with acetone.

Handling:

- Recommended grit to sand the spot is P1500 - P2000
- Clean the spot / surface with degreaser
- Use the Carsystem Micro Tips and apply the UV Clear as a very thin drop
- Dry the spot with the CS UV Smart Lamp for about 30 - 60 seconds with a maximum distance of 20cm to the spot
- Final sanding with P2000 & P3000 in two sanding steps
- We recommend using CS ProFlex Mercury in combination with the CS ProFlex Mercury Sanding Block hard to finish the spot
- Then polish the surface with the CS Polish C-10 and the CS Polish C-30 to remove any remaining holograms

:: SAFETY ISSUES

The before mentioned technical data and information, especially the recommendations for applying and using our products, are based on our current knowledge and experience when applied under normal conditions. In practice, the materials, surfaces or site conditions are so different that no warranty regarding the working results or liability, arising out of any relationship, can be inferred neither from this information nor from a verbal consultation, except we are charged with intent or gross negligence. In this case the user is obliged to prove that he has informed us about all points required for a proper and promising judgement in writing, in time and completely. Patent rights of any third party are to be observed. Furthermore, our general sales and delivery terms and conditions and the latest Technical Data Sheet, which should be demanded, apply.

Directions for handling and waste disposal are in our Material Safety Data Sheet and the specifications of the Employers Liability Insurance Association for the chemical industry.

Copyright VOSSCHEMIE