

Mikrostruktura polymerních kompozitních materiálů

Ivo Blahunek

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ivo Blahunek**
Osobní číslo: **T19177**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Mikrostruktura polymerních kompozitních materiálů**

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku mikrostruktury a vlastnosti kompozitních materiálů.
2. Polymerní vlákna, vlastnosti a použití. Chyby kompozitních materiálů.
3. Polymerní kompozity v sportovních aplikacích, aktuální přehled, způsoby výroby, materiály.
4. Vyberte vhodný díl pro experimentálně pozorování.
5. Experimentální vyhodnoťte mikrostrukturu pomocí optických metod.
6. Závěr a diskuse dosažených výsledků.

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

Seznam doporučené literatury:

Ehrenstein, G,W, Polymerní kompozitní materiály, Scientia, Praha, 2009, ISBN 978 80 869 60 29 6

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

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- 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 autorského zákona 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 samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou a vlastnostmi mikrostruktury polymerních kompozitních materiálů. Zároveň poskytuje informace o polymerních vláknech a matricích, jejich vlastnostech, chybách a použití. Práce se také zabývá aplikací polymerních kompozitů ve sportovním odvětví, a to především hokejovými holemi a způsoby výroby dutých profilů.

Experimentální část práce se zaměřuje na optickou analýzu mikrostruktury vybraných vzorků rukojetí hokejových holí, jejich porovnání a vyhodnocení.

Klíčová slova: mikrostruktura, polymerní kompozity, vlákna, hokejová hůl

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issues and properties of the microstructure of polymer composite materials. It also provides information on polymer fibers and matrices, their properties, errors and uses. The work also deals with the application of polymer composites in the sports industry, especially ice hockey sticks and methods of production of hollow profiles.

The experimental part of the work focuses on the optical analysis of the microstructure of selected samples of ice hockey stick shafts, their comparison and evaluation.

Keywords: microstructure, polymer composites, fibres, ice hockey stick

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za její ochotu, nesmírně cenné rady, pozornost, vstřícnost a odborné vedení po celou dobu vypracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za odbornou konzultaci, vstřícnost, a především za možnost realizace praktické části mé bakalářské práce pod jeho dohledem a s jeho pomocí v laboratořích Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 MATRICE	12
1.1.1 Termoplastické matrice	13
1.1.2 Reaktoplastické matrice	13
1.1.3 Rozdíly a vlastnosti reaktoplastických a termoplastických matric	14
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ PODLE MATRIC	14
1.3 VÝZTUŽE POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	16
1.3.1 Charakteristika polymerních kompozitních materiálů z pohledu výztuže	16
1.3.2 Uhlíková vlákna	17
1.3.3 Skelná vlákna	19
1.3.4 Aramidová vlákna	20
1.3.5 Vlastnosti vláken	21
1.4 VLASTNOSTI POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	22
1.4.1 Odolnost	22
1.4.2 Pevnost	22
1.4.5 Flexibilita designu	24
1.4.6 Vzhled povrchu	25
1.5 TECHNOLOGIE VÝROBY POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	25
1.5.1 Navíjení	26
1.5.2 Pultruze	27
1.5.3 Lisování	28
1.5.4 Automatické pokládání vláken AFP (Automated Fiber Placement)	29
2 MIKROSTRUKTURA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	31
2.1 CHYBY A PORUCHY KOMPOZITŮ	32
2.1.1 Trhliny	33
2.1.2 Delaminace	34
2.1.3 Zlomení vláken	34
3 KOMPOZITY A SPORT	35
3.1 HISTORIE KOMPOZITU A SPORTU	35
3.2 LEDNÍ HOKEJ – HOKEJOVÉ HOLE	36
3.2.1 Historie hokejové hole	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	43
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	44
5.1 POPIS MODELŮ HOKEJOVÝCH PRO SLEDOVÁNÍ MIKROSTRUKTURY	44

5.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	44
5.2.1	Řezání vzorků.....	45
5.2.2	Zalitií vzorků.....	46
5.2.3	Leštění vzorků.....	47
5.3	KONFOKÁLNÍ LASEROVÁ MIKROSKOPIE (CLSM).....	48
5.3.1	Optická analýza vzorků.....	49
6	EXPERIMENTÁLNÍ POZOROVÁNÍ MIKROSTRUKTURY.....	50
6.1	VÝSLEDKY POZOROVÁNÍ.....	50
6.1.1	Vzorek č.1	50
6.1.2	Vzorek č.2	52
6.1.3	Vzorek č.3	54
6.1.4	Vzorek č.4	55
6.1.5	Vzorek č.5	57
6.1.6	Vzorek č.6	59
6.2	ZÁVĚR A DISKUSE.....	61
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
	SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

Lidstvo jako takové bylo provázeno po celou dobu své evoluce materiály, podle kterých se určitá období jmenovala, jako například doba kamenná, bronzová nebo železná. Evoluce nás dovedla až do období dnešního, kde jsme obklopeni všemi druhy materiálů a jejich kombinacemi. Započali jsme další část evoluce a novou éru, o které se za desítky let budou učit ve škole jako o době kompozitové.

Polymerní kompozitní materiály, které se objevily v polovině 20. století, jsou nyní jedním z hlavních témat výzkumu moderních technologií. Jejich slibné vlastnosti je činí vhodnými pro komplexní aplikace v průmyslové oblasti, jako je letectví, automobilový průmysl, stavebnictví, biomedicína, sport, a mnoho dalších. Tyto materiály vykazují pozoruhodné strukturální a mechanické vlastnosti, jako je vysoký poměr pevnosti ku hmotnosti, odolnost vůči chemikáliím, ohni, korozi a opotřebení. Všechny tyto faktory dělají z kompozitů ekonomicky dostupný a kvalitní materiál.

Kompozity jsou úzce spjaty s moderním sportem, který je stále na vzestupu. Jak vrcholový, tak rekreační. Lidé začínají hrát a dělat daleko větší množství sportů a aktivit, jelikož jsou dostupnější a tím kladou čím dál větší nároky na vybavení používané při těchto aktivitách. Žádáme lehké, pevné, a hlavně co nejlevnější vybavení a v tomhle případě se jedná právě o kompozitní výrobky. Zdokonalování technologických postupů a kvality materiálů v oblasti sportu je však především poháněno vrcholovým sportem. Finance vkládané do těchto výzkumů jsou enormní a umožňuje inženýrům doopravdy inovovat. Nové prototypy jsou drženy pod pokličkou do doby, než jsou patentované. Prototypy jsou speciálně testovány, vkládány do aerodynamických tunelů a zatěžovány do největších extrémů. To vše, aby přinesly nové výrobky sportovci co nejoptimálnější pomoc při výkonu.

Ke sportu mě vedli rodiče již od útlého věku. Od 3 let hraji lední hokej a za můj život jsem se postupně dopracoval k vyzkoušení širokého spektra sportů a aktivit. Jako dítě jsem si ovšem neuvědomoval, co vše mě ve sportu obklopovalo za výrobky a kolik práce, úsilí a jaké technologie za tím vším stojí.

Cíle této bakalářské práce je zpracovat literární rešerši na téma Mikrostruktury kompozitních materiálů, polymerní kompozity se zaměřením na kompozitní materiály ve sportovním odvětví, respektive v hokejových holích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Polymerní kompozitní materiály

Pojem kompozit by mohl znamenat téměř cokoliv, jelikož všechny materiály jsou složené z odlišných podjednotek, pokud bychom je zkoumali pod patřičným mikroskopickým detailem. Kompozity existují i v přírodě. Dlouhá celulózní vlákna držená pohromadě substancí nazývanou lignin tvoří z kusu dřeva kompozit. Kompozitní materiály jsou formovány dvěma nebo více materiály, které mají docela odlišné vlastnosti a zároveň se nerozpouští nebo se nemísí mezi sebou. Rozdílné materiály v kompozitech tvořící společně nový materiál dávají kompozitu unikátní vlastnosti, které samostatně nedosahují. V moderním inženýrství, ovšem, tento pojem obvykle referuje na matricový materiál vyztužen vlákny. Tento způsob kombinování nejlepších aspektů odlišných heterogenních materiálů je ve světě lidmi používán již po tisíce let, ku příkladu vyztužování hlíny slámou při procesu vyrábění cihel, bez které by cihly neměli moc velkou pevnost. Sláma sloužila vyztužování starověkých výrobků například v oblasti hrncířství nebo při výrobě lodí. Ve 12. století, Mongolové vytvořili první kompozitový luk tvořený kombinací kličku, kosti a dřeva. Luky byly lisovány a baleny do březové kůry. [1, 34]

Vývoj kompozitů vedl například k vývoji FRP (fiber reinforced plastic = vláknové kompozity), které obvykle označují termosetovou polyesterovou matici obsahující skelná vlákna, jež má lví podíl na dnešním komerčním trhu. V roce 1945 bylo použito při výrobě odlišných výrobků více než 3,5 milionů tun skelných vláken, primárně ovšem ve vojenském průmyslu. Po válce použití a vývoj kompozitů značně rostl. Vynálezci se snažili představit kompozitní materiál i jiným odvětvím jako transportním nebo vesmírným. Brzy se dostaly benefity využití FRP, zejména korozní odolnost, do povědomí veřejného sektoru. V roce 1947 byla vyrobena a otestována první celokompozitová karoserie automobilu, což vedlo k vývoji automobilu Chevrolet Corvette v roce 1953. Proniknutí do automobilového průmyslu vedlo ke vzniku a rozšíření několika metod jako BMC (sytká kompozitní formovací hmota) nebo SMC (kompozitní směs pro formování plechů). V počátku 50. let 20. století vznikly metody jako vinutí vláken, pultruze nebo vakuová infuze. Šedesátá léta patřila námořnímu odvětví, které se stalo největším uživatelem kompozitních materiálů.[8]

V roce 1961 byl patentován první uhlíkový kompozit a několik let poté se stal komerčně dostupným. V 70. letech začal kompozitní průmysl směřovat směrem jaký ho známe dnes. Byly vyvinuty spousty lepších pryskyřic a vylepšena vyztužovací vlákna. Automotiv překonal námořní průmysl v čele využívání kompozitních materiálů a je tomu tak dodnes. Koncem 70. let a začátkem 80. let se začaly kompozitní materiály využívat ve

stavebních konstrukcích. První celokompozitový most pro pěší byl v letech 90. nainstalován v Aberfeldy ve Skotsku. V těchto letech byla také vytvořena první betonová mostovka vyztužená pomocí FRP v McKinleyville v Západní Virginii. Nanomateriály jsou začleněny do vylepšených vláken a pryskyřic používaných v nových kompozitech. Nanotechnologie se v komerčních produktech začala používat počátkem 20. století. Sypké uhlíkové nanotrubičky lze použít jako kompozitní výztuž v polymerech ke zlepšení mechanických, tepelných a elektrických vlastností sypkého produktu. [15]

V dnešní době se kompozitní průmysl stále vyvíjí a velká část růstu se nyní zaměřuje na obnovitelnou energii. Zejména lopatky větrných turbín neustále posouvají hranice velikosti a vyžadují pokročilejší kompozitní materiály, například inženýři mohou navrhnout kompozit na míru podle výkonnostních požadavků, což způsobí, že kompozitní plech bude díky vyrovnání vláken v jednom směru velmi silný, ale slabší v jiném směru, kde síla není tak důležitá. Inženýři mohou také zvolit vlastnosti, jako je odolnost vůči teple, chemikáliím a povětrnostním vlivům, výběrem vhodného matricového materiálu. V posledních letech vzrůstající povědomí o životním prostředí a povědomí o potřebě udržitelného rozvoje vzbudily zájem o používání přírodních vláken jako výztuže v kompozitech, aby nahradila syntetická vlákna. [8]

1.1 Matrice

Kompozit se obecně skládá ze tří složek: matrice jako spojitá fáze; výztuž jako diskontinuální nebo dispergovaná fáze, včetně vláken a částic; a jemná mezifázová oblast, známá také jako rozhraní. Pečlivým výběrem matrice, výztuže a výrobního procesu, který je spojuje, mohou inženýři přizpůsobit vlastnosti tak, aby vyhovovaly konkrétním požadavkům. Během posledních desetiletí bylo vyvinuto mnoho nových kompozitů, některé s velmi cennými vlastnostmi. [2]

Jakýkoli materiál může sloužit jako matricový materiál pro kompozit. Matricovými materiály jsou však obecně keramika, kovy a polymery. Ve skutečnosti je většina matricových materiálů, které existují na trhu s kompozity, polymer. Existuje několik různých polymerních matric, které lze použít v kompozitních materiálech. Mezi polymerními matricovými kompozity převládají termosetové matricové kompozity nad termoplastickými kompozity. Ačkoli termoset a termoplasty zní podobně, mají velmi odlišné vlastnosti a použití. Pochopení výkonových rozdílů může pomoci k lepším rozhodnutím při navrhování produktů. [2, 9]

Na trhu mají své místo jak reaktoplastické, tak i termoplastické materiály. Obecně platí, že reaktoplasty mají tendenci existovat po dlouhou dobu a mají dobře zavedené místo na trhu, často mají nižší náklady na suroviny a často zajišťují snadné smáčení výztužných vláken a snadné tvarování do konečných geometrií požadovaných dílů. Jinými slovy, reaktoplasty se často zpracovávají snadněji než termoplasty. Termoplasty mají tendenci být tvrdší nebo méně křehké než reaktoplasty. Mohou mít lepší chemickou odolnost, nepotřebují chlazení, jak to často nevytvrzené reaktoplasty (pre-preg materiály) potřebují, a lze je snadněji recyklovat a opravit [1, 2].

1.1.1 Termoplastické matrice

Termoplasty jsou plasty schopné tavení. Termoplastické materiály se zpracovávají teplem. Když se ohřeje tak, aby se teplota plastu dostala nad jeho bod tání, plast se dostatečně roztaví, zkapalní nebo změkne, aby mohl být dále zpracován. Když je zdroj tepla odstraněn a teplota plastu klesne pod jeho teplotu tání, plast ztuhne zpět na pevnou látku podobně jako u skla. Tento proces tavení a tvrzení lze opakovat. Materiál však může stále více podléhat zhoršení svého roztaveného stavu, takže existuje praktické omezení počtu opakování, ke kterým může dojít, než začnou trpět vlastnosti materiálu. Mnoho termoplastických polymerů je adičního typu, schopných poskytovat velmi dlouhé délky molekulárního řetězce nebo velmi vysoké molekulové hmotnosti. [4]

1.1.2 Reaktoplastické matrice

Termosety jsou materiály, které procházejí chemickou reakcí nebo vytvrzováním a normálně se transformují z kapalné do pevné fáze. Ve své nevytvrzené formě má materiál malé nespojené molekuly známé jako monomery. Přidání druhého materiálu jako síťovadla, vytvrzovacího činidla, katalyzátoru anebo přítomnosti tepla nebo jiných aktivačních vlivů zahájí chemickou reakci nebo vytvrzovací reakci. Během této reakce se molekuly zesítují a tvoří výrazně delší molekulární řetězce a zesíťovanou síť, což způsobuje tuhnutí materiálu. Změna stavu termosetu je trvalá a nevratná. Následně vystavení vysokému teplu po vytvrzení způsobí degradaci materiálu, nikoli jeho roztavení. Je to proto, že tyto materiály obvykle degradují při teplotě nižší než při teplotě tavení.[4]

1.1.3 Rozdíly a vlastnosti reaktoplastických a termoplastických matric

V tabulce 1 máme obecné shrnutí vlastností a rozdílů reaktoplastických a termoplastických matric.

Reaktoplast	Termoplast
<p>Obsahují monomery, které se během procesu vytvrzování zesíťují a vytvářejí nevratnou chemickou vazbu. Proces zesíťování eliminuje riziko přetavení produktu při aplikaci tepla, takže reaktoplasty jsou ideální pro použití při vysokých pracovních teplotách, jako jsou elektronika a spotřebiče</p> <ul style="list-style-type: none">• Existuje několik termosetových pryskyřic, které nabízejí různé výkonnostní výhody• Výrazně zlepšuje mechanické vlastnosti materiálu, což zvyšuje chemickou odolnost, tepelnou odolnost a strukturální integritu. Reaktoplast se často používá pro utěsněné výrobky kvůli jejich odolnosti proti deformaci• Nelze recyklovat• Nelze znovu formovat, tavit nebo přetvářet• Snadno vlhčí výztužná vlákna a plniva• Odolnější vůči vyšším teplotám než termoplasty• Vysoce flexibilní design• Vynikající estetický vzhled• Vysoká úroveň rozměrové stability• Složitější povrchová úprava• Nákladově efektivní	<p>Pelety při zahřívání měknou a stanou se tekutějšími při delším a intenzivnějším zahrřívání. Tato vlastnost umožňuje, aby byly termoplasty znovu formovány a recyklovány, aniž by to negativně ovlivnilo fyzikální vlastnosti materiálu</p> <ul style="list-style-type: none">• Existuje několik termoplastů, které nabízejí různé výkonnostní výhody• Běžně nabízejí vysokou pevnost, odolnost proti smršťení a snadnou ohybnost. V závislosti na polymerech mohou termoplasty sloužit aplikacím s nízkým namáháním, jako jsou plastové sáčky nebo také jako mechanické součásti s vysokým namáháním• Opakovatelně recyklovatelné, formovatelné a tavitelné• Náročnější smáčení výztuže vláken a plniv• Vysoká rázová a chemická odolnost• Možnost různých povrchů např. tvrdý krystalický nebo gumově vypadající• Esteticky vynikající povrchové úpravy• Ekologická výroba• Obecně dražší než reaktoplast

Tabulka 1 - vlastnosti reaktoplastických a termoplastických polymerních matric [8]

1.2 Rozdělení polymerních kompozitů podle matric

Rozdílné typy matric nám ovlivňují výsledné vlastnosti výrobku, a proto se snažíme vhodně zvolit nejen výztuž, ale i samotnou matici. Vhodná volba matrice nám může například zvýšit životnost výrobku nebo zvýšit teplotní odolnost. [31]

1.2.1 Kompozity s polymerní maticí (PMC)

Kompozity s polymerní maticí jsou složeny z termosetových plastů nebo termoplastické matrice s rozptýleným vyztužením uhlíkových, skleněných, kevlarových

nebo kovových vláken. Termosety jsou populárnější v použití než termoplasty kvůli jejich vyšší pevnosti a odolnosti vůči vysokým teplotám. Termosety se připravují smícháním pryskyřice s tvrdidlem. Laminární struktura je nejrozšířenější a vyrábí se vrstvením a spojováním tenkých vrstev vláken a polymeru, dokud se nedosáhne požadované tloušťky. Kompozity s polymerní matricí jsou značně levné díky technikám snadné manipulace a jednoduchým výrobním metodám. [4]

1.2.2 Kompozity s keramickou matricí (CMC)

Kompozity s keramickou matricí jsou typem keramických vláken obecně složených z uhlíku, karbidu křemíku (SiC), oxidu hlinitého (Al₂O₃) a nitridu křemíku (SiN) uložených ve struktuře keramické matrice. Jsou navrženy tak, aby překonaly nevýhodu monolitické keramiky, křehkost. V důsledku nižšího selhávání matrice než selhání vláken se kompozity s keramickou matricí označují jako inverzní kompozity. Zatímco u většiny kompozitů s polymerní nebo kovovou matricí je jev přesně opačný. Při zatěžování je to tedy matrice, která selže jako první, aby se zabránilo předčasnému selhání křehkých vláken. Výroba těchto kompozitů se provádí pomocí specifických zpracovatelských technik nazývaných jako cesty v plynné nebo kapalně fázi. V tomto procesu se vnitřní fáze a matrice tvoří kolem vláken z plynných nebo kapalných prekurzorů. [4]

1.2.3 Kompozity s kovovou matricí (MMC)

Matricový materiál kompozitů s kovovou matricí je většinou hliník (Al), hořčík (Mg), měď (Cu) a titan (Ti) a vyztužení může být buď disperzní keramika, jako jsou oxidy a karbidy, nebo to může být kov (jako wolfram, molybden či olovo). Vyztuž přispívá několika procenty k přibližně 50 % celkového objemu kompozitního materiálu. Kompozity s kovovou matricí na bázi hliníku se nejrozšířeněji používají v automobilovém a leteckém průmyslu, protože vyztužné sloučeniny, jako jsou SiC a Al₂O₃, se snadno a účinně mísí v roztaveném hliníku, aby se dosáhlo požadovaných vlastností, jako je vynikající pevnost, zlepšená tuhost, snížená hustota, řízená tepelná roztažnost a zlepšená odolnost proti opotřebení. Kvůli vysoké tuhosti a abrazivním strukturám dochází při obrábění kompozitů s kovovou matricí k vysokému opotřebení nástroje, proto se pro ně obvykle používají nekonvenční techniky obrábění, přičemž nedochází ke kontaktu nástroje s materiálem.[4]

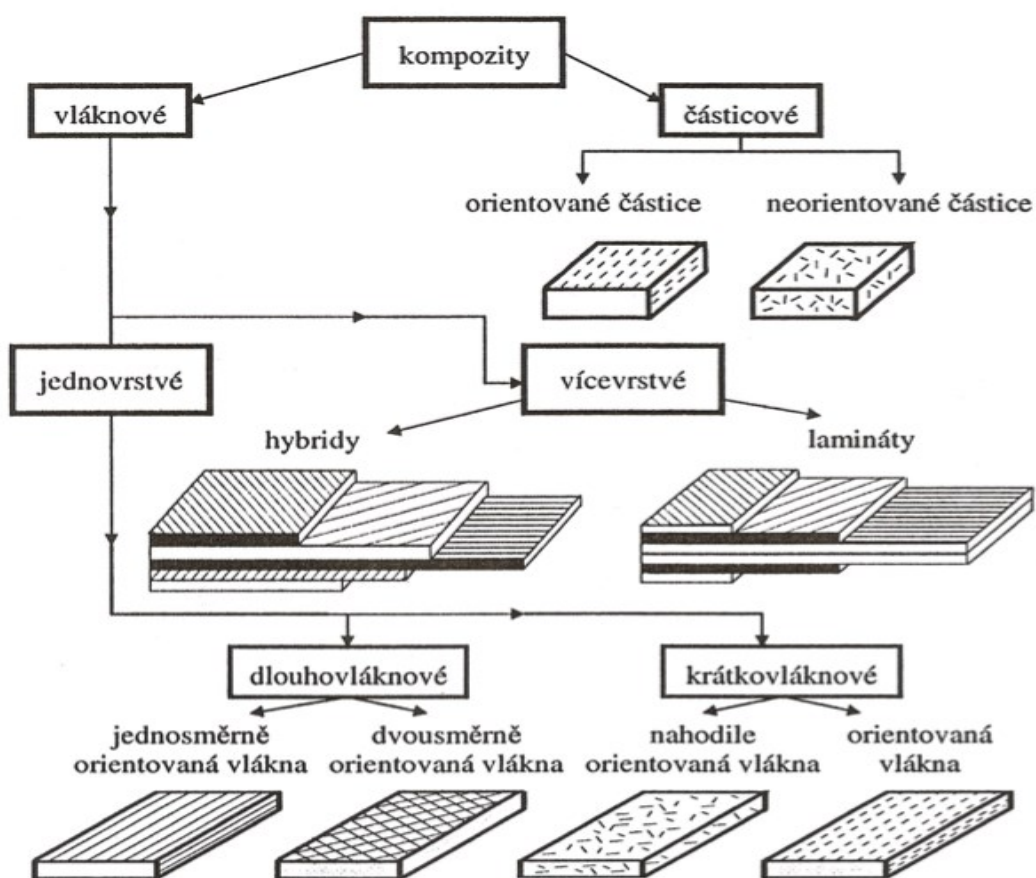
1.3 Výztuže polymerních kompozitů

Role výztuže v kompozitním materiálu je v zásadě jednou ze zvyšování mechanických vlastností systému čisté pryskyřice. Všechna různá vlákna použitá v kompozitech mají různé vlastnosti, a tak ovlivňují vlastnosti kompozitu různými způsoby.

Jednotlivá vlákna nebo svazky vláken však lze použít samostatně pouze v několika procesech, jako je třeba navíjení vláken. U většiny ostatních aplikací je nutné vlákna uspořádat do určité formy, známého jako tkanina, aby bylo s materiálem možné dále manipulovat. Různé způsoby sestavování vláken do tkanin a rozmanitost možných orientací vláken vedou k tomu, že existuje mnoho různých druhů tkanin, z nichž každá má své specifické vlastnosti. [4]

1.3.1 Charakteristika polymerních kompozitních materiálů z pohledu výztuže

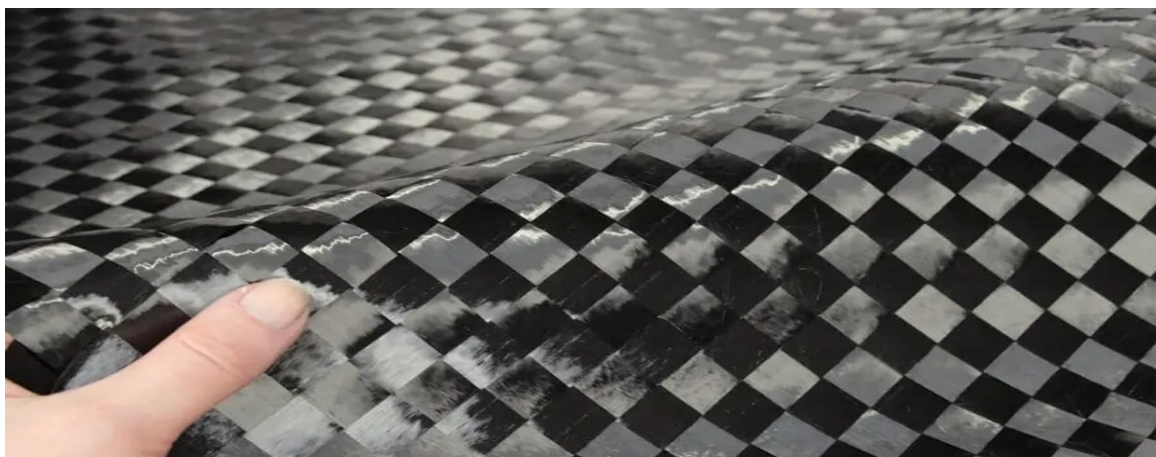
Na obrázku 1 můžeme vidět větvovitě rozdělenou klasifikaci polymerních kompozitních materiálů z pohledu výztuže.



Obrázek 1 - klasifikace kompozitních materiálů z pohledu výztuže [3]

1.3.2 Úhlíková vlákna

Úhlíková vlákna jsou vlákna o průměru asi 5–10 mikrometrů a složená převážně z atomů uhlíku. Úhlíková vlákna mají několik výhod včetně vysoké tuhosti, vysoké pevnosti v tahu, nízké hmotnosti, vysoké chemické odolnosti, vysoké teplotní tolerance a nízké tepelné roztažnosti. Díky těmto vlastnostem jsou uhlíková vlákna velmi populární v letectví, stavebnictví, vojenství a motoristickém sportu spolu s dalšími soutěžními sporty. Jsou však relativně drahé ve srovnání s podobnými vlákny, jako jsou skleněná vlákna nebo plastová vlákna. [12]



Obrázek 2 - tkanina z uhlíkových vláken [33]

Výroba a design hokejových holí je velice specifická a odlišná od spousty jiných výrobků, co se týče technologií a postupů, kvůli výrobním tajemstvím. Výrobci si své výrobní postupy a technologie výroby střeží, a proto je v materiálech výrobců a odborné literatuře uváděna velice zjednodušeně a okrajově. Jedna z mála dostupných informací je typ použitých tkanin z uhlíkových vláken pro výrobu hokejových holí. [33]



Obrázek 3 - forma jednodílné kompozitní hokejové hole [33]

1.3.2.1 Klasifikace a typy

Na základě modulu, pevnosti a konečné teploty tepelného zpracování lze uhlíková vlákna rozdělit do následujících kategorií:

Na základě vlastností uhlíkových vláken lze uhlíková vlákna seskupit do:

- Ultra-vysoký modul, typ UHM (modul > 450 Gpa)
- Vysoký modul, typ HM (modul mezi 350-450 Gpa)
- Střední modul, typ IM (modul mezi 200-350 Gpa)
- Nízký modul a vysoká pevnost v tahu, typ HT (modul < 100 Gpa, pevnost v tahu > 3,0 Gpa)
- Super vysoká pevnost, typ SHT (pevnost v tahu > 4,5 Gpa)

Na základě materiálů prekurzorových vláken se uhlíková vlákna dělí na:

- Karbonová vlákna na bázi PAN
- Uhlíková vlákna na bázi smoly
- Karbonová vlákna na bázi mezofázové rozteče
- Izotropní uhlíková vlákna na bázi smoly
- Karbonová vlákna na bázi hedvábí
- Uhlíková vlákna pěstovaná v plynné fázi

Na základě konečné teploty tepelného zpracování se uhlíková vlákna dělí na:

- Uhlíková vlákna typu I s vysokým tepelným zpracováním (HTT), kde by teplota konečného tepelného zpracování měla být vyšší než 2000 °C a mohou být spojena s vláknem typu s vysokým modulem.
- Uhlíková vlákna typu II se středním tepelným zpracováním (IHT), kde by teplota konečného tepelného zpracování měla být kolem nebo vyšší než 1500 °C a mohou být spojena s vláknem typu s vysokou pevností.
- Uhlíková vlákna typu III s nízkým tepelným zpracováním, kde teploty konečného tepelného zpracování nejsou vyšší než 1000 °C. Jedná se o nízkomodulové a nízkopevnostní materiály. [12, 31]

1.3.3 Skelná vlákna

Skelné vlákno je nejběžněji používané vlákno pro vyztužení termosetových a termoplastických pryskyřic v celé řadě aplikací a procesů. Skleněné vlákno se vyrábí ze surovin na bázi oxidu křemičitého v kombinaci s oxidy kovů a je k dispozici v několika složeních, aby vyhovělo požadavkům aplikace. Laminát vyrobený s vyztužením ze skelných vláken nabízí vynikající rovnováhu mezi cenou a výkonem a poskytuje dobré mechanické a chemické vlastnosti. Lamináty vyztužené skelnými vlákny tvoří většinu veškeré výroby kompozitů v široké škále výrobních procesů. Výztuhy ze skelných vláken jsou k dispozici v různých formách, které zahrnují roving, textilní tkaniny, tkaný roving anebo rohož ze sekaných vláken. [1,2,34]



Obrázek 4 - skelná vlákna [19]

Typy používané pro konstrukční vyztužení jsou následující:

E-sklo (elektrické) - nižší obsah alkálií a pevnější než alkalické sklo. Dobrá pevnost v tahu a tlaku a tuhost, dobré elektrické vlastnosti a relativně nízká cena, ale odolnost proti nárazu je relativně nízká. V závislosti na typu E skla se cena pohybuje od cca 35-70 CZK/kg. E-sklo je nejběžnější formou vyztužných vláken používaných v kompozitech s polymerní matricí. C-sklo (chemické) - nejlepší odolnost proti chemickému napadení. Používá se hlavně ve formě povrchové tkáně ve vnější vrstvě laminátů používaných v chemických a

vodovodních potrubích a nádržích. C, R, S nebo T-sklo – výrobci obchodní názvy pro ekvivalentní vlákna s vyšší pevností v tahu a modulem než E sklo, s lepším zachováním pevnosti za mokra. Vyšších vlastností ILSS a smáčení je dosaženo díky menšímu průměru vlákna. S-sklo vyrábí v USA firmou OCF, R-sklo v Evropě firmou Vetrotex a T-sklo firmou Nittobo v Japonsku. Skelné vlákno vyvinuto pro letecký a obranný průmysl a používaný v některých aplikacích tvrdého balistického pancéřování. Tento faktor a nízké objemy výroby znamenají relativně vysokou cenu. V závislosti na typu skla R nebo S se cena pohybuje od 350-600 CZK/kg. [20, 31, 32, 34]

1.3.4 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (prodávána pod obchodním názvem Kevlar) jsou organická vlákna vyráběná z aromatických polyamidů (aramidů) zvlákněním v roztoku. Polymerní roztok v kyselině sírové se vytlačuje zvlákněním přes malé otvory do vláken, ve kterých jsou molekuly vyrovnány se směrem stříhu. Dalšího vyrovnání vláken lze dosáhnout tepelným zpracováním pod tahem. Aramidová vlákna (obr. 3) nabízejí vyšší pevnost a tuhost ve srovnání se sklem spolu s nízkou hmotností, vysokou pevností v tahu, ale nižší pevností v tlaku. Aramid také vykazuje vynikající houževnatost a odolnost proti poškození. Při nárazu má tendenci reagovat tažným způsobem, na rozdíl od uhlíkových vláken, které mají tendenci selhat křehčím způsobem. Mimořádná houževnatost aramidových vláken také vytváří problém při obrábění. Vlákna se velmi obtížně stříhají a jsou vyžadovány speciální nástroje a techniky. Aramidové vlákno se používá jako výkonnější náhrada za skelná vlákna v průmyslových aplikacích a sportovních potřebách a v ochranných oděvech. [12, 30, 31]



Obrázek 5 - aramidová vlákna [20]

1.3.5 Vlastnosti vláken

Srovnání vlastností všech typů vláken mezi sebou ukazuje, že všechny mají určité výhody i nevýhody. Díky tomu jsou různé typy vláken pro některé aplikace vhodnější než jiné, a proto je vhodná volba vláken výzvu tak důležitá při navrhování výrobků. Tabulka 2 poskytuje základní srovnání hlavních žádaných vlastností generických typů vláken polymerních kompozitů. [12]

Vlastnosti	aramidové	uhlíkové	skleněné
Vysoká pevnost v tahu	průměrné	výborné	průměrné
Vysoký modul pevnosti v tahu	průměrné	výborné	špatné
Vysoká pevnost v tlaku	špatné	výborné	průměrné
Vysoký kompresní modul	průměrné	výborné	špatné
Vysoká pevnost v ohybu	špatné	výborné	průměrné
Vysoký ohybový modul	průměrné	výborné	špatné
Vysoká odolnost proti nárazu	výborné	špatné	průměrné
Vysoká mezilaminární pevnost ve smyku	průměrné	výborné	výborné
Vysoká pevnost ve smyku v rovině	průměrné	výborné	výborné
Nízká hustota	výborné	průměrné	špatné
Vysoká odolnost proti únavě	průměrné	výborné	špatné
Vysoká požární odolnost	výborné	špatné	výborné
Vysoká tepelná izolace	výborné	špatné	průměrné
Vysoká elektrická izolace	průměrné	špatné	výborné
Nízká tepelná roztažnost	výborné	výborné	výborné
Nízké náklady	špatné	špatné	výborné

Tabulka 2 - jednotlivé vlastnosti vláken [12]

1.4 Vlastnosti polymerních kompozitů

Polymerní kompozity jsou přítomny téměř ve všech aspektech moderního života – od součástí zařízení, sportovního vybavení až po široký výběr automobilového příslušenství. Kombinací specifických pryskyřic a výztuh – a je jich mnoho – můžete přizpůsobit složení tak, aby splňovalo specifické požadavky na pevnost pro jakoukoli aplikaci. Můžete například změnit poměr pryskyřice a výztuže nebo orientovat vlákna v jednom směru nebo v různých směrech. Kompozity jsou anizotropní, to znamená, že vlastnosti materiálu se mění v závislosti na uložení a počtu vrstev výztužných materiálů – vláken. To poskytuje technickou flexibilitu, takže návrháři mohou přizpůsobit vlastnosti konečného produktu. Pokud jde o pevnost, existují čtyři primární druhy, které ovlivňují konstrukční návrh: tržná délka, pevnost v tahu, ve smyku a v tlaku. [31, 34]

1.4.1 Odolnost

Mnoho z původních kompozitních struktur, které byly instalovány před více než 50 lety, ještě nedosluhují, a to ukazuje na vysokou odolnost vůči každodenním vlivům, kterým jsou vystaveny. Kompozity dobře odolávají únavě a jsou odolné vůči faktorům prostředí, jako je UV poškození, kolísání teploty, vlhkost a chemická expozice. Vyžadují také méně plánované a neočekávané údržby. Polymerní kompozity dobře drží i za každého počasí. Pérez Art Museum Miami nabízí visuté zahrady kolem budovy. Celkem 67 trubek vyztužených skelným vláknem, které drží kvetoucí rostliny, odolá větru o rychlosti až 235 km/h a odolá i korozi slané vody z Atlantického oceánu. [34]

Kompozity jsou pevné, což jim umožňuje odolat opakovanému zatížení. To je zvláště důležité pro infrastrukturní aplikace, jako jsou mostovky, které podporují provoz 24 hodin denně. Mnoho zchátralých mostů v zemi je renovováno s palubami FRP (Fibre reinforced plastic), včetně mostu Broadway v Portlandu v Oregonu. Padací most, který se klene nad řekou Willamette v srdci přístavu Portland, kromě pěší dopravy zvládne 30 000 vozidel denně. [34]

1.4.2 Pevnost

Kompozity jsou jedním z nejpevnějších materiálů. Když vezmete v úvahu hustotu materiálu, kompozity jsou mnohem pevnější než většina ostatních stavebních materiálů. Není žádným překvapením, že jsou materiálem volby pro všechno od letadel po automobily. [34]

1.4.2.1 Tržná délka

Tržná délka je srovnáním pevnosti materiálu ve vztahu k tomu, jakou má hustotu. Inženýři a konstruktéři stále více hledají materiály s vysokou tržnou délkou. Některé materiály jsou velmi pevné a těžké, například ocel. Jiné materiály mohou být pevné a lehké, jako jsou bambusové tyče. Kompozity mohou být navrženy tak, aby byly pevné i lehké. Protože mají velmi vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, jsou kompozity vyhledávaným materiálem pro aplikace, kde je nízká hmotnost prvořadá, jako jsou letadla a automobily. [34]

1.4.2.2 Pevnost v tahu a v ohybu

Pevnost v tahu a v ohybu označuje množství napětí, které materiál dokáže zvládnout než se deformuje, zlomí nebo jinak selže. Pevnost v tahu a v ohybu se liší podle materiálu a měří se v megapascalch (MPa). Například konečná pevnost v tahu oceli se pohybuje od 400 do 690 MPa, zatímco konečná pevnost polymerních kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny se pohybuje od 1 200 do 2 410 MPa, v závislosti na orientaci vláken a dalších konstrukčních faktorech. [34]

1.4.2.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku udává, jak se materiál chová, když je stlačen nebo zploštěn tlakem. Některé materiály se zlomí nebo prasknou, když narazí na mez pevnosti v tlaku, zatímco jiné se trvale deformují. Materiály jako beton a keramika mají obvykle vyšší pevnost v tlaku, ale nižší pevnost v tahu. Naopak kompozity mají obvykle vyšší pevnost v tahu než pevnost v tlaku. Kompozity zatížené v tlaku se mohou vyboulit, zlomit nebo rozdrtit. Proto je důležité vyhodnotit tlakové zatížení pro konkrétní kombinaci vláken a pryskyřice zvolené pro danou aplikaci a podle toho upravit složení. [34]

1.4.2.4 Pevnost ve smyku

Pevnost ve smyku popisuje, jak dobře může materiál odolávat napětí, když se vrstvy posouvají nebo klouzají. Je důležité znát maximální množství smykového napětí (nebo síly na jednotku plochy), které může materiál zvládnout před selháním. To umožňuje inženýrům a konstruktérům zjistit, jakou hmotnost nebo zatížení může konstrukce unést a co se s konstrukcí může stát, když síly působí v různých směrech. Pevnost ve smyku v kompozitech se liší v závislosti na složení a konstrukci. Kompozity mohou být navrženy tak, aby smyková napětí byla orientována v rovině, příčně k rovině nebo napříč vrstvami (interlaminární).

Existuje několik způsobů, jak řídit smykové vlastnosti, včetně orientace vláken, pořadí vrstev, typu a objemu použitých vláken, typu a hustoty materiálů jádra a dalších. [34]

1.4.3 Chemická a korozní odolnost

Výrobky vyrobené z kompozitů poskytují dlouhodobou odolnost vůči náročným chemickým a teplotním podmínkám. Kompozity jsou často volbou materiálu pro venkovní vystavení, aplikace při manipulaci s chemikáliemi a další náročná prostředí. Kompozity tak snadno nekorodují. Existuje mnoho příkladů potrubí z polymeru vyztuženého skelnými vlákny, které je v provozu v chemických výrobních závodech více než 25 let a pracuje v drsném chemickém prostředí 24 hodin denně, sedm dní v týdnu. Kompozity nabízejí řešení odolnosti proti korozi pro mnoho průmyslových odvětví, včetně kontroly znečištění ovzduší, chemického zpracování, odsolování, potravin a nápojů, zpracování a těžby nerostů, ropy a plynu, celulózy a papíru, skládkování pevného odpadu a čištění vody a odpadních vod. [34]

Odolnost proti korozi je určena volbou pryskyřice a výztuže použité v rámci aplikace kompozitu. K dispozici jsou různé pryskyřičné systémy, které poskytují dlouhodobou odolnost vůči téměř každému chemickému a teplotnímu prostředí. Výběr výztuh je mnohem omezenější, ale pro určitá chemická prostředí zásadní. Správně navržené kompozity mají dlouhou životnost a minimální údržbu. [34]

1.4.4 Nízká hmotnost

Kompozitní materiály jsou pevné a lehké. Lehké kompozity vám mohou ušetřit peníze a pracovní sílu. Kompozity vyztužené vlákny nabízejí vynikající poměr pevnosti k hmotnosti, který převyšuje poměry jiných materiálů. Například kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny jsou o 70 procent lehčí než ocel a o 40 procent lehčí než hliník. Výroba dílů s nízkou hmotností je pro průmyslová odvětví, jako je doprava, infrastruktura a letectví, z různých důvodů zásadní. Lehké kompozity se snadno manipulují a instalují, mohou snížit náklady na projekty a pomáhají zajistit dodržování předpisů a norem. [34]

1.4.5 Flexibilita designu

Kompozity se vyznačují schopností tvarovat je do složitých tvarů za relativně nízkou cenu. To nabízí designérům, inženýrům a architektům svobodu, kterou u jiných konkurenčních materiálů obvykle nenajdete. Protože kompozity jsou směsí výztužných vláken, pryskyřic a přísad, lze je vyrábět tak, aby splňovaly řadu požadavků. Návrháři mohou volně vytvářet nové produkty a v mnoha případech jsou omezeni pouze svou

představivosti. Aplikace od sportovních vozů po větrné lopatky využívají přirozenou konstrukční flexibilitu kompozitů k výrobě složitých tvarů, přidávání specifických vlastností a zlepšování estetiky. Složité tvary a obrysy jsou možné i bez potřeby vysokotlakých nástrojů, protože kompozity jsou formovány, když se pryskyřice vytvrzuje nebo tuhne během výroby. Kompozitní díly tak mohou snadno získat mnoho tvarů, ať už jsou vytvářeny v malých objemech ručně nebo vyráběny pomocí velkoobjemových automatizovaných procesů. Pokud tedy jde o tvar dílů a výrobků, jsou polymerní kompozity vhodné pro téměř každé odvětví. [34]

1.4.6 Vzhled povrchu

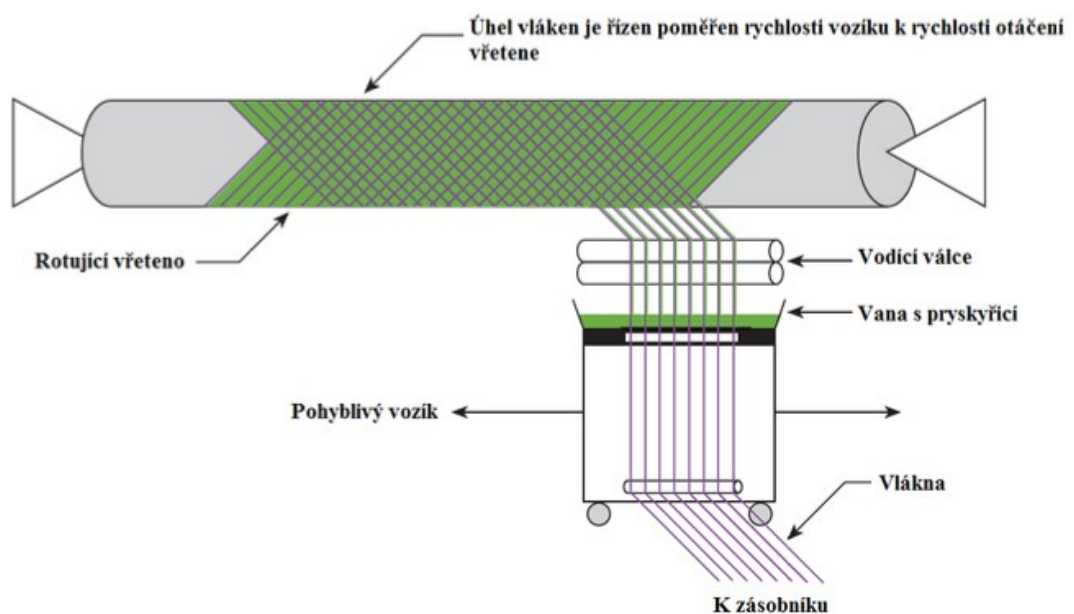
Lidé jsou často přitahováni ke kompozitům kvůli estetice, jelikož společnosti prodávají vzhled uhlíkových vláken na všem, od krytů telefonů po pracovní desky. Popularita odhaleného vzhledu výpletu pochází z automobilového průmyslu, kde vozy vyšší třídy spoléhají na kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny, které nejen zvyšují výkon, ale také odrážejí styl. Kompozitní povrchy lze tvarovat tak, aby simulovaly jakýkoli povrch nebo texturu, od hladkých po hrubé. Spotřebitelé volí kompozitní pracovní desky, protože je lze tvarovat do jakéhokoli tvaru a přizpůsobit je jakékoli barvě. Rukojeti a knoflíky na domácích spotřebičích vypadají stylově a jsou příjemné na dotek. S kompozity mají designéři nekonečné možnosti, jak vytvořit krásné produkty. [34]

1.5 Technologie výroby polymerních kompozitů

Vezmeme-li kompozitní materiály jako celek, existuje mnoho různých materiálových možností na výběr v oblastech pryskyřic, vláken a jader. Všechny s vlastní unikátní sadou vlastností, jako je pevnost, tuhost, houževnatost, tepelná odolnost, náklady, rychlost výroby atd. Konečné vlastnosti kompozitního dílu vyrobeného z těchto různých materiálů však nejsou pouze funkcí individuálních vlastností pryskyřičné matrice a vláken (v sendvičových strukturách také jádra), ale jsou také funkcí způsobu, jakou jsou samotné materiály jsou zpracovávány. Tato část porovnává několik běžně používaných metod výroby kompozitů, především dutých profilů.

1.5.1 Navíjení

Navíjení vláken je kontinuální metoda výroby, která může být vysoce automatizovaná a opakovatelná, s relativně nízkými náklady na materiál. Mezi koncovými podpěrami je vodorovně zavěšen dlouhý válcový nástroj zvaný trn. Suchá vlákna procházejí lázní z pryskyřice, která se mají zvlhčit. Nástroj pro aplikaci vláken se pohybuje tam a zpět po délce rotujícího trnu s pojezdovým vozíkem a umísťuje vlákno na nástroj v předem stanovené konfiguraci. K uspořádání os se používají počítačově řízené navíjecí stroje pohybu. Navíjení vláken je jedním příkladem leteckých kompozitních materiálů. [12]



Obrázek 6 - metoda navíjení vláken [12]

Hlavní výhody:

- Toto může být velmi rychlý, a tudíž ekonomický způsob pokládání materiálu.
- Obsah pryskyřice lze řídit dávkováním pryskyřice na každou vláknitou koudel přes štěrbinu nebo matrice.
- Náklady na vlákna jsou minimalizovány, protože neexistuje žádný sekundární proces pro přeměnu vlákna na tkaninu před použitím.
- Strukturální vlastnosti laminátů mohou být velmi dobré, protože rovná vlákna mohou být pokládána ve složitém vzoru, aby odpovídala aplikovanému zatížení.

Hlavní nevýhody:

- Proces je omezen na součásti konvexního tvaru.

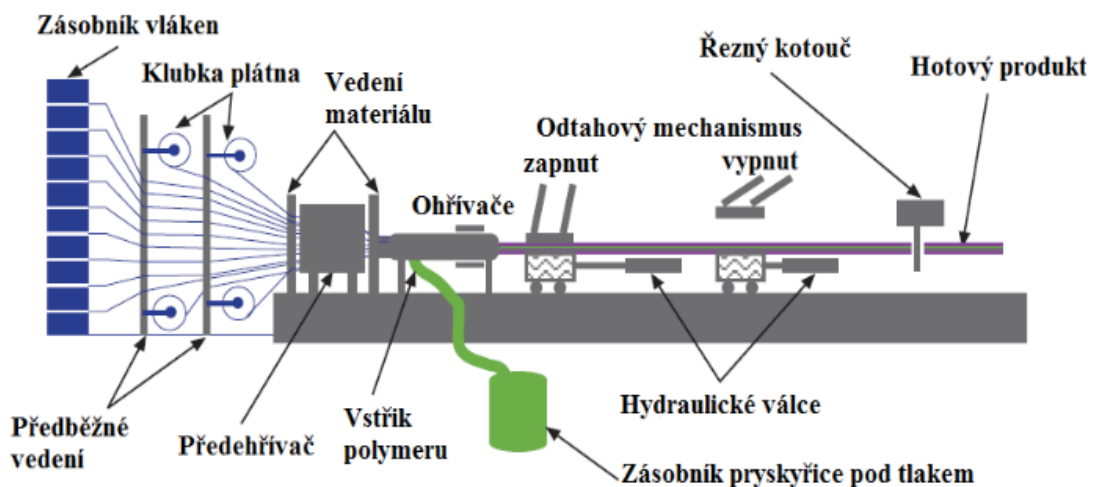
- Vlákno nelze snadno položit přesně po délce součásti.
- Náklady na trn pro velké součásti mohou být vysoké.
- Vnější povrch součásti je nelisovaný, a proto kosmeticky neatraktivní.
- Obvykle je třeba používat pryskyřice s nízkou viskozitou a s tím související nižší mechanické a zdravotní a bezpečnostní vlastnosti.

Typické aplikace:

Chemické skladovací nádrže a potrubí, plynové lahve a hasičské dýchací nádrže [12]

1.5.2 Pultruze

Kompozitní pultruze je metoda zpracování pro výrobu souvislých délek polymerních strukturních tvarů vyztužených vlákny s konstantními průřezy. Jedná se o kontinuální metodu výroby, kterou lze automatizovat. V tomto procesu je kontinuální svazek suchého vlákna tažen přes vyhřívanou smáčecí lázeň pryskyřice. Smáčený svazek je vytažen do vyhřívaných razidel a tvar průřezu vytaženého vlákna je tvořen těmito razidly. Pryskyřice se vytvrdí a vytvoří se kompozit. Díly se poté vyrábějí krájením dlouho vytvrzeného kusu. Tento proces je omezen na přímé díly s konstantním průřezem, jako jsou I-nosníky, T-nosníky nebo jiné profily a žebříkové kolejnice. Pultruze se používá při výrobě lineárních komponent, jako jsou například žebříky a lišty. [12]



Obrázek 7 - metoda pultruze [12]

Hlavní výhody:

- Pultruze může být velmi rychlý, a tedy ekonomický způsob impregnace a vytvrzování materiálů.
- Obsah pryskyřice lze přesně kontrolovat.
- Strukturální vlastnosti laminátů mohou být velmi dobré, protože profily mají velmi rovná vlákna a lze získat vysoké objemové podíly vláken.
- Oblast impregnace pryskyřicí může být uzavřena, čímž se omezí těkavé emise.

Hlavní nevýhody:

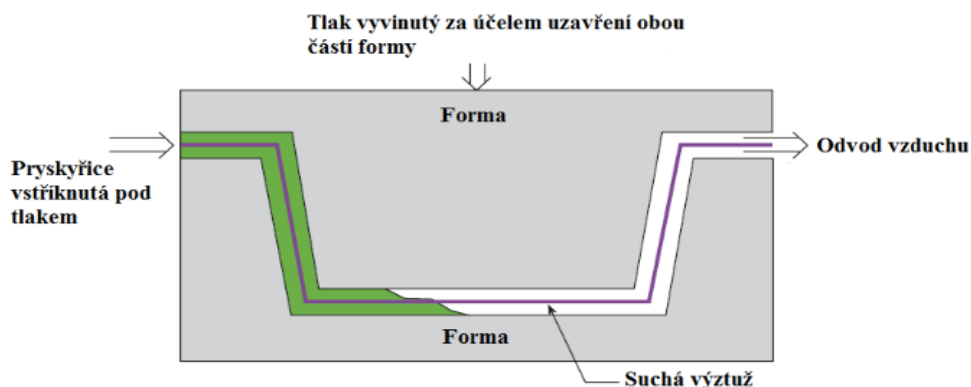
- Omezeno na složky s konstantním nebo téměř konstantním průřezem
- Náklady na vyhřívané matrice mohou být vysoké.

Typické aplikace:

Nosníky a nosníky používané ve střešních konstrukcích, mostech, žebřících a rámu konstrukcí. [12]

1.5.3 Lisování

Lisování je přesný a potenciálně rychlý proces výroby vysoce kvalitních kompozitních dílů v širokém rozsahu objemů. Materiál je ručně nebo roboticky umístěn do formy. Polovina formy je uzavřena a pomocí hydraulických lisů je vyvinut tlak ve formě. Rozsahy cyklů závisí na velikosti a tloušťce dílu. Tento proces vyrábí vysoce pevné a složité součásti v nejrůznějších velikostech. Kompozity se běžně zpracovávají lisováním a zahrnují reaktoplastické pre-pregy, vlákna vyztužený termoplast, formovací směsi, jako je formovací hmota pro plech (SMC), objemové formovací směsi (BMC) a nasekané termoplastické pásy. [12]



Obrázek 8 - metoda lisování [12]

Hlavní výhody:

- Lamináty s velkým objemem vláken lze získat s velmi nízkým obsahem dutin.
- Neškodí tolik zdraví a je více bezpečný při výrobě díky uzavření pryskyřice
- Možné snížení pracovní síly.
- Obě strany součásti mají lisovaný povrch.

Hlavní nevýhody:

- Přizpůsobené nástroje jsou drahé a těžké, aby vydržely tlaky.
- Obecně omezeno na menší součásti.
- Mohou se vyskytovat neimpregnované oblasti, což má za následek velmi drahé šrotové díly.

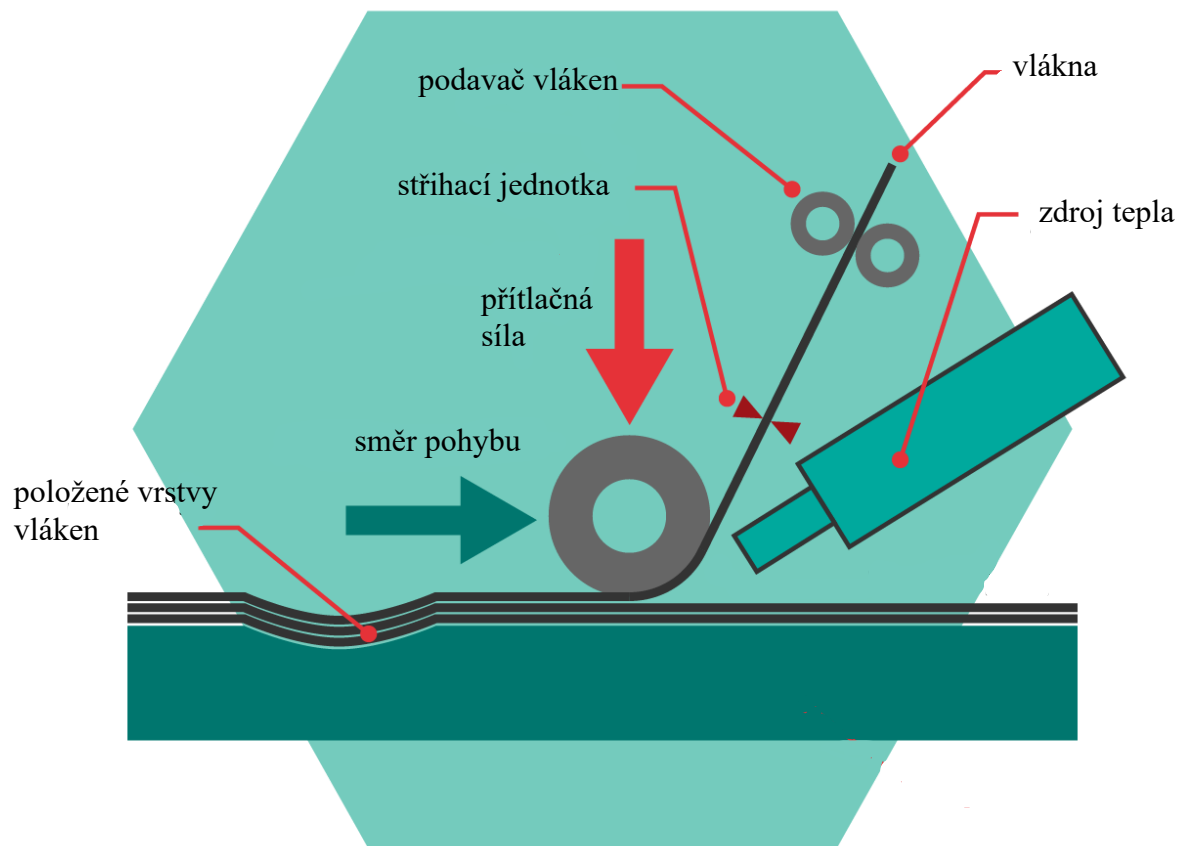
Typické aplikace:

Malá komplexní letadla a automobilové součástky, vlaková sedadla.

1.5.4 Automatické pokládání vláken AFP (Automated Fiber Placement)

Automatické pokládání vláken (AFP) je jednou z nejpokročilejších metod výroby kompozitních materiálů. Tato metoda se používá téměř výhradně u pásek vyztužených souvislými vlákny. Robot se používá k umístění pásky vyztužené vlákny a budování struktury vrstvu po vrstvě. Pás materiálu složený z několika úzkých pásek pásky je umístěn tam, kde jsou tyto vlečky obvykle široké 0,05 a 0,1 mm. Použití robotiky dává operátorovi aktivní kontrolu nad všemi kritickými proměnnými, které se v procesu vyskytují, díky čemuž je proces vysoce kontrolovatelný a opakovatelný. Tato metoda umožňuje výrobu modifikovaných dílů na míru, protože každá vrstva může být umístěna pod různými úhly, aby co nejlépe unesla požadované zatížení. [12, 35]

Výhodou umístění vláken je rychlost zpracování a snížení odpadu materiálu a tím i nákladů. Tento proces se často používá k výrobě velkých reaktoplastických dílů o složitých tvarech. Podobně jako u procesu ATP, automatizované pokládání pásky (ATL) je ještě rychlejší automatizovaný proces, při kterém se k vytvoření součásti nepřetržitě pokládá pre-preg páska, nikoli jednotlivé vlečky. [12, 35]



Obrázek 9 - metoda automatického pokládání vláken [35]

Hlavní výhody:

- Automatizace
- Opakovatelnost výroby
- Nízké plýtvání materiálem

Hlavní nevýhody:

- Relativně pomalá rychlost výstavby
- Omezení velikosti a tvaru dílů
- Náklady na zpracovatelské zařízení

2 Mikrostruktura kompozitních materiálů

Vláknové polymerní kompozity jsou nejstarší a nejrozšířenější kompozitní materiály. Jejich průmyslová výroba začala zhruba ve 30. letech 20. století. To zahrnovalo kompozity se skleněnými vlákny a reaktoplastickou matricí používané nejčastěji v leteckém průmyslu. Vlákna vyztužené plasty FRP splňují požadavky od jednoduchých technologických aplikací až po extrémní konstrukce ve vesmíru a avionice, od jednoduchých ručně vyráběných metod výroby kus po kusu až po vysoce pokročilé technologické metody. Pravděpodobně žádná jiná skupina polymerních materiálů nenabízí takové široké možnosti využití, a proto jsou největším lákadlem v oblasti vývoje nových typů vláken a nových efektivnějších technologií. Kromě vyztuže vláken, která je primární příčinou pevnosti kompozitního materiálu, je třeba mít na paměti hlavní roli polymerní matrice. Určuje ekonomickou stránku výroby kompozitů. [10]

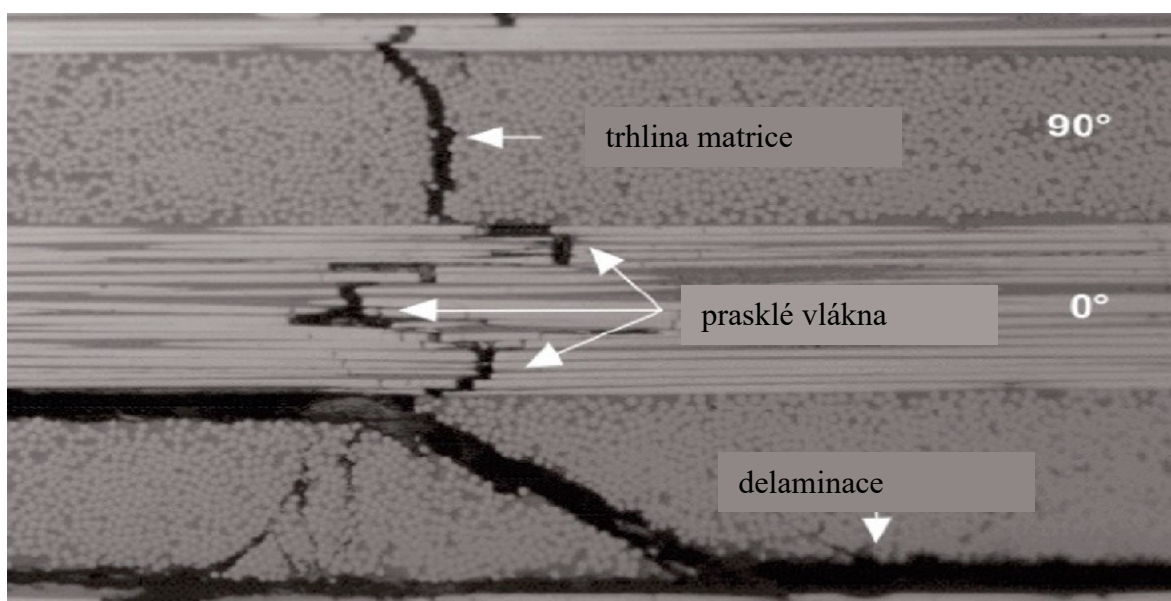
Polymerní kompozity mají ve srovnání s kovovými a keramickými materiály nízkou hustotu, dobrou odolnost proti korozi a požadavky na produkci jsou nízkoenergetické. Patří k progresivním stavebním materiálům zejména díky své vysoké měrné pevnosti, poměru mezi pevností v tahu a hustotou materiálu. To je hlavní důvod pro zavedení polymerních kompozitů do avioniky a automobilového průmyslu. Při navrhování kompozitu je třeba vzít v úvahu jeho budoucí použití. Matrice a vlákna jsou kombinována takovým způsobem, abychom získali optimální vlastnosti a značnou životnost. Nejdůležitější je, aby pevnost a modul pružnosti vláken byly výrazně vyšší než u matrice. Volba polymerní matrice závisí na jejích vlastnostech prodloužení, které musí být vyšší než u vláken. Významné je také zarovnání vláken, což je důležité z hlediska jeho aplikačních vlastností a výběru výrobních technologií. Při navrhování je důležité specifikovat konečné vlastnosti vláknových kompozitů a směr zatížení směrem k zarovnání vláken vzhledem k využití výrobku. Charakteristickým rysem vlákna je, že pevnost v tahu ve směru osy je mnohonásobně vyšší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Čím užší je vlákno, tím vyšší je jeho pevnost. Tento jev je znám jako paradox vláknité struktury. Nejvýznamnějšího účinku lze dosáhnout, pokud jsou vlákna uspořádána v jednom směru. Kompozit má v tomto směru vysokou pevnost. V kolmém směru je však jeho pevnost velmi nízká. Proto jsou vlákna tkaná do tkanin, kde je pevnost kompozitu sice nižší, ale zato stejná ve všech směrech. Při výběru vhodné polymerní matrice pro specifické použití je třeba vzít v úvahu aplikační a výrobní vlastnosti polymerů. Významným trendem v polymerních kompozitech je přechod z reaktoplastických na termoplastické matrice. Proces vytvrzování reaktoplastů je obtížnější

kontrolovat, uvolňují se sekundární výpary a takto předimpregnované textilie mají omezenou skladovatelnost. Na rozdíl od reaktoplastů je zpracování termoplastů založeno na fyzikálním procesu úplného nebo částečného tavení, poté jsou vytvrzovány při pokojové teplotě. Pre-pregy z termoplastů mají neomezenou dobu skladování, vynikající chemickou odolnost a výrazně vyšší houževnatost než reaktoplasty. Termoplasty mají také vyšší viskozitu, což vede k nedokonalému smáčení vláken pryskyřicí. [10]

2.1 Chyby a poruchy kompozitů

Design kompozitu už od počátku bere v potaz účelové využití finálního produktu a jeho mechanické namáhání a zatížení. Volba způsobu výroby a výroby vláknitých kompozitů závisí nejen na jejich příslušné oblasti použití, ale také na typu, materiálu a vlastnostech vláken a matrice. Vady kompozitních materiálů mohou být způsobeny nedodržením technologického procesu během výroby, v důsledku nesprávného použití kompozitů anebo vlivem degradace materiálů. Matrice a vlákna mohou být samy o sobě velmi křehká, ale díky synergickému účinku poskytuje spojení vláken a matrice určitou odolnost proti křehkostnímu selhání. Šíření trhlin ve směru kolmém na vlákna se snižuje na rozhraní maticového vlákna a mění směr podél tohoto rozhraní. Tento proces je vylepšen povrchovou úpravou vláken v případě křehkých matic s malým celkovým prodloužením (keramická a grafitová matrice), což snižuje adhezi matrice k vláknu [10].

Nejběžnějšími defekty v mikrostruktuře kompozitů z polymerních vláken jsou nejen shluky dutin a bublin, ale také díry, póry a praskliny. [10]



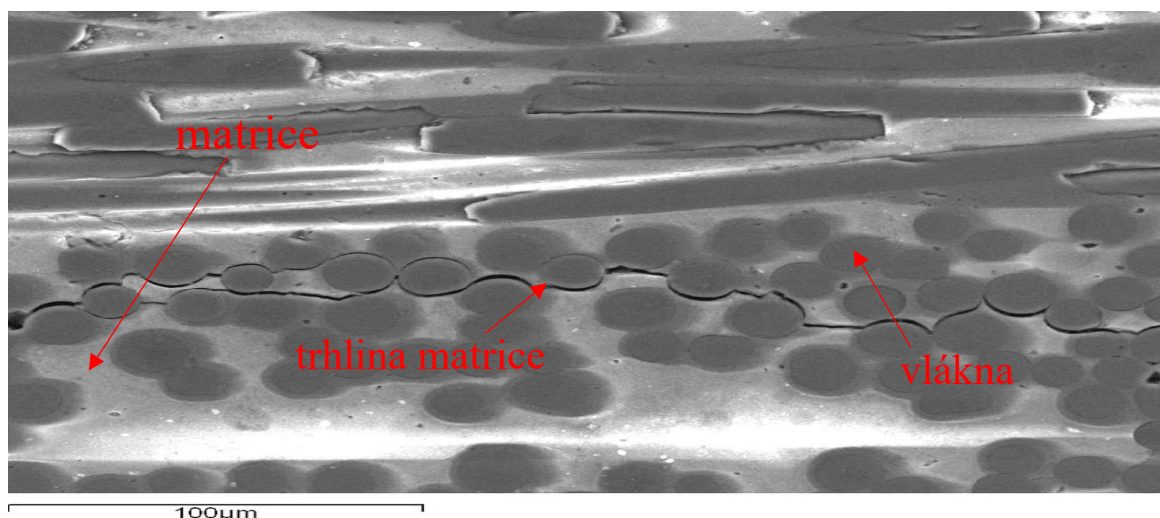
Obrázek 10 - strukturní vady kompozitu [36]

2.1.1 Trhliny

Většina polymerních kompozitů je během výroby, skladování a používání vystavena mechanickému zatížení a faktorům prostředí. V důsledku toho mohou v kompozitech vznikat mikrotrhliny během statického, dynamického a únavového cyklického zatížení různých typů, jako je tah, tlak a střih. [11]

Vystavení různým podmínkám prostředí, jako je teplota, vlhkost, chemikálie a záření, také způsobuje tvorbu a šíření mikrotrhlin. Polymerní kompozity vystavené synergickým účinkům mechanického zatížení a expozice prostředí jsou obvykle náchylnější k tvorbě a šíření mikrotrhlin. Mikrotrhliny v polymerních kompozitech okamžitě způsobují zhoršení termomechanických vlastností a slouží také jako iniciátor dalších forem poškození; delaminace a mezifázová vazba mezi vlákny a matricí způsobují zlomení vláken a vytvářejí cesty pro vstup vlhkosti, kyslíku a jiných korozivních tekutin. Mikrotrhliny tedy mohou nakonec vést k celkové degradaci materiálu a ovlivnit dlouhodobou životnost polymerních kompozitních materiálů. [11, 13]

Bylo navrženo několik modelů pro polymerní kompozitní systém, ve kterém se iniciuje trhlinka v matrici. U daného, vláknem vyztuženého kompozitu, kde je vlákno uchopeno polymerní matricí, je prasklina matice zastavena vláknem. Po zvýšení zátěže začne kolem vlákna procházet trhlinka, aniž by došlo k porušení mezifázové vazby. Mezifázové stříhání a boční smrštění vlákna vedou k porušení vazby a dalšímu nárůstu trhliny. Po velkém množství narušení vazeb se vlákna zlomí v některých slabých místech v matrici a dojde k dalšímu prodloužení trhlin. K úplnému selhání kompozitu dochází, když je konec zlomeného vlákna vytažen proti třecímu sevření matrice. [8, 11]



Obrázek 11 - trhliny polymerní matrice [39]

2.1.2 Delaminace

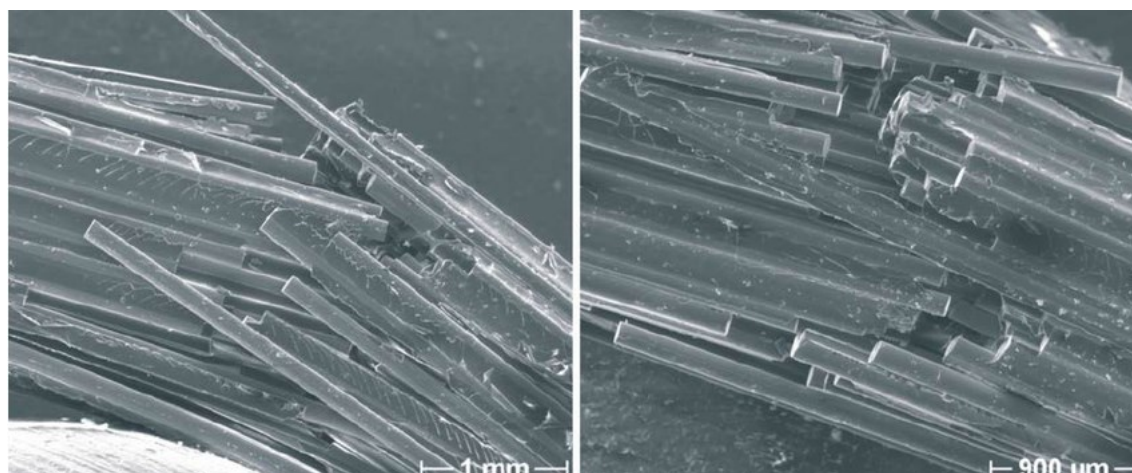
Delaminace je způsob porušení, kdy se materiál láme na vrstvy. U laminovaných kompozitů často nejprve selže adheze mezi vrstvami, což způsobí oddělení vrstev. Například u plastů vyztužených vlákny jsou vrstvy vysoce pevné výztuže (např. uhlíkové vlákno, skleněné vlákno) spojeny dohromady mnohem slabší polymerní matricí (např. epoxid). Zejména zatížení aplikovaná kolmo na vrstvy s vysokou pevností a smyková zatížení mohou způsobit prasknutí polymerní matrice nebo oddělení vláknité výztuže od polymeru. [37]



Obrázek 12 – delaminace vzorku č.2

2.1.3 Zlomení vláken

Lom vláken je hlavním způsobem poškození laminátů vystavených cyklickému namáhání v tahu a tlaku. K lomu vlákna dochází během všech tří fází únavové životnosti. některé poruchy jsou náhodné lomy statisticky slabých vláken, ale většina lomů vláken je spojena s trhlinami matrice v sousedních vrstvách. [38]



Obrázek 13 – snímek lomu vláken vláknového kompozitu při třídobovém ohybu [40]

3 Kompozity a sport

Sport je nezbytnou součástí zdravého života a životního stylu lidí po celém světě. S šířením vzdělání se stále více zvyšuje povědomí o tělesné hygieně a fyzické zdatnosti mezi lidmi. Fyzické aktivity chrání lidi před několika chorobami způsobených zanedbaným životním stylem, jako je diabetes, hypertenze, obezita, vysoký nebo nízký krevní tlak a tak dále. Pomáhá také dětem růst fyzicky zdravě a fit. Jejich kosti rostou silnější a zdravější a vyvíjí se jim silnější kardiovaskulární systém. Životní úroveň lidstva se zlepšuje a díky jiným technologiím jako třeba internet, je sport čím dál dostupnější, jak ke sledování, tak k hraní. [7, 41]

Sport je oknem k pokroku ve vědě a technice. Pokroky v materiálové technologii hrají významnou roli při zlepšování výkonů sportovců. Moderní sporty, dříve začínající u přirozeného, jednoduchého vybavení a činnosti, se postupně vyvinuly v high-tech pokročilé materiály, vybavení a velice komplexní výkony. Tradičně byla většina sportovního vybavení vyrobena ze dřeva a kovu, které byly těžké, nepohodlné a málo funkční. Nyní existují lehké, pevné a odolné sportovní vybavení vyrobené z polymerního materiálu. Požadavky průmyslu sportovního zboží vyžadují vysoce funkční a pokročilé materiály, které dokážou splnit specifické požadavky sportu a zároveň jsou nákladově efektivní. Fyzické aktivity jako chůze a běh nevyžadují žádné speciální vybavení, kromě obuvi a oblečení, ale pro jiné sportovní aktivity je nezbytné mít správné vybavení. Dnešní trh sportovního průmyslu nabízí širokou škálu vybavení od začátečníků až po profesionální sportovce. Díky polymerním kompozitům se podařilo sporty daleko více rozšířit a zpřístupnit téměř komukoliv na světě. Od rámu jízdních kol, rybářských lodí a prutů, bobů, fotbalových přileb, hokejek, golfových holí, hrazd, skákacích prken, kajaků, bradel, tenisových raket až po veslování. Kompozitní materiály ze skelných a uhlíkových vláken poskytují odolné a lehké vybavení, které pomáhá sportovcům dosáhnout jejich nejlepšího výkonu. [6, 17]

3.1 Historie kompozitu a sportu

Příběh úspěchu uhlíku ve sportu nepochybně začal u profesionálů. Všude tam, kde se vždy hledá optimum, kde lepší materiál může přinést rozhodující milisekundy nebo přesnost a – to je také pravda – kde peníze obvykle nejsou rozhodujícím faktorem, je karbonové vybavení v soutěžních sportech stálíci již po dekády. Právě díky svým vlastnostem je karbon ve sportu ideálním materiálem pro sportovní vybavení a doplňky. Sportovci a inženýři to vědí už nějakou dobu a pozorně sledují každou novinku v oboru.

Jedním z vědeckých průkopníků byl Berlínský institut pro výzkum a vývoj sportovního vybavení. Tamní odborníci se tímto tématem zabývají od roku 1976, kdy uhlík poprvé ukázal svůj obrovský potenciál v éře NDR. Tehdejší dominantní výzkumná oblast stavby lodí, zejména pro veslování, kanoistiku a plachtění, zůstala od té doby stále aktuální. Začátkem 80. let se přidala cyklistika, nejprve s diskovými koly, poté i s kompletními rámy. Novější výzkumy se soustředí i na vybavení pro zimní sporty, jako jsou lyže, helmy, lední brusle či hokejové hole. [7, 17]

3.2 Lední hokej – hokejové hole

Počátky ledního hokeje se datují do 80. let 19. století v Kanadě a Evropě. Od té doby se vyvinula v rychlou hru s mezinárodní přitažlivostí. Kromě rostoucí popularity se hokej stává stále sofistikovanějším z hlediska technologických inovací, designu vybavení a zlepšení v tréninku a herních strategiích. Kvůli speciálním podmínkám prostředí (např. nízké povrchové tření) vyžaduje lední hokej jedinečnou sadu dovedností. Tyto dovednosti lze rozdělit do obecných kategorií bruslení, střelba, kontrola puku a celková koordinace pohybů celého těla a vjem hry. [22]

3.2.1 Historie hokejové hole

Historici se domnívají, že hokejka (a hra samotná) mohla pocházet z kmene Mi'kmaq domorodých Američanů, kteří žili v atlantické Kanadě kolem poloviny 19. století. Tyto hole byly vyrobeny z bříz a habrů a původně se hokejka nazývala Mic-Mac. Habr byl tak silné dřevo, že se mu často přezdívalo „železné dřevo“. Původní hokejky více připomínaly dnešní pozemní hokejky než moderní hokejky na led a byly vyřezány z jednoho souvislého kusu dřeva. V roce 2006 byla hůl vyrobená Mi'kmaqi v letech 1852-1856 prodána v aukci anonymnímu Kanadánovi za 2,2 milionu dolarů. Tato hůl byla v té době uznávána jako nejstarší hokejka na světě. Hůl má v současné době hodnotu kolem 4,2 milionu USD. [22]



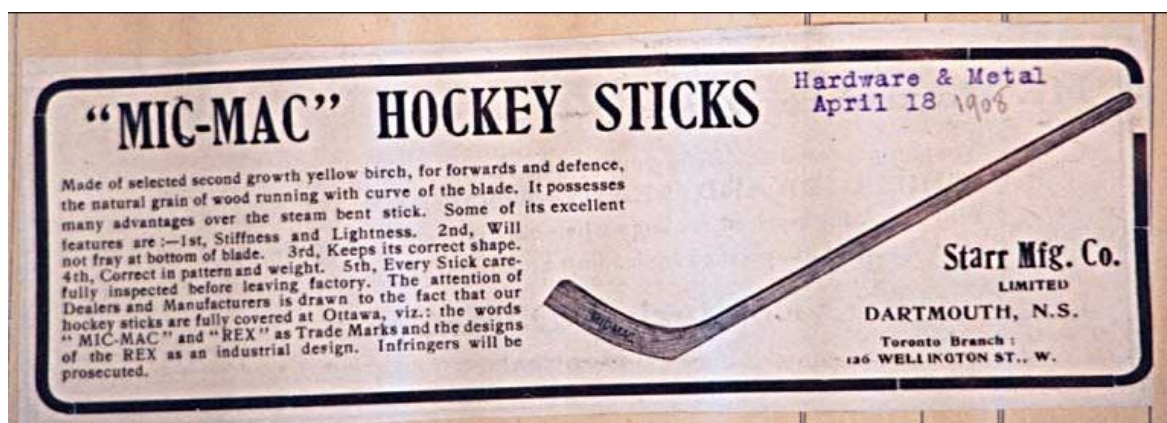
Obrázek 14 - původní hokejová hůl kmene Mi'kmaq [26]

3.2.1.1 První hole

Zásoby habrů se nakonec začaly snižovat, protože byly vynikajícími materiály i pro mnoho dalších produktů, a tak habr začaly jako hlavní výrobní materiály nahrazovat žlutá bříza a jasan. Jasan nakonec zvítězil nad břízou a ve 20. letech 20. století to bylo dřevo preferované pro výrobu dvoudílných dřevěných holí.

Slavná kanadská hokejová společnost Hespeler začala vkládat čepele do spoje a lepit je na dřevěnou násadu. Hespeler nakonec podal patent na jejich dvoudílný design.

V tomto bodě historie byly čepele hokejky stále rovné a ne zakřivené, ale předpokládá se, že Cy Denneny z hokejového týmu Ottawa Senators byl první, kdo v roce 1927 zakřivil svou hokejku do „banánovité čepele“. Navzdory inovaci již tak brzy, v tehdejší hokejové komunitě nezískala metoda záhybu hole žádnou popularitu. V této době byly populárními údery backhandy a švihnutí zápěstím. Střela takzvaným „golfem“ existovala, ale nikdo se moc nechtěl do holí opírat, aby se nezlomily. [22]



Obrázek 15 – reklama z počátků 20. století na hokejovou hůl Mic-Mac [22]

3.2.1.2 Hokejové hole první půlky 20. století

Mezi 20. a 50. léty 20. století nezaznamenala hokejka velký pokrok v technologiích. V padesátých letech začaly společnosti jako Sher-Wood, Canadien a Northland vyrábět čepele obalené skelným vláknem. Kromě balení holí do sklolaminátu, začaly také společnosti používat jiné dřevo. Lehké dřevo z osik vystřídalo tvrdé a odolné dřevo z jasanu, což vedlo k celkovému snížení hmotnosti hokejek. Ačkoli zakřivené čepele byly objeveny již dříve, je popularizace zakřivené čepele připisována hokejistovi slovenského původu, bodově nejlepšímu hráči Chicago Blackhawks všech dob a členu Hokejové síně slávy, Stanu Mikitovi.

Údajně chtěl svou čepel zlomit mezi lavičkami na střídačce, ale pouze ji napraskl a zahnul. Při hraní s touto částečně zlomenou holí zjistil, že střely může vystřelit rychleji a že jsou silnější. Mikita a jeho týmový kolega Bobby Hull začali pracovat na zdokonalení metody zakřivení čepelí – nahřívání čepelí pod horkou vodou a ohýbání čepelí ve dveřích. [22, 27]



Obrázek 16 – hokejová hůl Stanleyho Mikity [27]

3.2.1.3 Hokejové hole 70. a 80. let 20. století

Jak se zakřivené čepele stávaly populárnějšími, tak se rychlost střel zvyšovala. NHL proto byla nucena zavést pravidla omezující zakřivení čepelí hokejek. V sezoně 1969-70 byla zpočátku omezena na křivku 25 milimetrů a brzy poté byla snížena na limit křivky 12,5 milimetru. Sedmdesátá léta přinesla na trh jednu z nejpůvodnějších holí všech dob, Sher Wood P.M.P. 5030. Hůl s osikovým jádrem s vícevrstvou laminací dřevem z břízy a čepelí z amerického jasanu zakrytou skelným vláknem odolným proti nárazu. Tato hůl byla jednoduše nejpůvodnější a nejoblíbenější holí na světě. V této době dominovaly trhu kanadské společnosti Sher Wood a Canadian. S přechodem do 80. let 20. století vstoupily na scénu společnosti jako Koho a Titan, které si svými hokejkami získaly popularitu u hráčů, a tak si ukotvily své místo na trhu. [22,28].

Vzhledem k tomu, že výrobci kriketových a baseballových pálek experimentovali s jinými výrobními materiály, byla hokejovému světu v 80. letech představena první hliníková hůl. Tato jednodílná hliníková hůl nebyla ještě příliš populární, protože neměla dostatečný cit při manipulaci s pukem, a tak se její popularita projevila až později. [22,28]



Obrázek 17 - Paul Coffey s holí Sher-Wood P.M.P. 5030 [25]

3.2.1.4 Hokejové hole 90. let

Aby vyřešili problém nedostatku citu při kontaktu s pukem, začali výrobci vytvářet hliníkové násady neboli rukojetě (shafty) a vkládat dřevěné čepele do nich. To se ukázalo jako vítězná kombinace. Hliníkové rukojetě byly pevné, robustní a odolné. Dřevěné čepele byly levné a snadno vyměnitelné. Hliníkové rukojetě také umožnily výrobcům vytvořit velmi konzistentní hmotnost a flex, něco, co dřevěné hole až do této chvíle postrádaly. Hliníkové rukojetě zpopularizoval sám Wayne Gretzky. Gretzky podepsal smlouvu s firmou Easton na používání jejich hliníkové násady HXP 5100. Tento krok popularizoval hokejku po celém světě a byl vrcholem hliníkových hokejek v hokejové historii. Hybridní hokejky z hliníku a dřeva se však neobešly bez stížností. Mnozí si stěžovali, že hokejky byly tvrdé a že dřevěná čepel stále nepůsobila tak dobře při manipulaci s pukem jako s plnou dřevěnou hokejkou. K vyřešení tohoto problému byl největší pokrok hokejek hned za rohem. [22]



Obrázek 18 - hliníková dvoudílná hůl Easton [24]

3.2.1.5 Dvoudílné kompozitní hole

V roce 1995 byla představena první kompozitová hokejová čepel. Postupem času byly také představeny i kompozitní rukojetě, které byly spárovány s kompozitními čepelimi. To posunulo celou násadu na zcela novou úroveň výkonu, které nebyly dosud známy. Lidé měli lehké, flexibilní rukojeť a lehkou vyváženou čepel, které společně vytvořili velice dobrou kombinaci pro hráče. Spojení těchto dvou však nikdy zcela nepřineslo stejný cit pro kontrolu puku, jaký nabízela dřevěná hůl z jednoho kusu, jako je PMP 5030. [22]

3.2.1.6 Jednodílná kompozitní hokejová hůl

V roce 2001 spatřila světlo světa vůbec první hokejku z jednoho kusu kompozitu. Easton Hockey uvádí na trh začátek éry jednodílných kompozitních hokejových holí. Jednodílná hůl se ihned mezi hráči v NHL ujala a postupně se rozšířila do celého světa.

Původní model Synergy byl nejen lehký, ale nakonec se mu podařilo zachytit ten pocit z jednoho kusu hole, který tak dlouho chyběl u ostatních dvoudílných kombinací.

Ostatní společnosti rychle naskočily do rozjetého vlaku. Firma CCM vydala modrou hůl „Vector“ krátce po firmě Easton a následně navázala firma TPS s jednodílným typem hole modelem Response. [22]



Obrázek 19 - první jednodílné kompozitní hole Easton Synergy a CCM Vector [43]

3.2.1.7 Shrnutí vývoje hokejových hólí

Hokejové hole si od svého zrodu prošly značným technologickým vývojem. Od počátku samotné hry a dřevěných hólí, přes experimenty s dvoudílnými hybridními hliníkovo dřevěnými holemi až po skutečně jednodílnou lehkou kompozitovou hůl. Inovátoři, designéři a konstruktéři se každým rokem snaží sami sebe a konkurenci překonávat co se týče vylepšení herních kvalit hokejek. Přestože je mnoho jednotlivců s dnešními hokejovými holemi nadmíru spokojeno a pravděpodobně si nedokážou představit, jak by výrobci mohli přijít s vylepšením designu, firmy se neustále předhánají v inovacích technologií tak, aby doručili cílovým zákazníkům ten nejušpovivější pocit ze hry a zároveň zákazníka uhranuli i elegantním vzhledem. Pro lepší kontrolu puku a rychlejší výstřel přišla firma Bauer s inovací, a to výřezem v čepeli hole (obrázek 20), kterým spoustu hráčů po celém světě určitě zaskočila. [22, 29, 42]

Hokejka se může zdát jen jako základní forma vybavení pro sport, ale rychlost pokroku a vývoje technologií kompozitní výroby posunula hokejky a celkovou úroveň a rychlost hry na špičkovou úroveň, kde sebemenší detaily hrají obrovskou roli. Státisíce hráčů po celém světě hraje lední hokej. Drtivá většina z nich s celokompozitovými holemi. Většina vrcholových a profesionálních hráčů si ani nedokáže představit hru jinak než s lehkou kompozitovou hólí a citem, který poskytuje při kontrole puku na ledě. [42]



Obrázek 20 - hokejová hůl Bauer S22 Sling Grip [29]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 Cíle bakalářské práce

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit základní přehled o polymerních kompozitech, popsat jejich rozdělení, vlastnosti, vady a poskytnout přehled výrobních technologií na výrobu dutých profilů. Práce také poskytne stručné informace o užití materiálů v oblasti sportovních aplikací a jejich historii s důrazem na hokejové hole. Pro experimentální pozorování jsme si zvolili šest vzorků kompozitních hokejových holí z různých cenových kategorií a s různým rokem výroby. Vzorky byly podrobeny optické analýze a následně vyhodnoceny.

V jednotlivých částech bakalářské práce bylo za potřebí:

1. Vypracování literární rešerše na problematiku mikrostruktury a vlastnosti kompozitních materiálů.
2. Polymerní vlákna, vlastnosti a použití. Chyby kompozitních materiálů.
3. Polymerní kompozity v sportovních aplikacích, aktuální přehled, způsoby výroby, materiály.
4. Vyberte vhodný díl pro experimentálně pozorování.
5. Experimentální vyhodnoťte mikrostrukturu pomocí optických metod.
6. Závěr a diskuse dosažených výsledků.

5 Experimentální část

S ohledem na mou celoživotní zálibu v ledním hokeji, který hraji od 3 let, jsem se rozhodl svou praktickou část zaměřit zkoumáním hokejových holí, respektive jejich rukojetí. V průběhu mé kariéry jsem měl možnost hrát s desítkami modelů hokejových holí a jako hráč jsem si všiml rozdílů u různých modelů. Jednalo se třeba o váhu, reakci hole na puk anebo výdrž hole. V té době jsem ovšem nepomýšlel, jak je vlastně hokejová hůl vyráběná nebo jaký vliv mají použité materiály na její vlastnosti. Cílem této části mé bakalářské práce je porovnat mikroskopickou strukturu různých cenových relací hokejových holí, vložit je do porovnání s rokem výroby a cílovou skupinu, pro kterou jsou účelně vyráběny.

5.1 Popis modelů hokejových pro sledování mikrostruktury

Hokejové hole se s rozmachem zájmu o tento sport musely přizpůsobit požadavkům tvrdších a rychlejších střel a celkové manipulaci s holí tak, aby poskytly hráčům napříč všemi kategoriemi i úrovněmi hry co nejlepší pocit ze hry. Lední hokej zažil v posledních 20 letech obrovský rozmach po celém světě. Vzniklo spousta nových značek, které měly zájem o porci trhu s hokejovými holemi. S technologickým rozmachem se postupně z holí dřevěných, přes dvoudílné, došlo až k holím celokompozitovým, které zatím vládou 21. století. Vznikly a stále vznikají nové výrobní postupy a ty již vymyšlené se pořád zdokonalují tak, aby náklady na výrobu byly co nejlevnější a výrobek byl co nejlehčí a nejkvalitnější. Ovšem s rostoucím zájmem začalo hrát lední hokej čím dál více dětí a připojili se i amatérští hráči. Firmy musely vymyslet způsob, jak dostat svou hokejovou hůl do rukou velké škály věkových a úrovnostních rozdílů ovšem na úkor rozdílné ceny. Tohle rozdělení dalo vzniku modelových řad hokejek a tím rozdělila hokejové hole vlastně i podle kvality své konstrukce. Levnější hole pro spíše amatérské hráče se liší užitím jiné, levnější výztužné pěny v čepeli a použitím levnějšího výztužného materiálu, skelných vláken. Na rozdíl od profesionálních hokejových holí, které jsou tvořené jako jeden kus pomocí karbonových tkanin s kvalitnější výztužnou pěnou v čepeli. [17, 22, 30, 33]

V rámci bakalářské práce pozorujeme šest typů hokejových holí (tabulka 3), které se odlišují rokem výroby a různou pořizovací cenou.

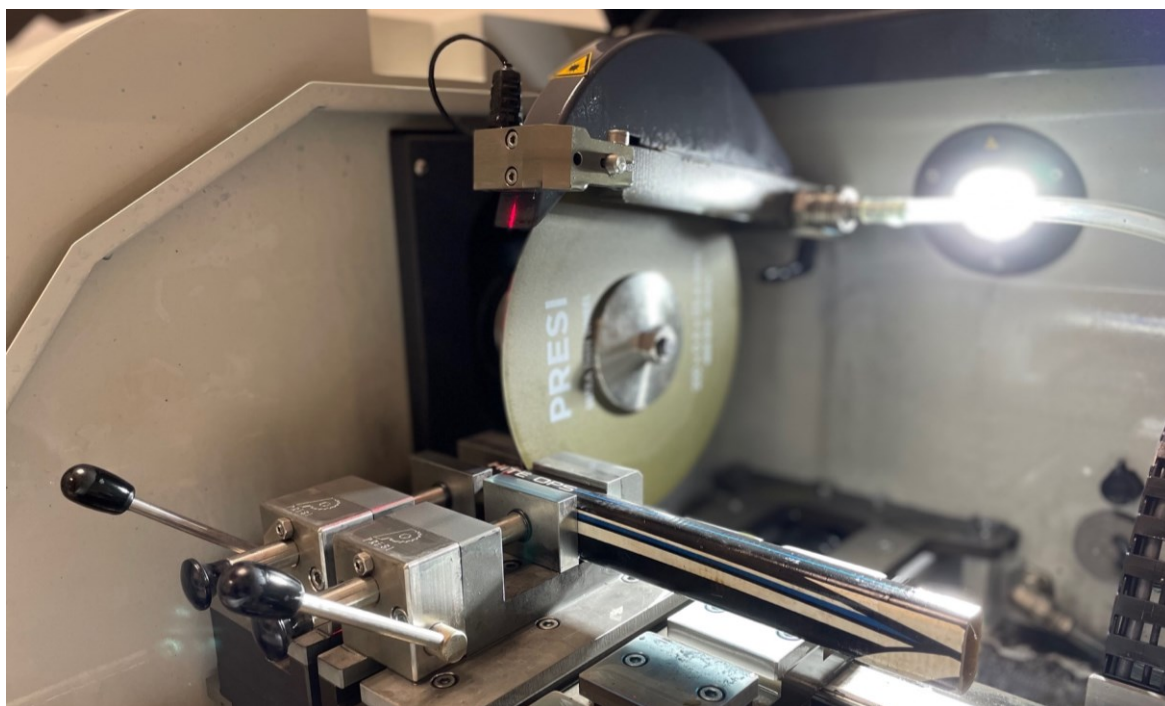
5.2 Příprava vzorků

Z mých vyřazených hokejových holí jsem si vybral nejvhodnější kusy z různých cenových relací a roků výroby. Na vzorky byly použity hokejové hole jak pro amatéry, tak

pro profesionální hráče. Z hokejových holí jsem si na úkosové pile nařezal kusy holí s délkou přibližně 250 mm, aby se následně v laboratoři vlezly do řezacího stroje.

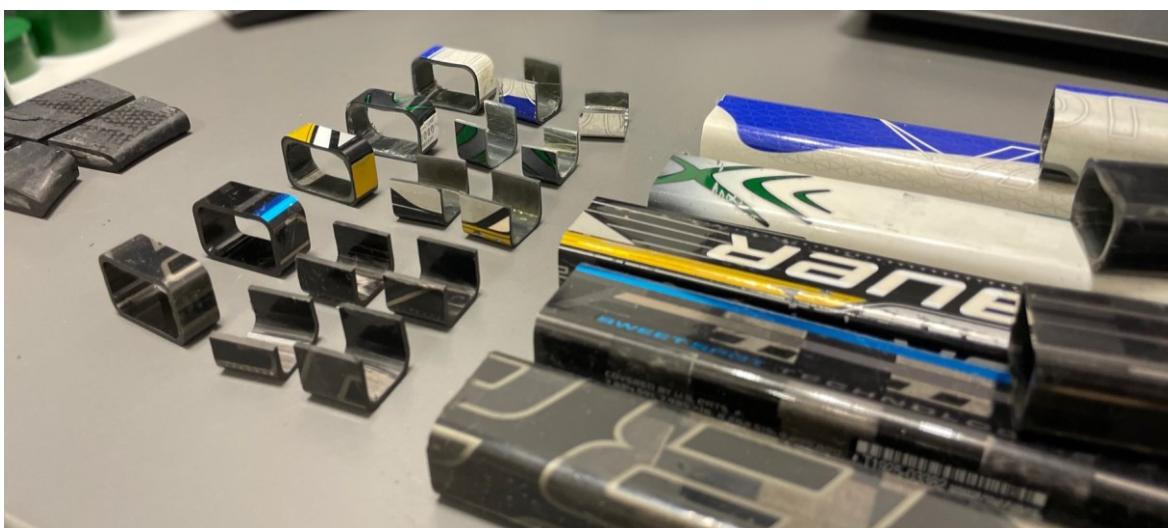
5.2.1 Řezání vzorků

Vybrané hole pro bakalářskou práci jsem musel co nejpřesněji nařezat na požadované rozměry k následovnému zalití. Delší 250 mm dlouhé vzorky jsem upnul do řezacího stroje a vzorky jsem nařezal na výšku ± 10 mm, tak aby se pohodlně vlezly do kalíšků pro zalití. K této činnosti byl použitý automatický řezací stroj firmy Presi model Mecatome T210 (obrázek 21). Každý cyklus řezání trval 60 s a kotouč s vzorkem byly po celou dobu chlazeny chladicí kapalinou. Pro řezání byl jsem použil řezný kotouč značky Presi.



Obrázek 21 - příprava pily k řezu vzorku

Po nařezání vzorků (obrázek 22) se vyselektovaly nejvhodnější vzorky pro zalití a následné povrchové vyleštění, abychom pro optickou analýzu dostali co nečistější a ostré snímky. Vybráno bylo celkem šest vzorků ze šesti různých modelů hokejových holí. Vybrané vzorky jsou z části rukojetě hole.



Obrázek 22 - nařezané vzorky hokejových holí

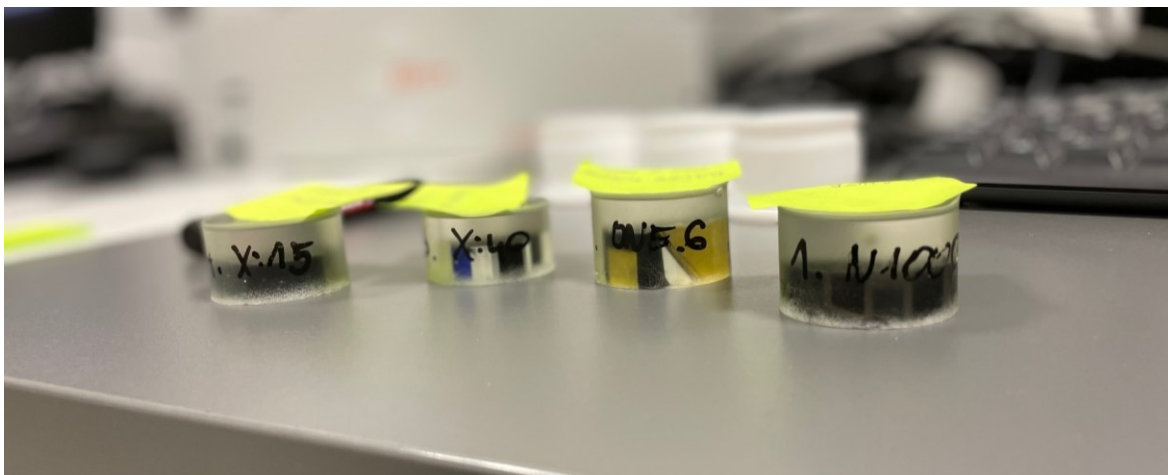
5.2.2 Zalítí vzorků

Pro zalítí vzorků jsme si smíchali práškovou akrylátovou pryskyřici s katalyzátorem. Nařezané vzorky jsme vložily do tlakového hrnce do kalíškových forem a zalili namíchanou směsí (obrázek 23). Následně jsme nechali vzorky vytvrdnout v přetlaku při tlaku 2 barů při běžné pokojové teplotě 24 ± 1 °C přibližně po dobu 2700 s.



Obrázek 23 - zalívání vzorků pryskyřicí

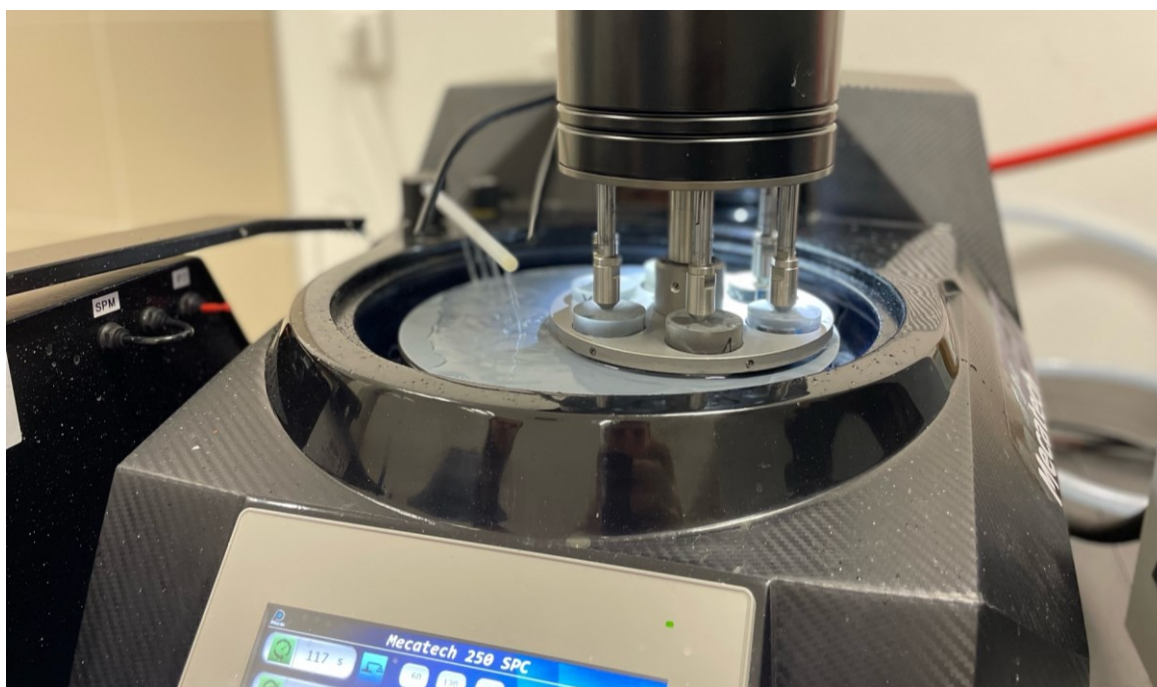
Po vytvrnutí jsme vzorky (obrázek 24) vyjmuli z kalíškových forem, zkontrolovali opticky kvalitu vytvrnutí a připravili jsme vzorky k následovnému povrchovému leštění.



Obrázek 24 - vytvrzené vzorky

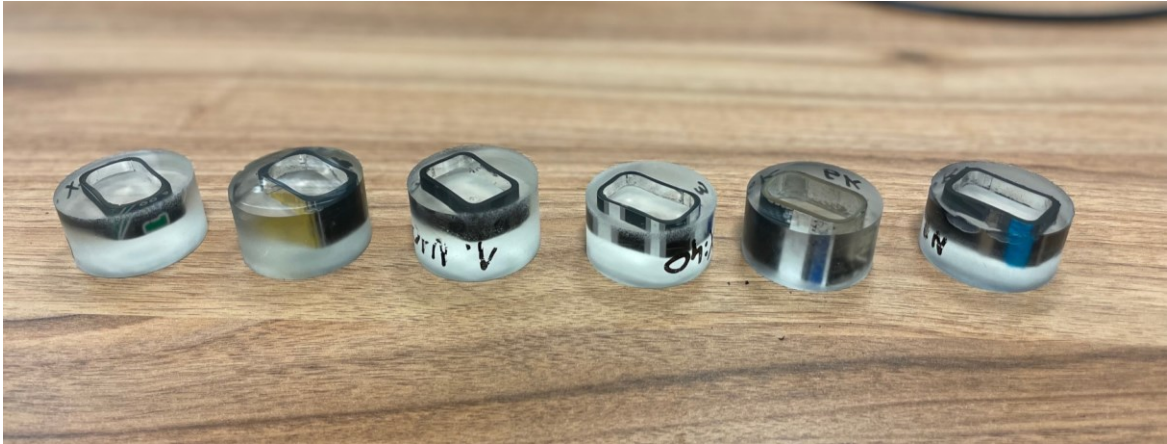
5.2.3 Leštění vzorků

Následné leštění probíhalo na stroji Presi Mecatech 250 SPC (obrázek 25). Postupné leštění vzorků probíhalo pomocí smirků P180, P320, P600, P1200, P2400, P4000 a na závěr jeden cyklus s diamantovou suspenzí 1 mikron. Vzorky se leštily celkem sedmi cykly. Každý cyklus trval 240 s při zatížení 1 N na vzorek. Spodní kotouč se smirkovým papírem se otáčel rychlostí 300 ot./min⁻¹ a kotouč se vzorky se otáčel rychlostí 150 ot./min⁻¹.



Obrázek 25 - leštění vzorků pomocí smirku

Na obrázku 26 můžeme vidět hladký vyleštěný povrch všech šesti vzorků po všech sedmi leštících cyklech, které nám zajistily námi požadovanou kvalitu a hrubost povrchu pro další zkoumání konfokálním mikroskopem.



Obrázek 26 - vyleštěné vzorky rukojeti

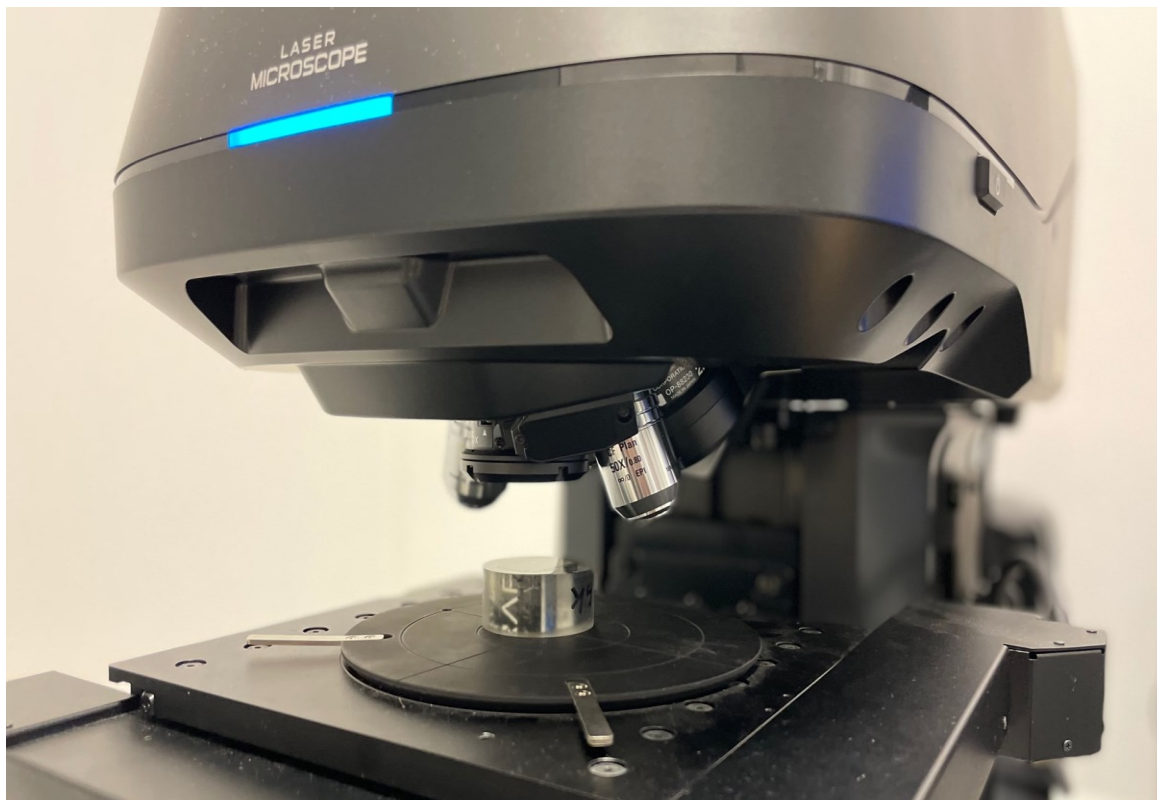
5.3 Konfokální laserová mikroskopie (CLSM)

Konfokální laserový skenovací mikroskop (CLSM) má oproti konvenčnímu širokouhlému mikroskopu velké výhody jako například schopnost ovládat hloubku ostrosti, eliminovat nebo redukovat informace z pozadí mimo ohniskovou rovinu, které vedou k degradaci obrazu anebo schopnosti sbírat sériové optické řezy z tlustých vzorků. Klíčovým prvkem je použití technik prostorového filtrování k odstranění neostrého světla nebo oslnění u vzorků, jejichž tloušťka přesahuje bezprostřední rovinu zaostření. Navíc jeho vysoké axiální rozlišení, ostrá kvalita obrazu a související kvantitativní analýza obrazu poskytují zásadní strukturní informace v mezoskopickém rozsahu pro plnou 3D realizaci mikrostruktury vzorků. [23]

Díky těmto jedinečným vlastnostem nyní konfokální laserová mikroskopie nachází širší uplatnění při studiu různých materiálů a procesů, jako je například separace fází v binárních polymerních směsích, lomová houževnatost ve slitinách, při určování zbytkových deformací v kovových kompozitech vyztužených vlákny a při mikrovizualizaci koroze. Mimo jiné dochází k rostoucímu počtu aplikací i v buněčné biologii, které se spoléhají na zobrazování fixních i živých buněk a tkání. Ve skutečnosti se konfokální technologie ukazuje jako jeden z nejdůležitějších pokroků, kterých kdy bylo v optické mikroskopii dosaženo. [23]

5.3.1 Optická analýza vzorků

Všech šest vyleštěných a připravených vzorků jsem si postupně vkládal do konfokálního laserového mikroskopu Keyence VK-X3000 (obrázek 27). Všechny vzorky jsem pečlivě prozkoumal pomocí zobrazovacího softwaru a vybral nejvhodnější oblast řezu pro vytvoření snímku pro následné podrobné zkoumání a popis.



Obrázek 27 - vyleštěný vzorek pod konfokálním mikroskopem

6 Experimentální pozorování mikrostruktury

V další části mé práce se budu zabývat popisem mikrostruktur zvolených vzorků popsaných v tabulce č.3.

číslo vzorku	Značka hole	model hole	část hole	rok výroby	cena nového výrobku [CZK]
1	Bauer	Supreme One.6	rukojeť	2012	cca 2600,-
2	Bauer	Nexus 1000	rukojeť	2012	cca 5500,-
3	Reebok	4K Graphite OPS	rukojeť	2010	cca 1600,-
4	Bauer	Nexus N2 PRO	rukojeť	2018	cca 7000,-
5	Bauer	Vapor X:40	rukojeť	2009	cca 2500,-
6	Bauer	Vapor X:15	rukojeť	2009	cca 1500,-

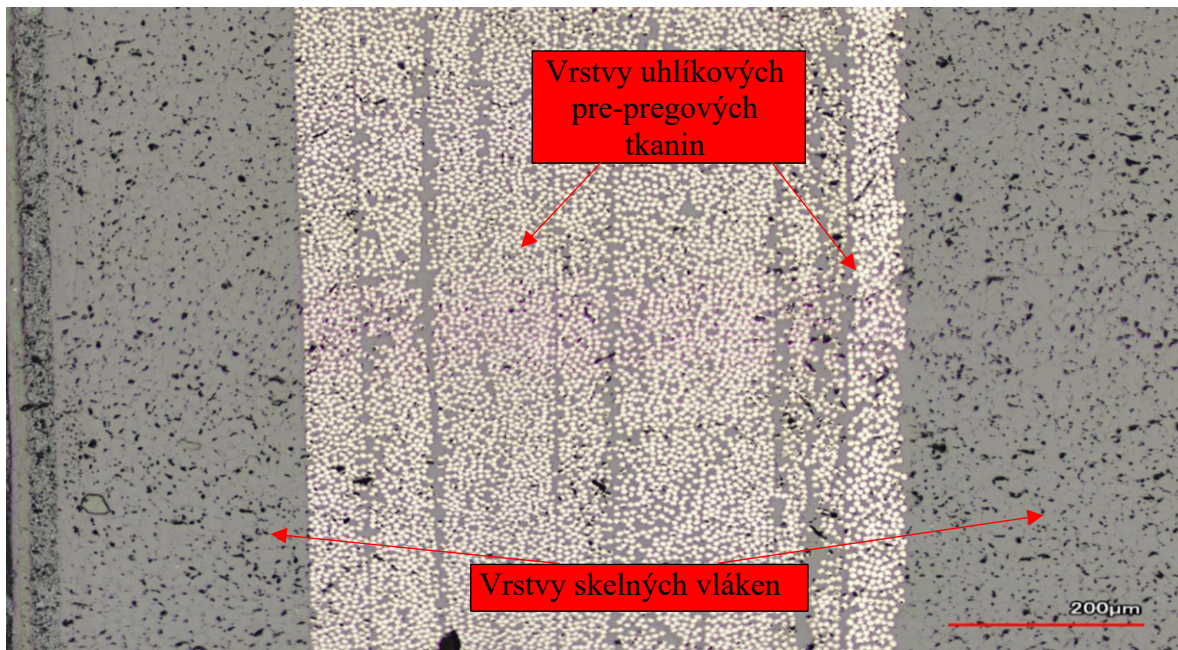
Tabulka 3 - tabulka vzorků hokejových holí pro experimentální část

6.1 Výsledky pozorování

V následujících podkapitolách se budu věnovat popisu získaných snímků každého z vzorků. Každý vzorek byl důkladně prozkoumán pomocí konfokálního laserového mikroskopu a byla vybrána optimální oblast pro vytvoření snímků. Pro každý vzorek bylo vytvořeno několik snímků při různých zvětšeních. Jako finální byly vybrány vždy tři obrázky ve třech různých zvětšeních, a to desetinásobném, padesátinásobném a stopadesátinásobném.

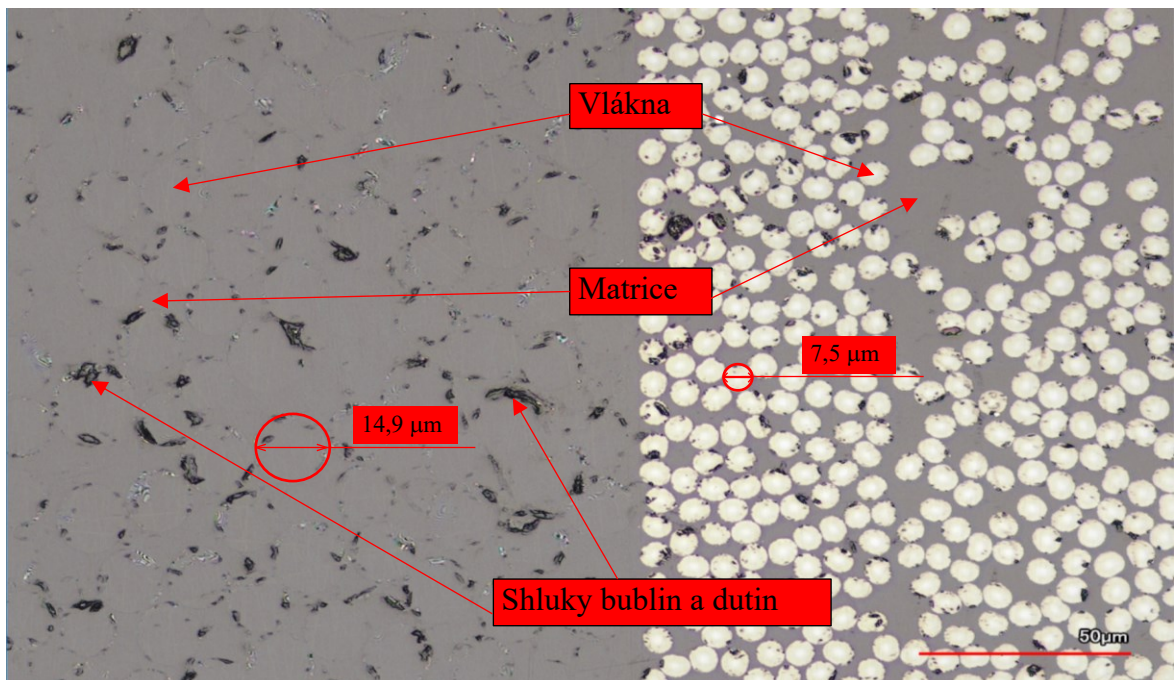
6.1.1 Vzorek č.1

Na obrázku 28 vidíme řez rukojetí hokejové hole vzorku č.1 v desetinásobném zvětšení. Na základě optického pozorování jsme zjistili, že se jedná o rozhraní dvou různých vrstev rozdílných vláken. Krajní šedé vrstvy na obrázku jsou podélná jednosměrná skelná vlákna. Prostřední bílá vrstva jsou vrstvy podélných jednosměrných uhlíkových vláken. Celkem můžeme vidět 10 vrstev tkanin podélných uhlíkových vláken. Celková šířka výztuže uhlíkovými vlákny je $\pm 500 \mu\text{m}$ což odpovídá v průměru $50 \mu\text{m}$ na jednu vrstvu tkaniny. Každá z vrstev skelných vláken má přibližně $300\mu\text{m}$. Mimo vlákna můžeme vidět černě zbarvená místa, která reprezentují vzduchové kapsy a shluky vzduchových bublin, dutin a pórů.



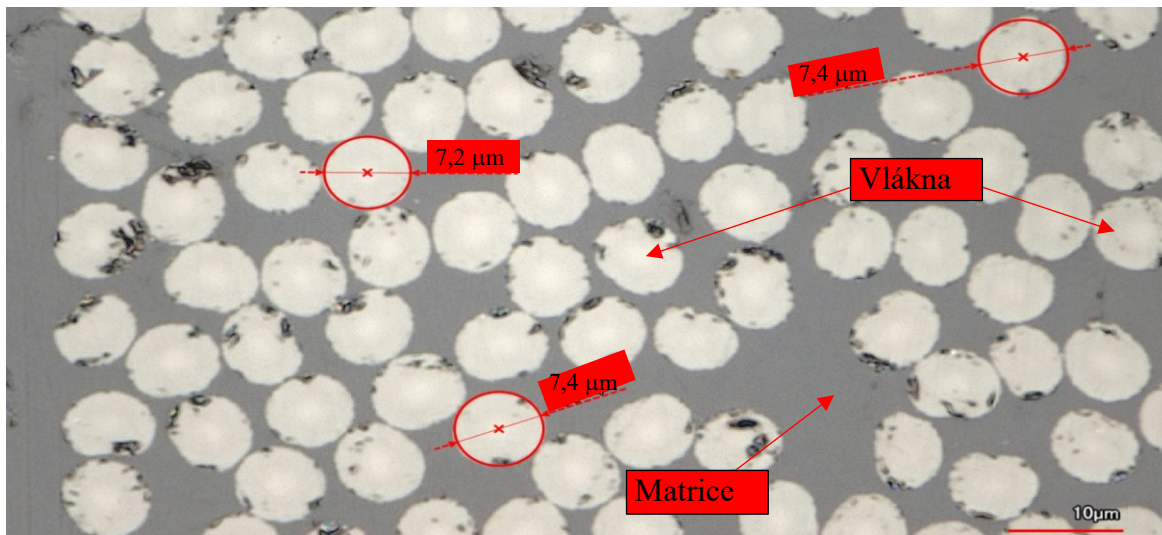
Obrázek 28 - řez rukojetí vzorku č.1 10x zvětšený

Na obrázku 29 můžeme vidět 50x zvětšený řez rukojetí vzorku č.1. Viditelné jsou dvě různá rozhraní různých vláken. V levé šedé části jsme pomocí optického pozorování zjistili, že vlákna jsou skelná, jelikož průměr vláken je přibližně 15 μm. V pravé světlejší části můžeme vidět podélná jednosměrná uhlíková vlákna, která mají zhruba poloviční průměr jako vlákna skelná. Předpokládáme, že jednotlivé vrstvy uhlíkových vláken na sebe byly pokládány pomocí pre-pregových tkanin o šířce přibližně 50 μm.



Obrázek 29 - řez rukojetí hokejové hole vzorku č.1 50x zvětšený

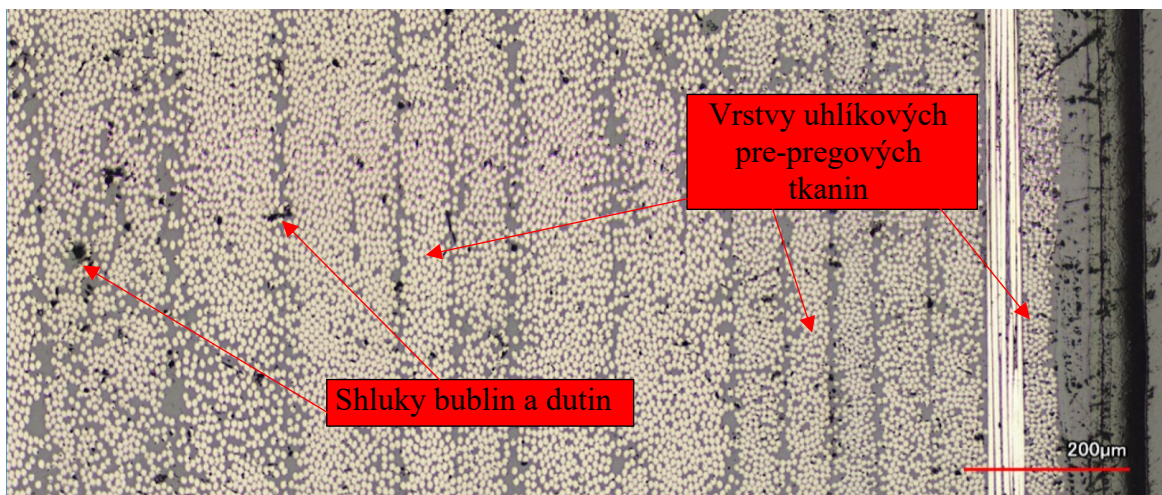
Na obrázku 30 vidíme 150x zvětšený povrch mikrostruktury vzorku č.1. Snímek je zaměřen na vrstvu uhlíkových vláken v matrici, které mají průměr $\pm 7,4 \mu\text{m}$ a mají téměř pravidelný kruhový tvar. Vlákná jsou podélná jednosměrná.



Obrázek 30 - řez rukojetí hokejové hole vzorku č.1 150x zvětšený

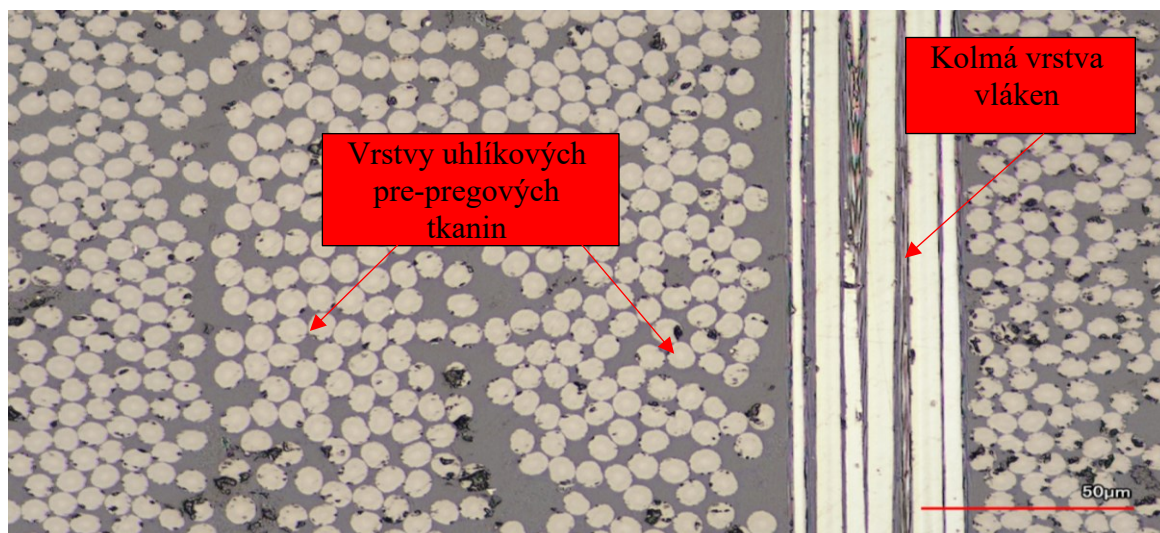
6.1.2 Vzorek č.2

Při optickém pozorování obrázku 31 jsme analyzovali řez rukojetí hokejové hole vzorku č.2 v desetinásobném zvětšení. Zjistili jsme, že se jedná o rozhraní několika na sebe kladených vrstev uhlíkových vláken. Vrstvy jsou tvořeny prepregovou tkaninou podélných jednosměrných uhlíkových vláken. Síla vrstev uhlíkových vláken je přibližně $60 \mu\text{m}$. V pravé části snímku vidíme pohledovou část hokejové hole, kde je jedna vrstva uhlíkových vláken kolmo orientovaná ke zbylým vrstvám. Mimo vlákna můžeme vidět malé množství matrice a černě zbarvená místa, která reprezentují vzduchové kapsy a shluky vzduchových bublin a dutin.



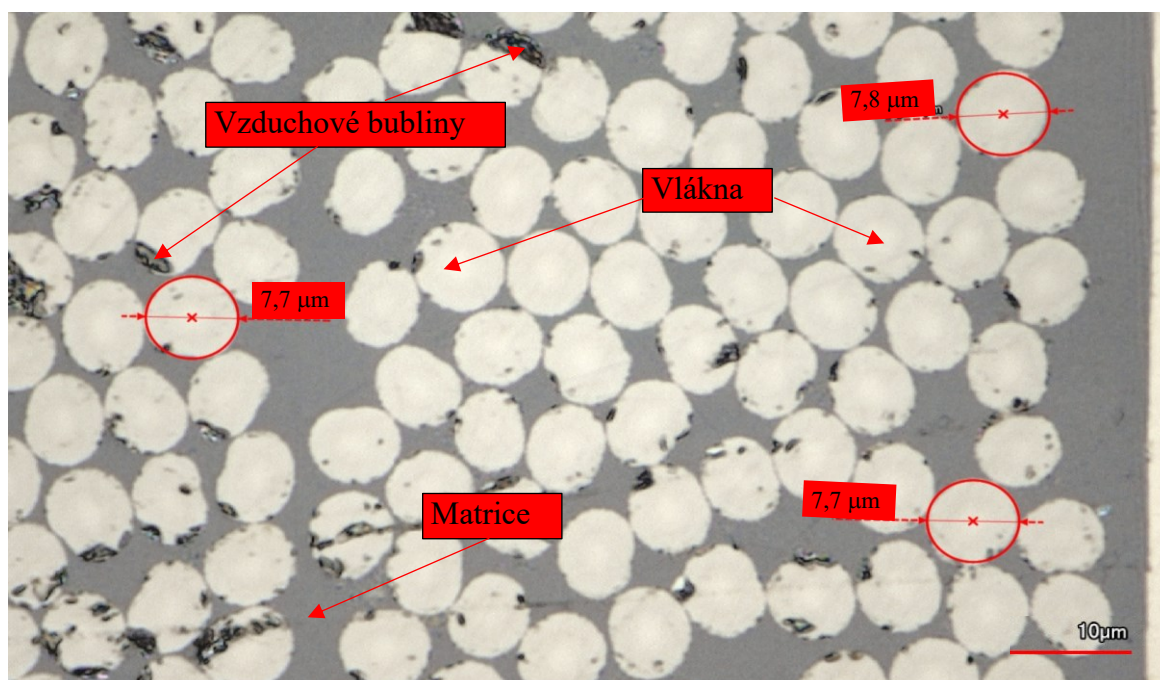
Obrázek 31 - řez rukojetí vzorku č.2 10x zvětšený

Na obrázku 32 níže vidíme mikrostrukturu pohledové části vzorku č.2 v padesáti násobném zvětšení. Vidíme několik vrstev prepregových tkanin o šířce přibližně 60 μm . Jedna vrstva uhlíkových vláken je kolmo orientovaná ke zbylým vrstvám. Tato vrstva se nachází na pohledové straně a tloušťka této vrstvy je přibližně 40 μm .



Obrázek 32 - řez rukojetě vzorku č.2 50x zvětšený

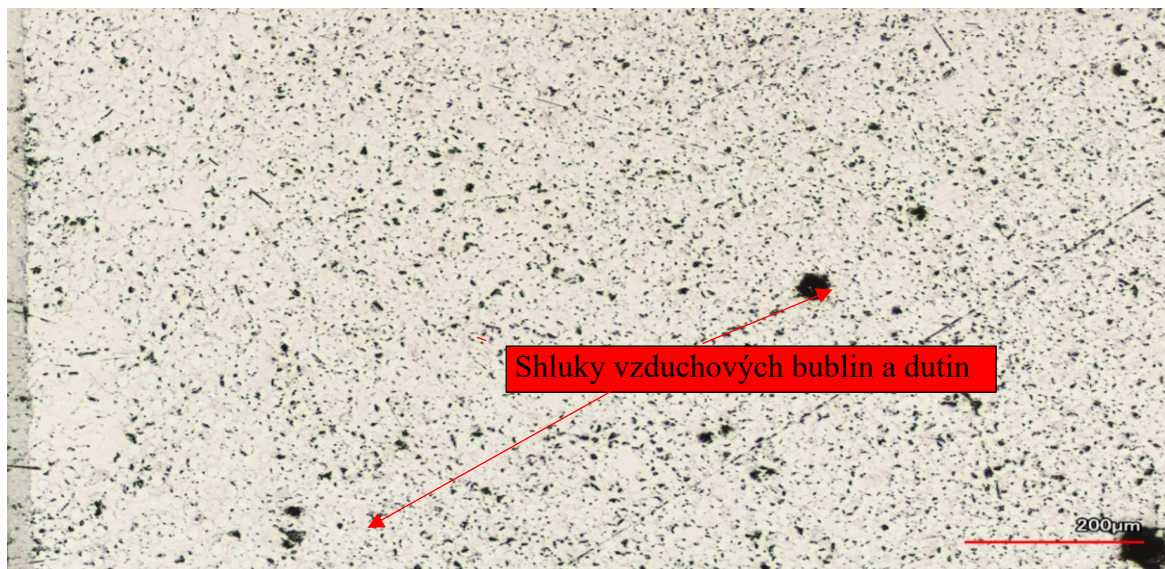
Na obrázku 33 vidíme 150x zvětšený povrch mikrostruktury jedné z vrstev vzorku č.2. Tato i ostatní vrstvy vzorku jsou tvořeny uhlíkovými vlákny, které mají průměr $\pm 7,7 \mu\text{m}$. Vlákna jsou podélná jednosměrně orientovaná a mají pravidelný kruhovitý tvar. Mimo vlákna můžeme vidět menší množství matrice a shluky bublin vzduchu.



Obrázek 33 - řez rukojetí vzorku č.2 150x zvětšený

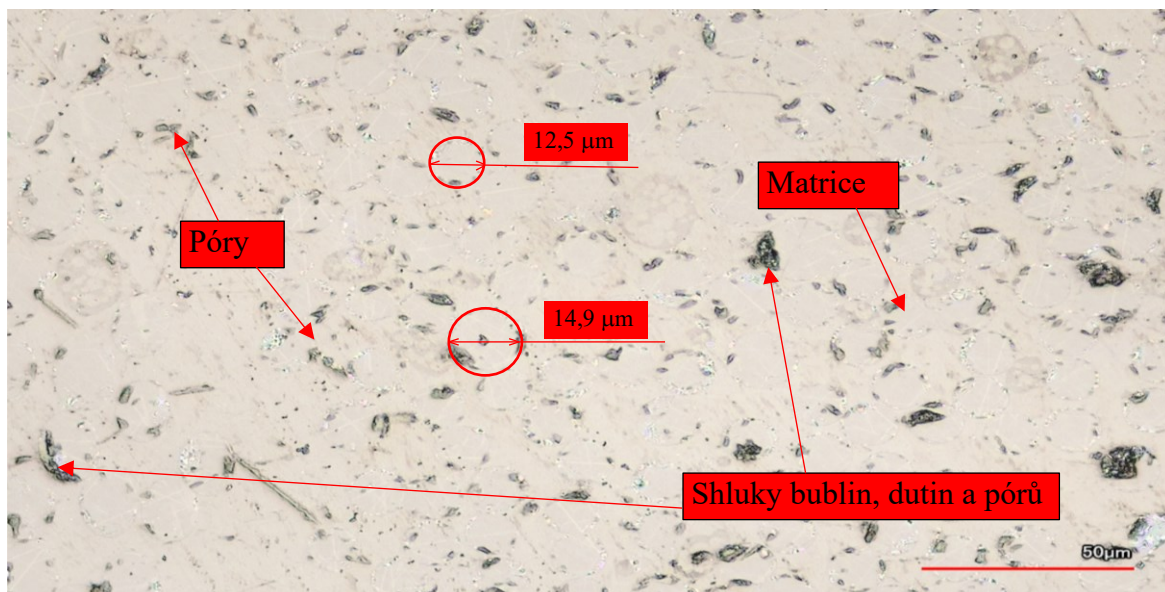
6.1.3 Vzorek č.3

Optické pozorování obrázku 34 nám odkrylo bílé rozhraní nahodile rozmístěných jednosměrně orientovaných podélných skelných vláken. Můžeme také vidět černá místa reprezentující póry a vzduchové kapsy, bubliny a dutiny.



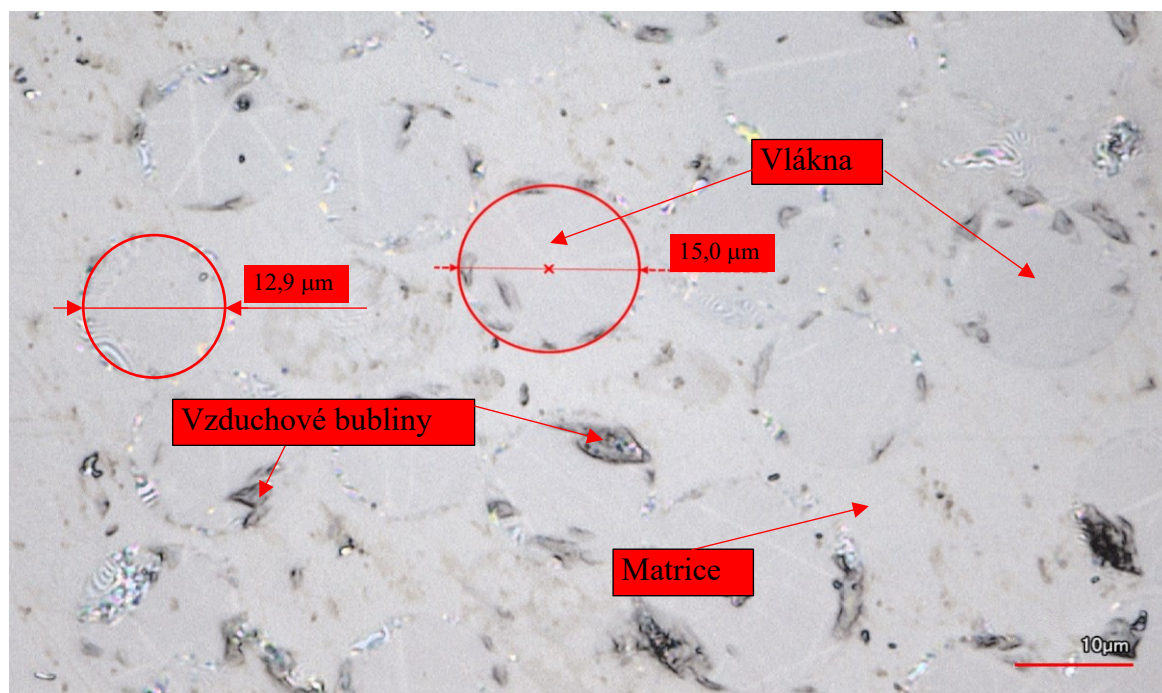
Obrázek 34 - řez rukojetí vzorku č.3 10x zvětšený

Na obrázku 35 můžeme pozorovat jednosměrně orientovaná skelná vlákna v matrici v rozmezí různých průměrů doprovázející tmavá místa znázorňující póry a shluky vzduchových bublin a dutin při padesátinásobném zvětšení. Nejmenší průměr je $\pm 12,5 \mu\text{m}$ až největší průměr je $\pm 15 \mu\text{m}$. Vlákna na sebe nejsou tolik nahuštěna, a tak je zde větší množství matrice.



Obrázek 35 - řez rukojetě vzorku č.3 50x zvětšený

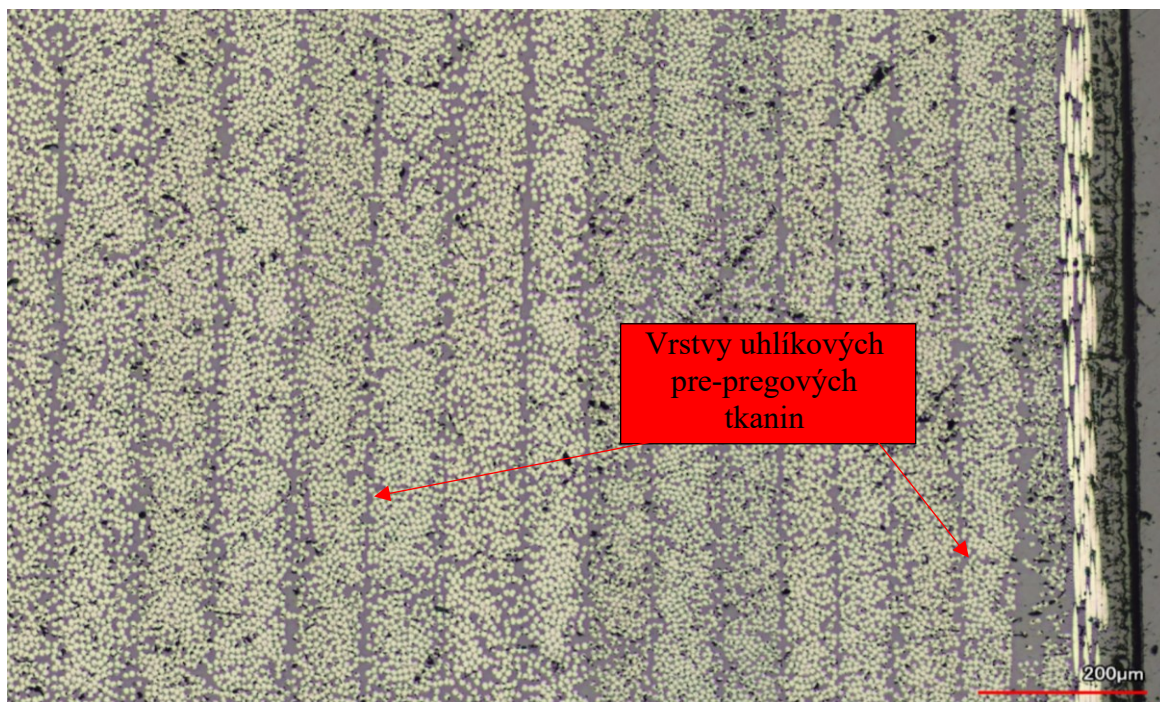
Na obrázku 36 vidíme 150x zvětšený povrch mikrostruktury vzorku č.3. Jedná se o jednosměrně orientovaná podélná skelná vlákna v matrici s pravidelným kruhovitým tvarem. Vlákna nepatrně lišící se v průměrech mají přibližně 12,5 až 15 μm . Mimo to můžeme ve zvětšeném snímku vidět i vzduchové kapsy a bubliny, které jsou vyobrazeny jako tmavá místa. Vlákna mají mezi sebou větší mezery, které jsou doprovázeny větším množstvím matrice.



Obrázek 36 - řez rukojetě vzorku č.3 150x zvětšený

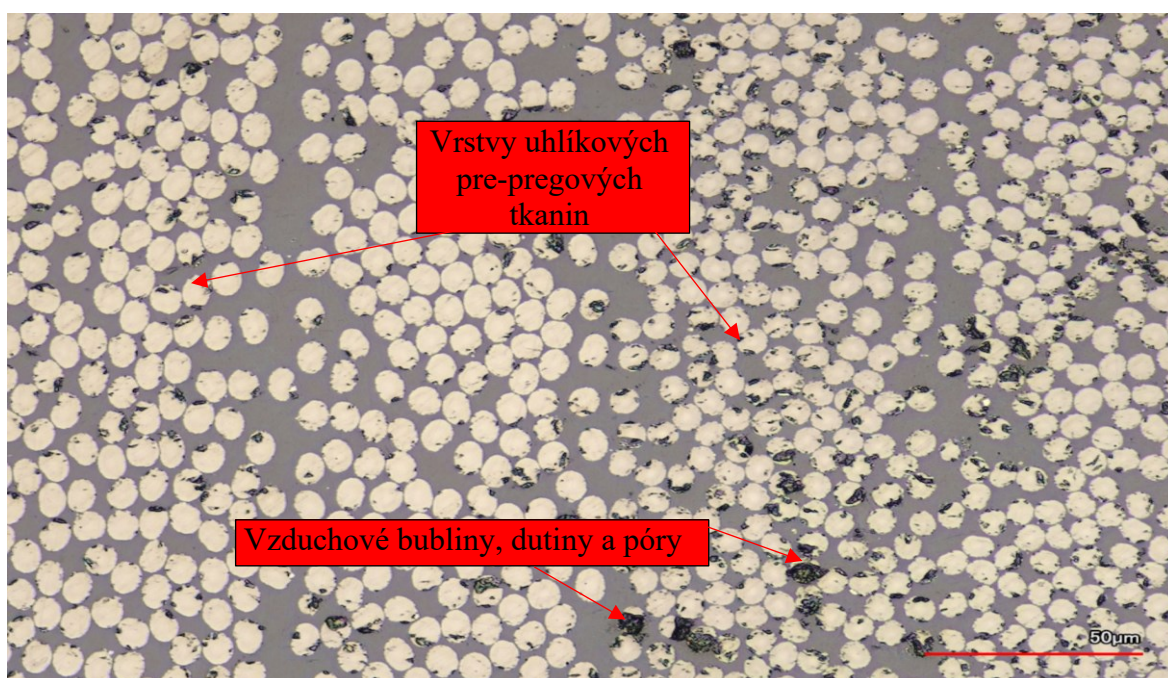
6.1.4 Vzorek č.4

Optické pozorování vzorku č.4 na obrázku 37 nám odhalilo jeho mikrostrukturu v desetinásobném zvětšení. Toto rozhraní několika na sebe kladených vrstev uhlíkových vláken čítá celkem 16 vrstev tvořených pre-pregovými tkaninami podélných jednosměrně orientovaných uhlíkových vláken. Šířka vrstev tkanin se zvětšuje směrem zprava doleva, kdy nejtenčí vrstva má přibližnou šířku 60 μm a nejširší vrstva vlevo má přibližně 100 μm . Můžeme si všimnout, že kladení vrstev je velice přesné a pravidelné. V pravé části snímku vidíme pohledovou část hokejové hole. V této části vidíme jednu vrstvu kolmo orientovanou ke zbylým vrstvám jednosměrných uhlíkových vláken. Mimo vrstvy vláken můžeme vidět v mikrostruktuře také menší množství matrice a černě zbarvená místa. Tyto místa jsou vzduchové kapsy a shluky vzduchových bublin a dutin a póry.



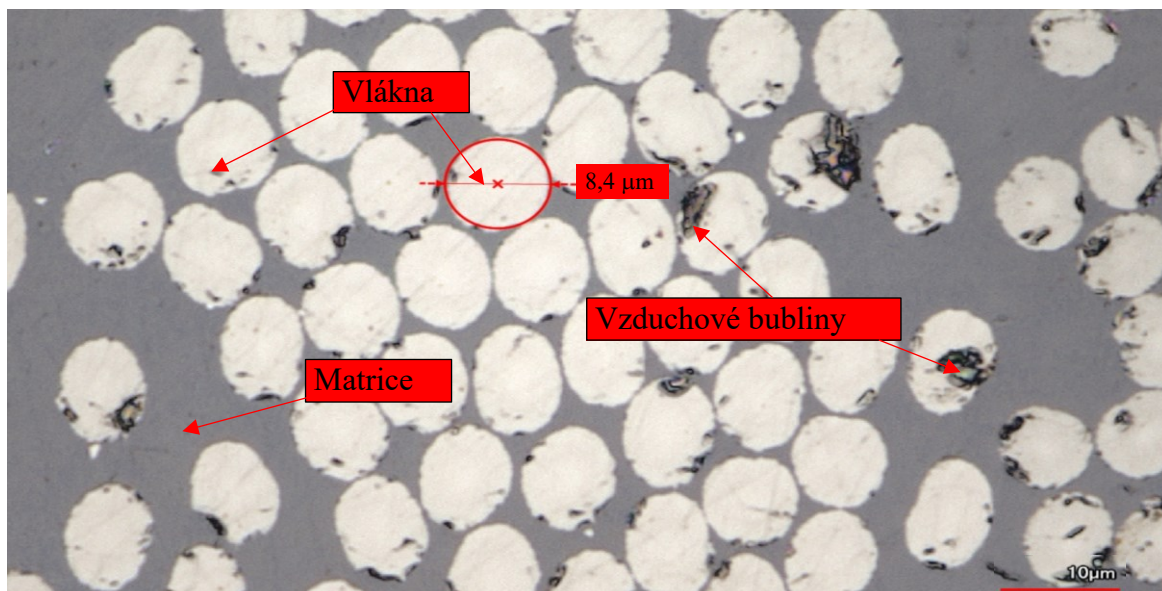
Obrázek 37 - řez rukojetí vzorku č.4 10x zvětšený

Na obrázku 38 můžeme vidět mikrostrukturu části vzorku č.4 v padesáti násobném zvětšení. Vidíme čtyři vrstvy prepregových tkanin o šířce přibližně 60 μm. V mikrostruktuře je vidět zahuštění tkanin vlákny vedoucí k nízkému obsahu matrice. Ve značné míře můžeme pozorovat i černá místa, která reprezentují vzduchové kapsy a shluky bublin.



Obrázek 38 - řez rukojetí vzorku č.4 50x zvětšený

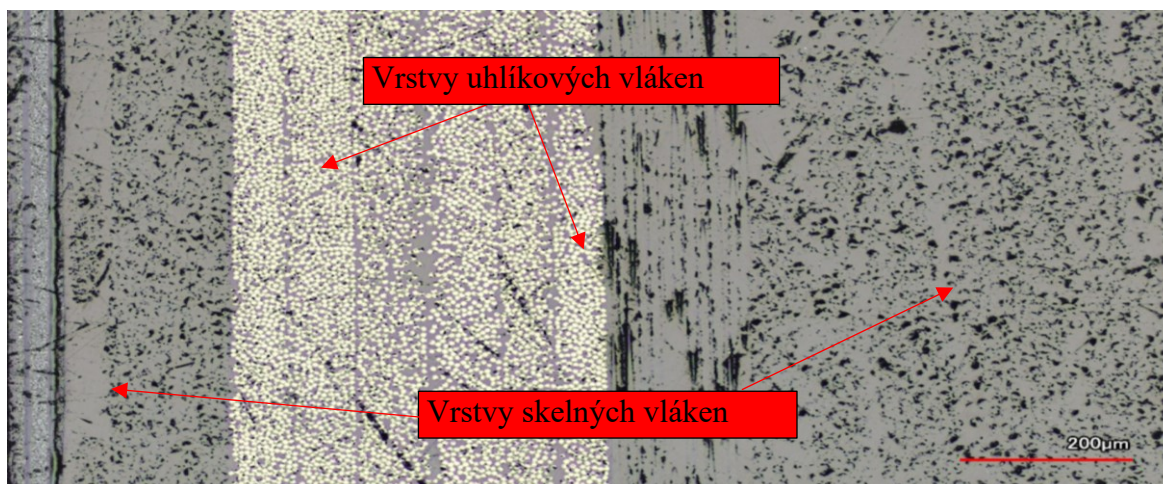
Na obrázku 39 níže vidíme 150x zvětšený povrch mikrostruktury jedné z vrstev vzorku č.4. Tato i ostatní vrstvy vzorku jsou tvořeny uhlíkovými vlákny, které mají průměr $8,4 \pm 1 \mu\text{m}$ a přibližně stálý mírně elipsovitý tvar. Vlákna jsou podélně jednosměrně orientovaná. Shluky bublin a vzduchových dutin na tomto obrázku můžeme vidět jako tmavá místa.



Obrázek 39 - řez rukojetí vzorku č.4 150x zvětšený

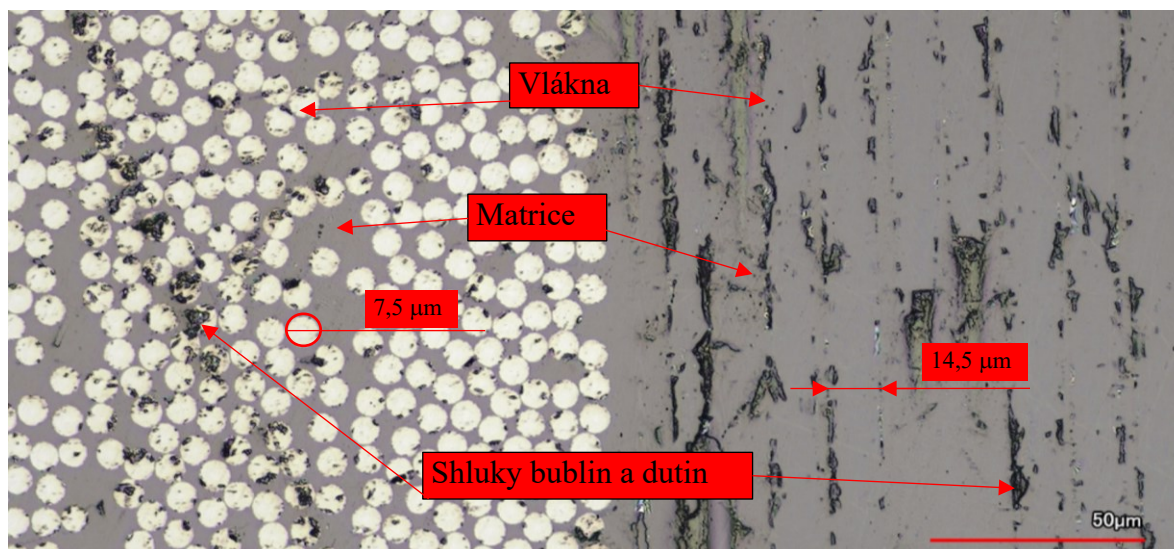
6.1.5 Vzorek č.5

Na obrázku 40 můžeme vidět rozhraní dvou různých vláken. V šedé vrstvě, která je složena ze skelných vláken a matrice, můžeme vidět jednosměrná podélná vlákna. Je zde viditelná i jedna silnější vrstva, která je kolmo orientovaná na zbylé vrstvy vláken. Tato vrstva jednosměrných vláken má šířku přibližně $150 \mu\text{m}$. Vlevo od kolmých skelných vláken můžeme vidět šest vrstev jednosměrných podélných uhlíkových vláken o šířce $\pm 60 \mu\text{m}$.



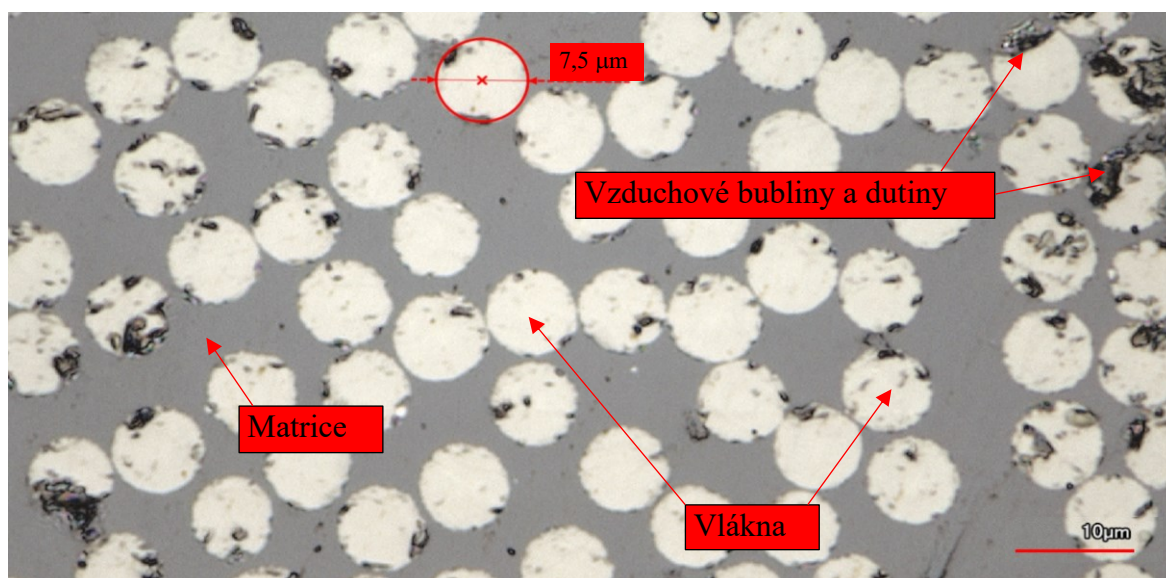
Obrázek 40 - řez rukojetí hokejové vzorku č.5 10x zvětšený

Obrázek 41 nám odkryl dvě různá rozhraní v padesátinásobném zvětšení. Světlé rozhraní vlevo s podélně orientovanými jednosměrnými uhlíkovými vlákny a šedé rozhraní skelných jednosměrně orientovaných podélných vláken, které jsou kladeny kolmo na všechny ostatní vrstvy vláken. Přibližný průměr uhlíkových vláken je $\pm 7,5 \mu\text{m}$, zatímco průměr skelných vláken je $\pm 14,5 \mu\text{m}$. Uhlíková vlákna nejsou tolik nahuštěná, a tak je vidět větší množství matrice. Tmavá místa zastávají shluky dutin a vzduchových bublin.



Obrázek 41 - řez rukojetě vzorku č.5 50x zvětšený

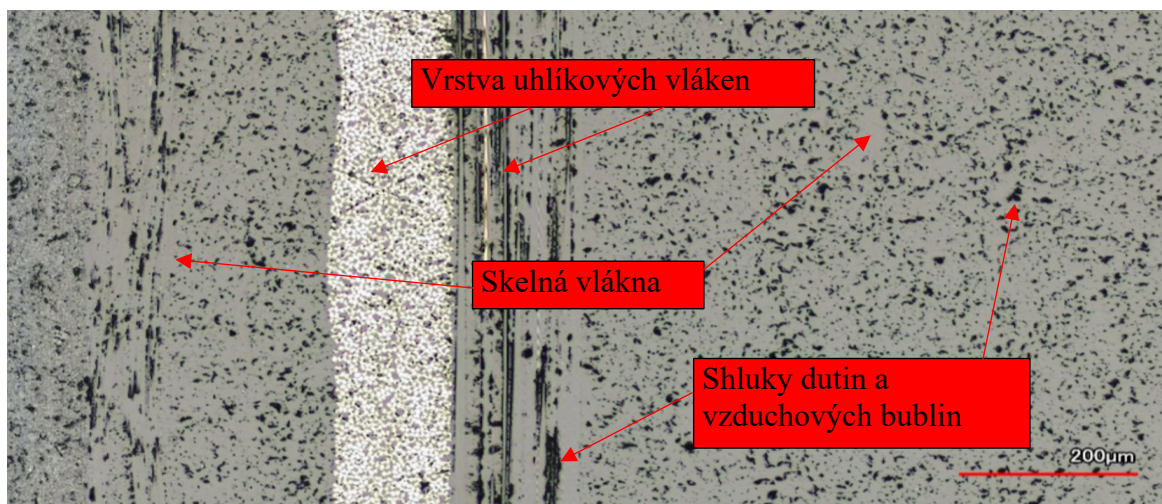
Na obrázku 42 pozorujeme část povrchu mikrostruktury vzorku č.5. Tato mikrostruktura je tvořena podélnými jednosměrnými uhlíkovými vlákny v matrici. Vlákna mají přibližný průměr $7,5 \mu\text{m}$, jsou pravidelného kruhového tvaru a mají mezi sebou větší množství matrice. Tmavá místa v mikrostruktuře znázorňují dutiny a vzduchové bubliny.



Obrázek 42 - řez rukojetě vzorku č.5 150x zvětšený

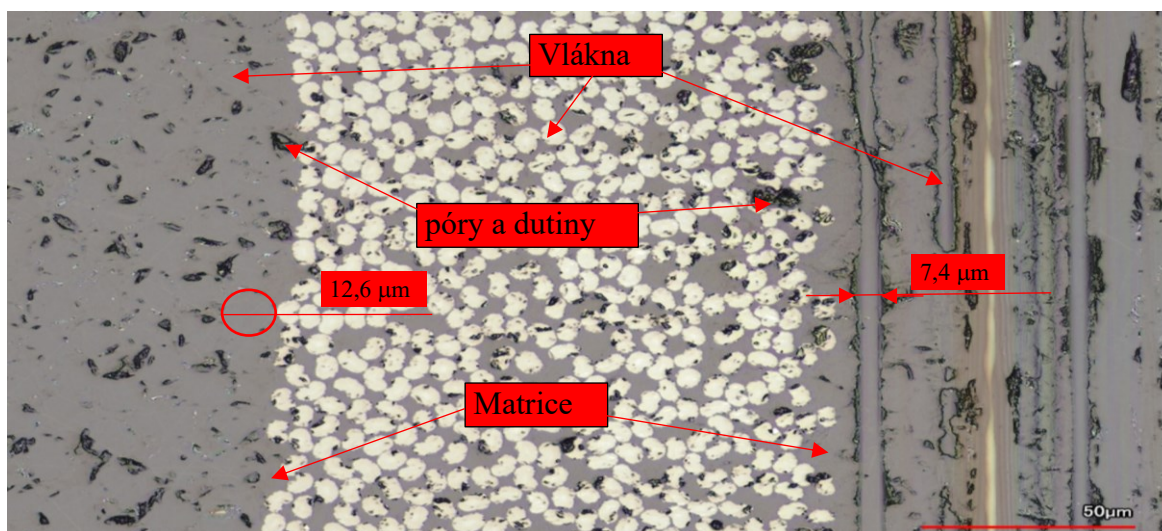
6.1.6 Vzorek č.6

Na obrázku 43 jsme zachytili mikrostrukturu řezu vzorku č.6. Tato vrstva je převážně tvořena skelnými podélnými jednosměrnými vlákny. V řezu jsou vidět i dvě vrstvy prepregových tkanin uhlíkových jednosměrných vláken o šířce přibližně 100 μm . Tyto vrstvy jsou na sebe směrově navzájem kolmo orientované. Tmavá místa na obrázku jsou shluky dutin, pórů a vzduchových bublin.



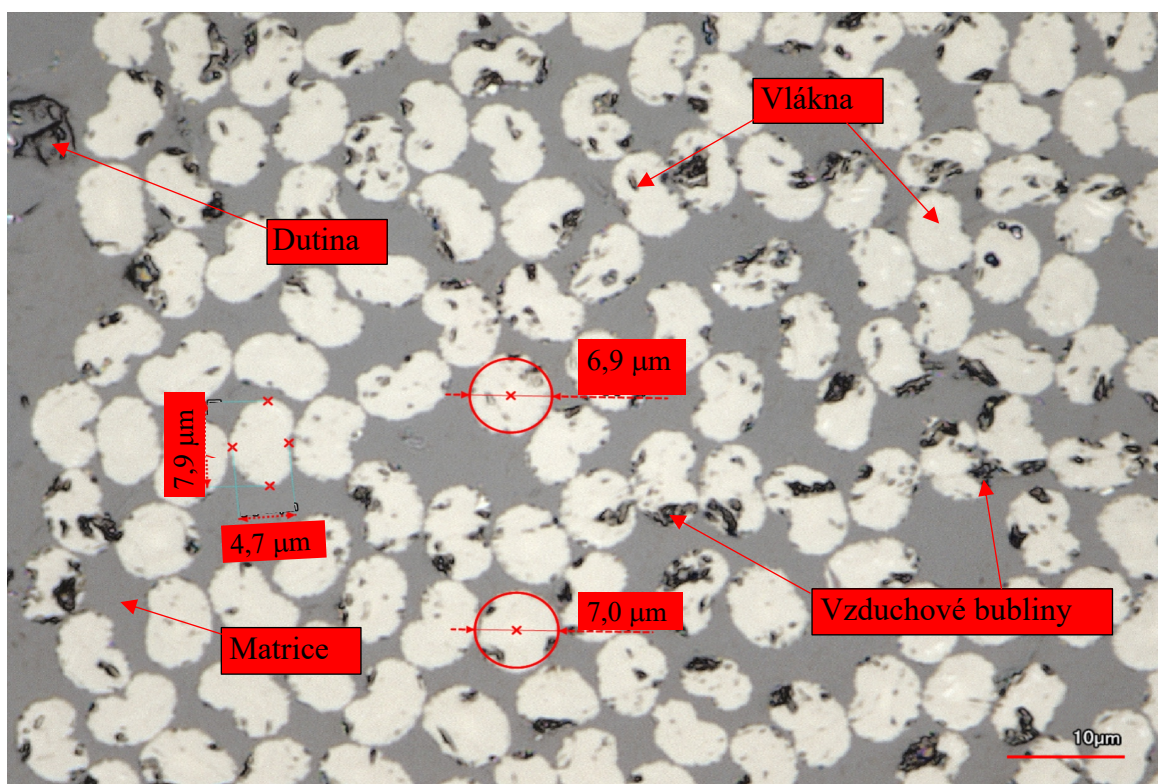
Obrázek 43 - řez rukojetě vzorku č.6 10x zvětšený

Na obrázku 44 vidíme mikrostrukturu vzorku č.6 v padesátinásobném zvětšení. V levé části vidíme část vrstvy skelných jednosměrných vláken o průměru $12 \pm 1 \mu\text{m}$. Uprostřed vidíme jednosměrně orientovaná uhlíková vlákna ve vrstvě o šířce přibližně 100 μm . V pravé části vidíme vrstvu uhlíkových vláken kolmo orientovaných na zbylá vlákna. Přibližný průměr uhlíkových vláken je 7,4 μm . Tmavá místa jsou póry, dutiny a vzduchové bubliny.



Obrázek 44 - řez rukojetí vzorku č. 6 50x zvětšený

V mikrostruktuře řezu rukojetě vzorku č.6 na obrázku 45 můžeme vidět řez uhlíkovými jednosměrně orientovanými vlákny ve stopadesátinásobném zvětšení. Většina vláken ve vrstvě je nepravidelného fazolovitého tvaru o přibližných rozměrech $8 \pm 1 \mu\text{m}$ na výšku a $5 \pm 1 \mu\text{m}$ na šířku. Mezi těmito vlákny se v malé míře nachází i pravidelná vlákna o průměru $\pm 7 \mu\text{m}$. Vlákna mezi sebou mají menší mezery, a tak zde není velké množství matice. Tmavá místa v mikrostruktuře jsou převážně vzduchové bubliny a shluky dutin a pórů.



Obrázek 45 - řez rukojetí vzorku č.6 150x zvětšený

6.2 Závěr a diskuse

V rámci experimentální části jsme vyhodnotili všech šest vzorků hokejových hůl pomocí mikroskopu Keyence VK-X3000. Všechny porovnávané vzorky se podařilo vyhodnotit a úspěšně opticky zanalyzovat.

Všechny analyzované vzorky byly z odlišných hokejových hůl, ovšem často se jejich mikrostruktura velice podobala. Můžeme tedy usoudit, že na výrobu novodobých hokejových hůl se používá velice podobná výrobní metoda, která se specificky nedá dohledat kvůli výrobním tajemstvím střežených firmami.

Největšími rozdíly u porovnávaných vzorků byly typy použitých vláken, jejich poměrné množství a množství matrice. V levnějších hůlích převažovalo procentuálně užití skelných vláken s větším množstvím matrice, zatímco v nejdražších hůlích nebyla skelná vlákna žádná a matrice zde bylo mezi vlákny značně méně. Další proměnný faktor, jež vychází z optické analýzy, byl samotný průměr vláken. Hůle vyšších cenových kategorií byly tvořeny prepregovými tkaninami o silnějším průměru vláken (vzorek č.4), zatímco s klesající cenou výrobku se průměr uhlíkových vláken zmenšoval (vzorek č.6). Nižší cena výsledného výrobku byla často doprovázena buďto kombinací skelných vláken proložených několika vrstvami těch uhlíkových (vzorek č.1 a č.5) nebo se zde uhlíková vlákna vůbec nenacházela a rukojeť byla celá tvořena pouze skelnými levnějšími vlákny (vzorek č.3).

Pro bližší porovnání bych použil tržně nejdražší (vzorek č.4) a tržně nejlevnější (vzorek č.3) hokejovou hůl, ze kterých byly vzorky nařezány. U těchto dvou vzorků se mikrostruktura lišila nejvíce, jelikož dražší hůl byla tvořena ryze vrstvami tkanin uhlíkových vláken a levná hokejová hůl byla tvořena pouze skelnými vlákny o různých průměrech. Vzorky se také lišily množstvím matrice. U dražší hůle bylo matrice méně a vlákna na sebe byla více nahuštěná. Levnější hůl obsahovala více matrice a mezi vlákny byly znatelně větší mezery. Pozorování tak potvrzuje všeobecné vlastnosti a ekonomiku výroby kompozitních výrobků. Pro levnější ovšem méně odolnou a méně kvalitní hůl, řekněm pro děti nebo amatéry, se více hodí použít levnější skelná vlákna s menší pevností a pro profesionální hůle, které jsou namáhané do mezních hranic flexibility každodenním náparem se hodí dražší vlákna uhlíková.

Další faktor, který hraje velkou roli u hokejisty při výběru a koupi hokejové hůle je váha. Hokejová hůl, z jejíž rukojetě byl uřezán vzorek č.3, je z roku 2010, hůl je tvořena celá skelnými vlákny různých průměrů a má větší podíl matrice mezi vlákny. Tato hokejová hůl

disponuje výrobcem uvedenou hmotností 599 gramů. Naopak hokejová hůl, jejíž rukojeť posloužila k uřezání vzorku č.4., je z roku 2018, je tvořena pouze tkaninami z uhlíkových vláken s nízkým obsahem matrice a vysokou hustotou vláken. Hmotnost této hokejové hole uváděná výrobcem je 410 gramů. Tato hokejová hůl je o více než jednu čtvrtinu lehčí než hůl ze sklených vláken, ovšem zde přichází na řadu cenový faktor. Cenová diference při porovnání těchto dvou holí je znatelná, jelikož pořizovací cena levnější hole ze sklených vláken se pohybovala okolo 1600,- CZK a dražší model profesionální hole z uhlíkových vláken se jako nový produkt dal pořídit za cenu přibližně 7000,- CZK. Cenová hladina hokejových holí hraje také velkou roli při výběru a nákupu hokejek, protože ne všichni hráči hokeje jsou profesionálové anebo nechtějí utrácet za tak drahou, ale kvalitní hokejku.

Pro hráče ledního hokeje je důležitá i výdrž a pevnost hokejové hole. Hokejové hole s vyšším obsahem uhlíkových vláken mají vyšší modul pružnosti než hole s vyšším poměrem skelných vláken. Hokejová hůl s vyšším obsahem uhlíku disponuje modulem pružnosti v ohybu okolo 33 100 MPa. Naopak hokejová hůl s vyšším obsahem skelných vláken má modul pružnosti v ohybu nižší, a to 22 100 MPa. Hokejky se znatelně liší i při cyklickém zatěžování. Profil hokejové hole s vyšším obsahem uhlíkových vláken průměrně vydrží 174 000 cyklů na rozdíl od 99 940 cyklů u holí s vyšším poměrem sklených vláken. [45] Z těchto poznatků vyplývá, že dražší hole by měly vydržet větší namáhání při hře a tudíž by měly mít i vyšší životnost než levnější hole s menším množstvím uhlíkových vláken ve své struktuře.

Analýza mikrostruktury zkoušených vzorků potvrdila teoretické předpoklady pro výrobu. Hokejové hole ve vyšší cenové hladině opravdu obsahovaly méně matrice, měly vyšší hustotu vláken a převažovaly zde uhlíková vlákna. Optická analýza u holí nižší cenové relace ukázala, že hole opravdu měly vyšší poměr skelných vláken a v mikrostruktuře se nacházelo více matrice.

Při psaní mé bakalářské práce jsem narazil na nedostatek českých i zahraničních vědeckých publikací pojednávajících o mikrostruktuře hokejových holí. Většina vědeckých publikací se zabývala spíše zkoumáním mechanických vlastností těchto těles a byla cizojazyčná. Má bakalářská práce tak může obohatit nedostatek těchto informací v akademické sféře.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha : Scientia, 2009. [cit. 2021-10-06]. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. [cit. 2021-10-06].
- [3] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. [cit. 2021-10-06]. ISBN 80-7043-273-X.
- [4] TALREJA, Ramesh, Manson, Jan-Anders E.: Polymer matrix composites : a comprehensive composite materials publication. 1st ed. Amsterdam : Elsevier, 2001. [cit. 2021-09-21]. ISBN: 0-08-043725-7
- [5] ZHANG, Lei, 2015. The Application of Composite Fiber Materials in Sports Equipment. In: Proceedings of the 2015 International Conference on Education, Management, Information and Medicine [online]. Paris, France: Atlantis Press, s. - [cit. 2021-10-21]. ISBN 978-94-62520-68-4. Dostupné z: doi:10.2991/emim-15.2015.88
- [6] GRANDE, Dodd H. et al., 2018. 3.18 Composites in Sports Applications. Comprehensive Composite Materials II [online]. Elsevier, s. 469-526 [cit. 2021-10-21]. ISBN 9780081005347. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.10341-8
- [7] LAAD, Meena Sadashiv, 2020. Polymers in sports. Polymer Science and Innovative Applications [online]. Elsevier, s. 485-523 [cit. 2021-10-21]. ISBN 9780128168080. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-816808-0.00015-9
- [8] NGO, Tri-Dung, 2020. Introduction to Composite Materials. NGO, Tri-Dung, ed. Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications [online]. IntechOpen, s. 28 [cit. 2021-10-21]. ISBN 978-1-78985-390-2. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.91285
- [9] Y. SHEIKH-AHMAD, Jamal. Machining of Polymer Composites. United Arab Emirates: Springer Science+Business Media, 2009. [cit. 2022-03-02]. ISBN 978-0-387-35539-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-68619-6
- [10] KALOVA, Martina a Sona RUSNAKOVA. Microstructure of Polymer Composite Materials. Manufacturing Technology [online]. 2017, 17(5), 722-728 [cit. 2021-01-25]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/5/722

- [11] AWAJA, Firas, Shengnan ZHANG, Manoj TRIPATHI, Anton NIKIFOROV a Nicola PUGNO. Progress in Materials Science: Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair [online]. 2016, , 36. [cit. 2022-01-06]. ISSN 0079-6425. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.007>
- [12] SP, Systems. SP Composite guide [online]. 2013, , 69 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: https://composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/SP_Composites_Guide.pdf
- [13] MEHDIKHANI, Mahoor, Larissa GORBATIKH, Ignaas VERPOEST a Stepan V LOMOV. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. Journal of Composite Materials [online]. 2019, 53(12), 1579-1669. [cit. 2021-12-21]. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:[10.1177/0021998318772152](https://doi.org/10.1177/0021998318772152)
- [14] BHATT, Pooja a Alka GOE. Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. Material Science Research India [online]. 2017, 14(1), 52-57. [cit. 2021-12-20]. ISSN 09733469. Dostupné z: doi:[10.13005/msri/140109](https://doi.org/10.13005/msri/140109)
- [15] HULL, D., CLYNE, T. W. (1996). An Introduction to Composite Materials, 326 p. Cambridge University Press, Cambridge. [cit. 2021-12-15]. ISBN 0-521-38855-4.
- [16] KAR, Kamal K., ed. Composite Materials [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017 [cit. 2021-12-15]. ISBN 978-3-662-49512-4. Dostupné z: doi:[10.1007/978-3-662-49514-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8)
- [17] Sports and Recreation Equipment Applications. MIRACLE, Daniel B. a Steven L. DONALDSON, ed. Composites [online]. ASM International, 2001, 2001-1-1, s. 1071-1077. [cit. 2022-01-15]. ISBN 978-1-62708-195-5. Dostupné z: doi:[10.31399/asm.hb.v21.a0003479](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21.a0003479)
- [18] RAJAK, Dipen Kumar, Durgesh D. PAGAR, Ravinder KUMAR a Catalin I. PRUNCU. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. Journal of Materials Research and Technology [online]. 2019, 8(6), 6354-6374. [cit. 2022-02-19]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:[10.1016/j.jmrt.2019.09.068](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068)
- [19] Skelná vlákna [online]. In: . [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://jloncomposite.en.made-in-china.com/productimage/pBtmCTgUmDYx-2f1j00FyLERqkPfnO/China-Ar-Glass-Fibre-for-Grc.html>

- [20] Aramidová vlákna [online]. In: . [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.textileexcellence.com/news/technical-textiles-and-nonwovens/tejjin-to-boost-production-of-technora-para-aramid-fiber/>
- [21] Gurit.com [online]. 2011 [cit. 2011-04-25]. Guide to composites. Dostupné z WWW: < <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx> >.
- [22] The history of Hockey Sticks [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://goingbardown.com/the-history-of-hockey-sticks/>
- [23] TATA, B V R a Baldev RAJ. Confocal laser scanning microscopy: Applications in material science and technology. Bulletin of Materials Science [online]. 1998, 21(4), 263-278 [cit. 2022-04-29]. ISSN 0250-4707. Dostupné z: doi:10.1007/BF02744951
- [24] Easton Brett Hull signed Hockey Stick [online]. In: . [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.pristineauction.com/a761704-Brett-Hull-Signed-Easton-Full-Size-Hockey-Stick-JSA-COA> -
- [25] Sher Wood 5030 Paul Coffey [online]. In: . [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.barstoolsports.com/blog/903656/throwing-it-back-to-the-sher-wood-5030-featherlite-coffey-curve>
- [26] First Ice Hockey stick [online]. In: . [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.ctvnews.ca/sports/hockey-stick-from-the-1800s-valued-at-us-3-5-million-heads-to-auction-1.4899468?cache=%3FclipId%3D89563%3FautoPlay%3Dtrue>
- [27] NOVOTNÝ, Robert. NHL.CZ. Nhl.cz [online]. 2015 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.nhl.cz/ohlednuti-zpet-historie-zakrivenych-cepeli/5005964>
- [28] LANGR, Michael. NHL.com [online]. 2017 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.nhl.com/cs/news/doba-drevenych-hokejek-je-pryc-ale-hraci-ji-jeste-pamatuji/c-286376740>
- [29] Bauer S22 Sling grip stick. In: Bauer Hockey [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.bauerhockey.cz/hul-bauer-s22-nexus-sling-grip-stick-int-55-1059099>
- [30] LEGAULT, Michael. Advanced hockey stick design delivers optimal performance [online]. In: . s. 1 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/advanced-hockey-stick-design-delivers-optimal-performance>
- [31] Chapter 3 - Polymer Matrix Composites [online]. In: . s. 73-95 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106.PDF>
- [32] Processing of polymer composites [online]. In: . 2012, s. 1-10 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/3C1archive/handout6.pdf>

- [33] TWIG Hockey Company. TWIG Hockey Company [online]. USA, Michigan, 2021 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://twighockeycompany.com/penaltybox/gear-up/pro-level-hockey-sticks-vs-the-rest>
- [34] Composite Lab. Composite Lab: American Composites Manufacturers Association [online]. USA, 2016 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <http://compositeslab.com>
- [35] FOSTER, Gary. Composite Evolution. Composite Evolution [online]. USA, 2021 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://compositesevolution.com/resources/what-is-automated-fibre-placement-afp/>
- [36] MASSOOM, Z. Fattahi a H. A. KISHAWY. Prediction of critical thrust force generated at the onset of delamination in machining carbon reinforced composites. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2019, 103(5-8), 2751-2759. [cit. 2022-05-06]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03517-4
- [37] WISNOM, M. R. The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences [online]. 2012, 370(1965), 1850-1870. [cit. 2022-05-06]. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2011.0441
- [38] GUPTA, Bhupender S. a Mehdi AFSHARI. Polyacrylonitrile fibers. Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres [online]. Elsevier, 2018, 2018, s. 545-593. [cit. 2022-05-06]. ISBN 9780081012727. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101272-7.00015-8
- [39] KASTRITSEAS, C., P. A. SMITH a J. A. YEOMANS. Thermal shock behaviour of angle-ply and woven dense ceramic-matrix composites. Journal of Materials Science [online]. 2008, 43(12), 4112-4118 [cit. 2022-05-12]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-007-2314-2
- [40] BRAUER, Delia S., Christian RÜSSEL, Sebastian VOGT, Jürgen WEISSER a Matthias SCHNABELRAUCH. Degradable phosphate glass fiber reinforced polymer matrices: mechanical properties and cell response. Journal of Materials Science: Materials in Medicine [online]. 2008, 19(1), 121-127 [cit. 2022-05-12]. ISSN 0957-4530. Dostupné z: doi:10.1007/s10856-007-3147-x
- [41] World Health Organization: WHO [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.who.int/health-topics/physical-activity#tab=tab_1

- [42] NAKONECHNY, Sarah. Sports history: The ice hockey stick [online]. 2021, 25.02.2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.carillonregina.com/sports-history-the-ice-hockey-stick/>
- [43] Perani's Hockey World. Perani's Hockey World [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.hockeyworld.com>
- [44] Pure Hockey. Pure Hockey [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.purehockey.com>
- [45] KLUSÁČEK, Jan. Studium ohybového chování kompozitního profilu hokejové hole. Zlín, 2020. Diplomová. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Milan Žaludek, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FRP Fibre-reinforced plastic

AFP Automated fibre placement

MPa Mega pascal

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - klasifikace kompozitních materiálů z pohledu výztuže [3]	16
Obrázek 2 - tkanina z uhlíkových vláken [33].....	17
Obrázek 3 - forma jednodílné kompozitní hokejové hole [33].....	17
Obrázek 4 - skelná vlákna [19]	19
Obrázek 5 - aramidová vlákna [20]	20
Obrázek 6 - metoda navíjení vláken [12].....	26
Obrázek 7 - metoda pultruze [12]	27
Obrázek 8 - metoda lisování [12]	28
Obrázek 9 - metoda automatického pokládání vláken [35]	30
Obrázek 10 - strukturní vady kompozitu [36]	32
Obrázek 11 - trhliny polymerní matrice [39].....	33
Obrázek 12 – delaminace vzorku č.2.....	34
Obrázek 13 – snímek lomu vláken vláknového kompozitu při tříbodovém ohybu [40]	34
Obrázek 14 - původní hokejová hůl kmene Mi'kmaq [26]	36
Obrázek 15 – reklama z počátků 20. století na hokejovou hůl Mic-Mac [22].....	37
Obrázek 16 – hokejová hůl Stanleyho Mikity [27].....	38
Obrázek 17 - Paul Coffey s holí Sher-Wood P.M.P. 5030 [25]	39
Obrázek 18 - hliníková dvoudílná hůl Easton [24].....	39
Obrázek 19 - první jednodílné kompozitní hole Easton Synergy a CCM Vector [43].....	40
Obrázek 20 - hokejová hůl Bauer S22 Sling Grip [29].....	41
Obrázek 21 - příprava pily k řezu vzorku	45
Obrázek 22 - nařezané vzorky hokejových holí	46
Obrázek 23 - zalívání vzorků pryskyřicí.....	46
Obrázek 24 - vytvrzené vzorky.....	47
Obrázek 25 - leštění vzorků pomocí smirku	47
Obrázek 26 - vyleštěné vzorky rukojetí	48
Obrázek 27 - vyleštěný vzorek pod konfokálním mikroskopem	49
Obrázek 28 - řez rukojetí vzorku č.1 10x zvětšený	51
Obrázek 29 - řez rukojetí hokejové hole vzorku č.1 50x zvětšený	51
Obrázek 30 - řez rukojetí hokejové hole vzorku č.1 150x zvětšený.....	52
Obrázek 31 - řez rukojetí vzorku č.2 10x zvětšený	52
Obrázek 32 - řez rukojetě vzorku č.2 50x zvětšený	53
Obrázek 33 - řez rukojetí vzorku č.2 150x zvětšený	53
Obrázek 34 - řez rukojetí vzorku č.3 10x zvětšený	54

Obrázek 35 - řez rukojetě vzorku č.3 50x zvětšený.....	54
Obrázek 36 - řez rukojetě vzorku č.3 150x zvětšený.....	55
Obrázek 37 - řez rukojetí vzorku č.4 10x zvětšený	56
Obrázek 38 - řez rukojetí vzorku č.4 50x zvětšený	56
Obrázek 39 - řez rukojetí vzorku č.4 150x zvětšený	57
Obrázek 40 - řez rukojetí hokejové vzorku č.5 10x zvětšený.....	57
Obrázek 41 - řez rukojetě vzorku č.5 50x zvětšený.....	58
Obrázek 42 - řez rukojetě vzorku č.5 150x zvětšený.....	58
Obrázek 43 - řez rukojetě vzorku č.6 10x zvětšený.....	59
Obrázek 44 - řez rukojetí vzorku č. 6 50x zvětšený	59
Obrázek 45 - řez rukojetí vzorku č.6 150x zvětšený	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - vlastnosti reaktoplastických a termoplastických polymerních matric [8]	14
Tabulka 2 - jednotlivé vlastnosti vláken [12]	21
Tabulka 3 - tabulka vzorků hokejových holí pro experimentální část.....	50