

# Výzkum a testování florbalových kompozitních holí

Bc. Jakub Húšť

---

Diplomová práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Húšť**  
Osobní číslo: **T21421**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Výzkum a testování florbalových kompozitních holí**

## Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku kompozitních materiálů pro sportovní pomůcky.
2. Přehled kompozitních materiálů, výztužní systémy, vlastnosti a použití.
3. Návrh kompozitní florbalové hole s využitím předimpregnovaných materiálů.
4. Průzkum komerčně dostupných florbalových holí, experimentální testování dle doporučení.
5. Návrh výrobní formy. Výroba prototypu se zvolenou orientací výztuže.
6. Experimentální testování mechanických vlastností dle doporučení.
7. Vyhodnocení výsledků a formulace závěru.

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

**Seznam doporučené literatury:**

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

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

ŠUBA, Oldřich. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.

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

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 7. února 2023

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá výzkumem a výrobou prototypu florbalové hole. Práce je rozdělena do dvou částí. První, teoretická část pojednává o problematice kompozitních materiálů a metod výroby dutých kruhových profilů z těchto materiálů. Popisuje sport florbal a použití kompozitních materiálů ve sportovním odvětví. Praktická část práce zahrnuje návrh a výrobu formy, sloužící ke zhotovení florbalové hole. Dále popisuje celý proces výroby prototypů florbalových holí. V závěru práce je provedeno testování mechanických vlastností vyrobených prototypů.

Klíčová slova: florbalová hůl, florbal, kompozitní materiály, výroba

## **ABSTRACT**

This thesis concerns the research and production of a prototype floorball stick. The thesis is divided into two parts. The first theoretical part deals with the problems of composite materials and methods of manufacturing hollow circular profiles from these materials. It describes the sport of floorball and the use of composite materials in the sport. The practical part of the thesis includes the design and manufacture of the mould. It also describes the whole process of manufacturing prototypes of floorball sticks. Finally, the thesis concludes with the testing of the mechanical properties of the manufactured prototypes.

Keywords: floorball stick, floorball, composite materials, manufacturing

Rád bych touto cestou vyjádřil své upřímné poděkování všem, kteří mi poskytli podporu a pomohli při tvorbě mé diplomové práce.

Nejprve bych rád poděkoval vedoucí práce, paní doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D., za její cenné rady, odborné vedení a trpělivost během celého procesu. Její zkušenosti a know-how byly nepostradatelné a významně přispěly k úspěšnému dokončení mé práce.

Dále bych chtěl vyjádřit svou vděčnost panu Ing. Vladimírovi Rusnákov, Ph.D. za jeho odborné konzultace ohledně výrobního procesu. Jeho vstřícnost a ochota pomoci při výrobě mi umožnily získat hlubší porozumění problematice a významně obohatily obsah mé práce.

Také bych rád poděkoval firmě C.S.O. spol. s r.o. za poskytnutí prostor pro výrobu. Díky nim jsem mohl prakticky aplikovat a ověřit teoretické poznatky. Jejich pomoc a zázemí byly nepostradatelné pro úspěšné dokončení mého výzkumu.

Dále bych chtěl velmi poděkovat firmě JAPA Vsetín spol. s.r.o. za jejich ochotu a zajištění výroby formy. Jejich profesionální přístup a spolupráce přispěly k realizaci mého projektu a umožnily mi získat cenné praktické zkušenosti.

Nakonec bych rád vyjádřil velké díky mé rodině za jejich neustálou podporu během mého studia. Vaše motivace a trpělivost mi byly povzbuzením v celé této etapě života.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 FLORBAL</b> .....	<b>11</b>
1.1 PRAVIDLA FLORBALU .....	11
1.2 FLORBALOVÉ VYBAVENÍ .....	13
1.2.1 Florbalová hůl .....	13
<b>2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>18</b>
2.1 DEFINICE KOMPOZITU .....	19
2.2 VÝHODY A NEVÝHODY KOMPOZITU .....	20
2.3 VLÁKNOVÉ VÝZTUŽE .....	21
2.3.1 Uhlíková vlákna .....	23
<b>3 VARIANTY VÝROBY DUTÝCH KRUHOVÝCH PROFILŮ</b> .....	<b>25</b>
3.1 VÝROBA METODOU ROLL-WRAPPING .....	26
3.2 VÝROBA POMOCÍ PLETENÝCH RUKÁVŮ Z UHLÍKOVÝCH VLÁKEN.....	28
3.3 VÝROBA POMOCÍ DĚLENÉ FORMY .....	31
3.4 VÝROBA NAVÍJENÍM .....	34
<b>4 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ DUTÝCH PROFILŮ</b> .....	<b>36</b>
4.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	36
4.1.1 Zkouška ohybem florbalových holí dle materiálový předpisů SPCR 011 .....	37
4.2 RÁZOVÁ ZKOUŠKA .....	39
4.2.1 Zkouška rázem v ohybu .....	39
4.2.2 Rázová zkouška pádem .....	40
4.2.3 Rázová zkouška florbalových holí dle materiálový předpisů SPCR 011 ...	41
<b>5 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY A SPORT</b> .....	<b>42</b>
5.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V LYŽAŘSTVÍ .....	42
5.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V CYKLISTICE.....	44
5.3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V KANOISTICE .....	45
<b>6 RECYKLACE KOMPOZITŮ</b> .....	<b>47</b>
6.1 MECHANICKÁ RECYKLACE .....	48
6.2 TERMÁLNÍ RECYKLACE .....	49
6.3 CHEMICKÁ RECYKLACE.....	50
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>51</b>
<b>7 CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>52</b>

<b>8</b>	<b>VÝROBA FORMY.....</b>	<b>53</b>
8.1	VOLBA METODY VÝROBY .....	53
8.2	VOLBA MATERIÁLU FORMY .....	54
8.3	NÁVRH FORMY .....	54
8.4	VÝROBA FORMY .....	57
<b>9</b>	<b>VÝROBA PROTOTYPU HOKEJKY.....</b>	<b>62</b>
9.1	VÝROBA PRVNÍHO PROTOTYPU.....	62
9.2	VÝROBA DRUHÉHO PROTOTYPU .....	66
9.3	VÝROBA TŘETÍHO A ČTVRTÉHO PROTOTYPU .....	71
<b>10</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ PROTOTYPŮ DLE SPCR 011.....</b>	<b>72</b>
10.1	ZKOUŠKA PROTOTYPŮ NA OHYB.....	72
10.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA PROTOTYPŮ .....	80
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>96</b>



## ÚVOD

Kompozitní materiály v dnešní době pronikají do několika odvětví a čím dál více se stávají nedílnou součástí běžného života. Ať už jde o letecký průmysl, automobilový průmysl, stavebnictví nebo sportovní průmysl, kompozity jsou hojně využívány pro jejich vynikající fyzikální a mechanické vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti se řadí zejména vysoká pevnost, nízká hmotnost nebo například odolnost proti opotřebení, korozi a degradaci. Tyto materiály jsou vyráběny z kombinace různých druhů vláken a pryskyřic, jako jsou uhlíková vlákna, skelná vlákna, aramidová vlákna, epoxidové pryskyřice a další.

V oblasti sportu se tyto materiály často používají pro výrobu sportovních pomůcek, jako jsou například tenisové rakety, golfové hole, lyže, kajaky nebo florbalové hole, jež jsou předmětem této diplomové práce. Kompozitní materiály nabízí sportovcům pomůcky s výbornými vlastnostmi, které mohou přispět k jejich vyššímu výkonu a komfortu.

Florbal je populární sport hraný po celém světě. Jeden z klíčových prvků úspěchu každého hráče je správná volba florbalové hole, která musí být odolná, pevná a zároveň musí poskytovat požadovanou tvrdost, flexibilitu a bezpečnost. Proto florbalová hůl podléhá několika mechanickým zkouškám, které tyto vlastnosti zjišťují a výslednou certifikací umožňují hole používat. V posledních letech jsou nejvíce populární hole z kompozitních materiálů, které jsou vyráběny z více vrstev a druhů vláken, kterými jsou hlavně uhlíková a skelná vlákna.

Úkolem této diplomové práce bylo zmapovat dostupné metody výroby dutých profilů z kompozitních materiálů a následné zvolení metody výroby pro florbalovou hůl. Pro tuto práci byla vybrána metoda výroby pomocí dvoudílné formy. Následně byl vytvořen návrh formy pro výrobu prototypu florbalové hole.

Práce se v praktické části věnuje návrhu a výrobě dvoudílné formy, výrobě jednotlivých prototypů a v poslední části experimentálnímu testování na základě technické specifikace SPCR 011.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 FLORBAL

Tato kapitola představuje florbal ve všech jeho aspektech, a to z důvodu, že problematika florbalové hole, jež je nezbytná pro florbal, je klíčovým bodem jak teoretické, tak praktické části této diplomové práce.

Florbal je jednoduchý, nenáročný kolektivní sport, který je v poslední době čím dál více oblíbený a získává na popularitě. Jak již bylo uvedeno, ke hraní florbalu je potřeba zajistit několik důležitých aspektů, a to: vhodný prostor, na kterém je postaveno hřiště z mantinelů (např. tělocvična, sportovní halu), florbalovou hokejku, míček, dvě brány a vzhledem k týmovému sportu také spoluhráče a protihráče.

Florbal je rychlý a dynamický sport. Při hře musí hráč zvládat široké spektrum pohybových schopností, jako je síla, rychlost, stabilita a vědomá koordinace hráčů. Tyto dynamické vlastnosti přispívají k atraktivitě sportu, jak v očích diváka, tak samotného sportovce. Florbal se charakterem hry hodně podobá hokeji. Za shodné rysy lze považovat počet hráčů, způsob vstřelení branek, tresty apod. Oproti hokeji je však florbal více finančně dostupnější sport, a to díky nízkým pořizovacím nákladům na vybavení hráče, a také prostoru, kde se florbal hraje. [1; 2]

Florbal se poprvé objevil a začal hrát ve Švédsku počátkem sedmdesátých let. Do teď jsou také severské země a Švýcarsko zeměmi, kde se florbal z hlediska profesionálního sportu dostává na maximální úroveň, což umocňuje i fakt, že v těchto zemích jsou hráči profesionálními sportovci a florbal je jejich zaměstnáním. V Česku se florbal poprvé objevil v roce 1984 kdy Finové dovezli do Česka dvanáct hokejek. Postupem času získal florbal na popularitě i u nás v Česku, a i dnes je zájem o florbal stále větší, a to i díky úspěchům českého národního týmu na mistrovství světa. [2; 3]

### 1.1 Pravidla florbalu

Důležitým pojmem této práce je florbalová hůl, která je charakteristickým znakem právě tohoto sportu. Způsob fungování hráče s florbalovou hokejkou však není neomezený, naopak je upraven florbalovými pravidly.

Florbalová pravidla upravuje a vydává IFF (International Floorball Federation), která má za úkol sjednotit země a jednotlivé florbalové asociace, a to z důvodu hraní florbalu podle stejných pravidel. Samotný úvod florbalových pravidel (2022, s. 4) začíná větou: „*Florbal se hraje formou utkání mezi dvěma družstvy. Cílem hry je*

*dosáhnout více branek, než soupeř při dodržení ustanovení pravidel.*“ V této kapitole proto bude stručně popsáno několik nejdůležitějších pravidel pro přiblížení florbalu z hlediska samotné hry a jejího průběhu. [4; 5]

Hra probíhá v hale – na hřišti o rozměrech 40 m x 20 m, které je ohraničeno mantinely se zaoblenými rohy do výšky 50 cm. Na hřišti se nachází značky a čáry, které označují střed hřiště, prostor pro vhadzování, a také obdélníkové malé a velké brankoviště. Označení na mantinelech konkretizuje prostor pro střídání. Na každé straně hřiště se pak nachází florbalová brána. [5]

Každý tým má v poli 5 hráčů a jednoho brankáře. Hráči jsou vybaveni florbalovou hokejkou, která musí splňovat materiálové požadavky, a která je označena certifikací o splnění těchto požadavků a způsobilosti ke hře. Florbal se hraje s florbalovým míčkem, který se hráči snaží pomocí hokejek dostat do soupeřovy brány, zatímco jim soupeř brání, snaží se získat balónek a zabránit tak vstřelenému gólu. [3; 4; 5]

Získání balónku a pohyb s florbalovou hokejkou však nesmí být v rozporu s pravidly. Mezi nejčastější prohřešky a porušení pravidel patří tyto situace:

- sekání, blokování hole,
- nedovolené vrážení, hrubost, držení,
- hra vysokou holí, hra mezi nohama,
- hra na zemi, výskok, hra rukou, hra hlavou.

Při porušení pravidel dochází k zastavení hry a potrestání týmu, který se prohřeškem provinil. Tresty se rozdělují dle závažnosti daného prohřešku a mezi ty nejčastější patří:

- volný úder pro soupeře (malý prohřešek),
- vyloučení na trestnou lavici (dvouminutový trest za střední provinění),
- vyloučení do konce utkání (velké provinění, možnost pozastavení herní činnosti hráče).

Běžně se hraje florbal na tři třetiny, přičemž jedna třetina trvá 20 min. Mezi třetinami jsou desetiminutové přestávky. Čas hry je čistý, tzn., že pokud je hra přerušena, tak se zastaví čas. Každý tým má během zápasu nárok na oddechový čas, tzv. time-out, a to kdykoli při přerušování hry. Pokud je skóre na konci třetí třetiny

nerozhodné, následuje desetiminutové prodloužení a pokud ani prodloužení nerozhodne o vítězi utkání, následují trestná střelení. V takovém případě vybere každý tým pět hráčů, kteří postupně odjedou trestná střelení. Je-li stav i potom vyrovnaný, jedou ti samí hráči trestná střelení znovu do té doby, než se rozhodne o vítězi. [1; 4; 5]

Vývoj pravidel má na starosti mezinárodní florbalová federace IFF. Pravidla jsou každé 4 roky aktualizována a upravena, aby docházelo k ztraktivnější hře jak pro hráče, tak pro diváky. [1; 3]

## 1.2 Florbalové vybavení

Jako většina sportů, tak i florbal potřebuje ke své hře několik potřebných pomůcek a vybavení, bez kterých by tento sport nešel hrát. Jak již bylo nastíněno v předchozí podkapitole o pravidlech hry, k základnímu vybavení hřiště patří florbalové brány a mantinely. Florbalové vybavení hráče potom tvoří florbalová hůl, která se skládá z čepele, tyčky a omotávky. Speciální výbavu navíc mají florbaloví brankáři. Ti musí mít při utkání výstroj a brankářskou helmu. Dalším vybavením je florbalový míček, který je specifický svými dírami. Všechna tato vybavení spadají pod nutnou atestaci, kterou určuje mezinárodní florbalová unie (IFF). Florbalové vybavení se testuje v přísných podmínkách a musí splňovat certifikaci, která zajišťuje kvalitu, ale především bezpečnost a zdraví hráčů. [2; 6]

### 1.2.1 Florbalová hůl

S ohledem na téma diplomové práce, je florbalové holi věnována samotná podkapitola, která více přiblíží její specifika. Popsána budou tato hlediska:

- Hledisko hry (odrážející individualitu hráče)
- Hledisko technologie zpracování

Florbalová hůl je jednoznačně nejdůležitějším vybavením hráče. Ta má jak ve florbalové komunitě, tak mezi lidmi mnoho názvů jako např.: „hokejka“ nebo „florbalka“. Výběr florbalové hole závisí na mnoha faktorech, a také na potřebách a požadavcích hráče. Prvním důležitým faktorem je výběr strany hokejky, tedy zda hráč hraje na levou stranu (levá ruka je níže při držení hole) nebo na pravou stranu (pravá ruka je níže). Dalším parametrem je délka hole. Ta se odvíjí od výšky hráče a pochopitelně se v průběhu kariéry délka hole mění. Jak uvádí mnoho manuálů pro

výběr správné délky hokejky, optimální je, když konec hokejky zasahuje do oblasti břicha. Delší hokejky volí spíše obránci, aby dosáhli hokejkou dál od těla, kratší hokejky většinou volí útočníci z důvodu lepší a rychlejší práci s míčkem. Doporučené délky popisuje tabulka 1. [2; 7]

*Tab. 1 Doporučené délky hole [7]*

Výška hráče	Doporučená délka	Výška hráče	Doporučená délka
115 cm	50-55 cm	155 cm	85-90 cm
120 cm	60-67 cm	165 cm	90-92 cm
125 cm	60-67 cm	170 cm	91-95 cm
130 cm	70-77 cm	175 cm	95-96 cm
135 cm	70-80 cm	180 cm	95-98 cm
140 cm	80-82 cm	185 cm	95-103 cm
145 cm	80-82 cm	190 cm	100-103 cm
150 cm	85-87 cm	>195 cm	103-105 cm

Důležitým faktorem při výběru hokejky je tvrdost shaftu (tyčky), a i ta se stejně jako délka mění v průběhu kariéry. Tvrdost je označována jako průhyb hokejky pod zatížením 300 N. O kolik milimetrů se hůl prohne, tolik se udává tvrdost hole. Tvrdosti hokejek se pohybují v rozmezí 23-32 mm. Začínající hráči a děti volí spíše měkčí hokejky, kdežto profesionální a zkušenější hráči hrají spíše s tvrdými hokejkami. Tvrdost shaftu má vysoký vliv na střelu a její razanci a obecně platí, že čím větší sílu máte, tím tvrdší hokejku potřebujete. [6]



*Obr. 1 Testování tvrdosti florbalové hokejky [8]*

Čepel je dalším důležitým komponentem florbalové hole, protože je částí, která přichází do přímého kontaktu s míčkem. Z tohoto důvodu musí být čepel pevná a odolná, především aby se udržela v dobrém stavu a tvaru po opakovaných nárazech do míčku či jiných prostředků hry. Čepele se vyrábějí z polypropylenu (PP) nebo polyetylenu (PE). Čepele jsou navrženy tak, aby přesně kopírovaly tvar míčku a umožňovaly hráčům snadněji ovládat jeho směr a rychlost. Existuje mnoho různých typů a tvarů čepelí, které jsou určeny pro různé styly hry a preference hráčů. Některé hlavy čepel mají větší plochu, což umožňuje hráčům snadněji kontrolovat míč, zatímco jiné mají ostřejší tvar, což umožňuje hráčům snadněji střílet na branku. Dále rozlišujeme tři tvrdosti čepelí – soft, medium a hard. [1; 6]

- Soft (měkká čepel) – Tato čepel je vhodná především pro technické hráče, kteří umí výborně pracovat s míčkem na hokejce. Je ideální na střely tahem z bližší vzdálenosti a přesné přihrávky. Při silné střele příklepem se čepel svým měkkým potenciálem může zkroutit a střela není moc přesná. Materiálem je většinou polypropylen.
- Medium (středně tvrdá čepel) – Jedná se o nejpoužívanější typ čepel, která zajišťuje univerzální tvrdost, díky které je míček na hokejce dobře kontrolovatelný a umožňuje i razantní střelu příklepem. Je vhodná pro hráče s kombinací technických dovedností i tvrdších střel z dálky příklepem. Materiálem je většinou polyetylen.

- Hard (tvrdá čepel) – Tvrdý materiál čepel je vhodný na výbornou a razantní střelu a je tak vhodná pro hráče s větší dynamikou a silou než pro hráče s technickou dovedností. Při použití této čepel je nutná větší obezřetnost u přihrávek, protože míček má tendenci vlivem tvrdého materiálu více od čepel odskakovat. Materiálem je polyetylen.



Obr. 2 Florbalová čepel UNIHOOC [7]

Při výběru hole hraje významnou roli materiál, ze kterého je hůl vyrobena. Nejzásadnějším rozdílem, který reflektuje volbu materiálu pro výrobu hokejky, je celková hmotnost hole. Základními materiály, ze kterých jsou florbalové shafty vyrobeny, jsou kompozitní materiály (kompozit, skelná vlákna, karbon s kompozitem, karbon). Výdrž holí je vždy stejná, ať se jedná o základní kompozitový materiál, či dražší karbonový materiál. U dražších materiálů se připláčí za nižší hmotnost, která přináší lepší pocit kontroly nad míčkem. Celková hmotnost hokejky by neměla dle předepsané normy přesáhnout 380 g. Nejlehčí hokejky se v dnešní době pohybují kolem 180 g díky karbonovým materiálům. [2; 6; 9]

Švédský výrobce florbalových hokejek uvádí na svých stránkách tyto používané materiály florbalových holí:

### Composite

Nejstarší materiál ve výrobě florbalových holí, který je složen ze 100 % skelných vláken. Hlavní charakteristikou kompozitních holí je jejich



pevnost a odolnost. Skelné vlákno je materiál složený z malých tenkých vrstev skla, které vytváří odolný kompozit. [9]

### **Composite +**

V této verzi se stále využívá skelných vláken, ale je použita lepší verze skla. Tím se dosahuje lehčí a vyváženější florbalové hole. [9]

### **Ultralight**

Tato verze byla dlouhou dobu považována za nejlehčí a nejlepší materiál na florbalovém trhu. Materiál se skládá z 80 % uhlíkových vláken a 20 % skelných vláken. Touto kombinací materiálů je hůl lehká, odolná a dobře vyvážená a patří tak k jedné z nejpoužívanějších hůl. [9]

### **Airlight**

Materiálem hole je 100 % karbon. Takové hole jsou nejlehčí hole na trhu s dobrými vlastnostmi. Karbon výborně absorbuje nárazy a otřesy, což lze pocítit při střelách příklepem, kdy se do dlaní vrací minimum energie. Pozitivní vlastností je taky tuhost a odolnost karbonu, či pomalé stárnutí materiálu při namáhání. Nevýhodou je menší pevnost oproti skelným vláknům. Tyto hokejky patří k nejdražším na trhu. [9]

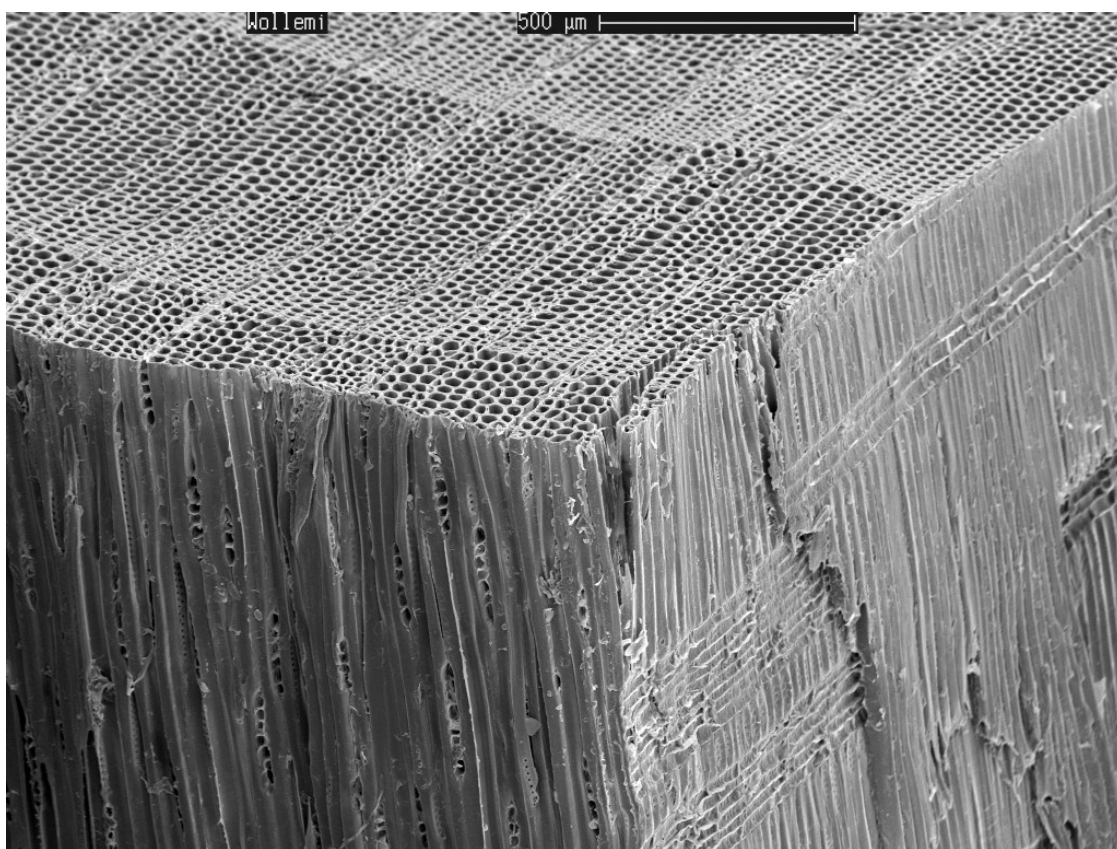


*Obr. 3 Florbalová hůl ZONE Airlight [9]*

## 2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

V této kapitole jsou blíže představeny kompozitní materiály, které se v průběhu posledních desítek let staly neoddelitelnou součástí moderní doby. Díky jejich specifickým vlastnostem jako je vysoká pevnost, odolnost proti korozi, chemická odolnost a dlouhá životnost, mohou vznikat efektivnější stroje a výrobky, které by za pomoci hliníku a oceli nebylo možné vyrobit.

Kompozity jsou složeny ze dvou materiálů s odlišnými vlastnostmi. Tyto odlišné vlastnosti se navzájem velmi dobře doplňují, proto vzniká materiál se specifickými vlastnostmi. Příkladem kompozitního materiálu z přírody může být například dřevo. Hlavní stavební jednotky dřeva jsou dvě složky – lignin a celulóza. Celulóza utváří ve dřevě pevná vlákna, díky kterým získává dřevo pevnost v tahu. Lignin naopak plní funkci výplně vláknité struktury a prolíná celulózu. Právě kombinace ligninu a celulózy dává dřevu dostatečnou pevnost, aby udrželo celou váhu koruny působící na kmen. [10]



*Obr. 4 Struktura dřeva pod mikroskopem [10]*

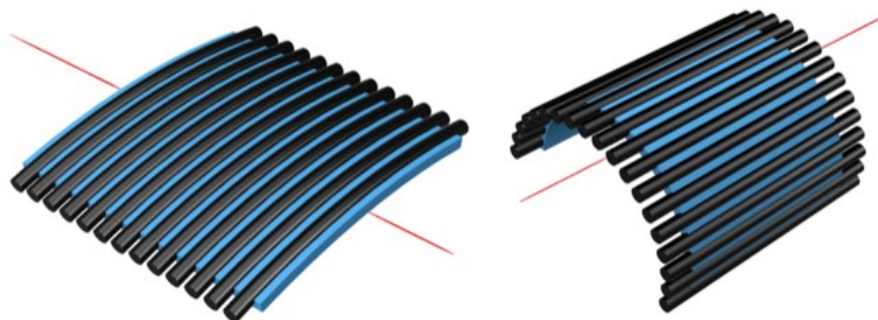
## 2.1 Definice kompozitu

Kompozitní materiál neboli kompozit, je heterogenní materiál. Tím se rozumí materiál, který je složený ze dvou nebo více složek, které se odlišují svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Jedna složka vždy zajišťuje spojení všech složek a takovou složku nazýváme matrice. Nespojitě složky nazýváme výztuž. Díky výztuži dochází k posílení a zlepšení především mechanických vlastností kompozitu. Při spojení těchto složek vznikne kompozit, jehož výsledné vlastnosti jsou kombinací všech složek a jsou mnohem lepší než vlastnosti jakékoli jednotlivé složky. Tím dochází k synergickému chování složek kompozitu, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou mnohem lepší, než by odpovídalo sečtení vlastností jednotlivých složek. Synergické chování kompozitu je velice významné, protože vede k získávání mnohem kvalitnějších materiálů se zcela novými vlastnostmi. [11; 12]

Kompozity jsou vyráběny mnoha způsoby, záleží především na požadovaných vlastnostech, využití produktu, estetice výrobku, velikosti výrobku a ekonomickém zhodnocení výroby. Na základě těchto parametrů se pak následně volí vhodná technologie výroby daného výrobku z kompozitu. [11]

Kompozity obsahují vyztužená vlákna 3,5 až 24  $\mu\text{m}$ , která jsou ze skla, uhlíku nebo aramidu. Matrice mohou být kovové, polymerní nebo keramické. Pro kompozity je typické, že ve směru osy vláken je pevnost i modul pružnosti mnohem vyšší, než v kolmém směru k ose vláken. Tato vlastnost je nazývána anizotropie. Vlákna mají vysokou pevnost hlavně z důvodu malé pravděpodobnosti výskytu defektů kvůli jejich velikosti, (pevnost vláken se zvyšuje s jejich klesajícím průměrem) a taky díky orientaci defektů ve směru osy vláken, které mají výrazně méně škodlivý vliv než defekty orientované kolmo k ose vlákna. [11; 12]

Pokud je osa, přes kterou se materiál ohýbá kolmo ke směru vláken, má materiál nejvyšší pevnost. Pokud se ale kompozit ohýbá přes osu, která leží ve směru vláken, materiál nemá takovou pevnost jako v prvním případě. Je to z důvodu, že ohybu čelí prakticky pouze matrice, nikoliv vlákna. [10]



Obr. 5 Ohýbání kompozitu vyztuženého vlákny [10]

Z toho vyplývá, že kompozity jsou primárně určeny pro namáhání v jednom směru, a to ve směru osy vlákna, kde jeví nejlepší vlastnosti. Tyto skutečnosti jsou pak reflektovány ve zvolené výrobní technologii výrobku.

## 2.2 Výhody a nevýhody kompozitu

Tato podkapitola podrobněji popisuje výhody a nevýhody kompozitních materiálů. Znalosti získané v této podkapitole jsou pak brány v potaz v praktické části, kdy je kompozit využit pro výrobu florbalové hole.

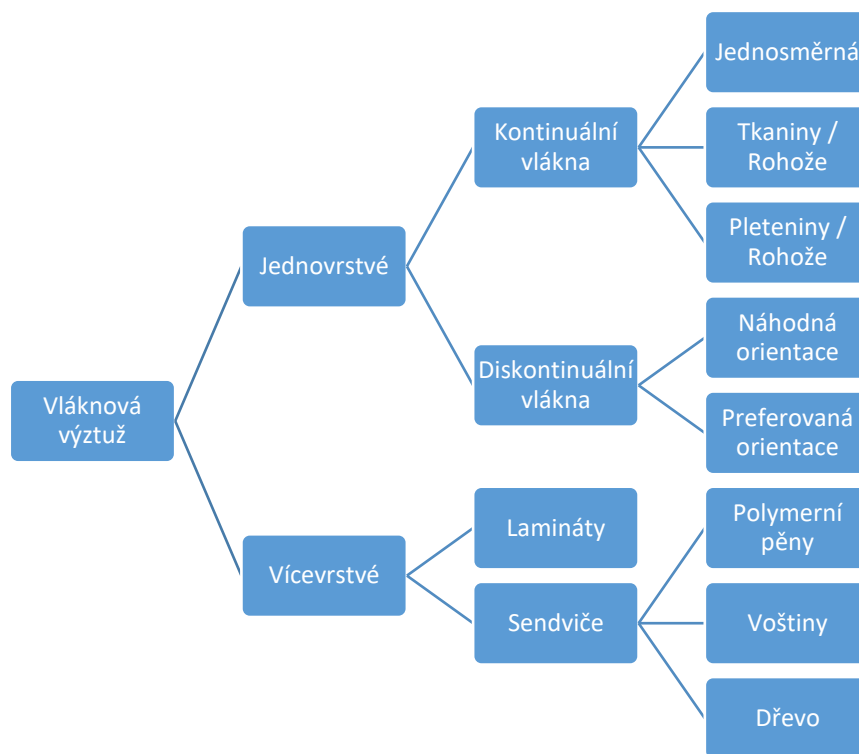
Mezi hlavní výhody patří jednoznačně vysoká pevnost a tuhost materiálu při nízké měrné hmotnosti. Oproti kovovým materiálům mají kompozitní materiály velmi dobrou odolnost proti korozi a degradaci materiálu, dále mají lepší dynamické vlastnosti. Kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny mají příznivou odolnost proti hoření a dobré chování při nárazu. Výhodou je také vysoká tvarová stálost a možnost vyrábět složité tvarové díly. Dle požadavků na daný výrobek je výhodou mnoho možností kombinace matrice a vláken, které umožňuje složení materiálu tzv. „na míru“. Další výhodou je možnost jednoduché výroby velkých složitých výrobků, a také výroba výrobků speciálních rozměrů v kusové výrobě. [12]

Mezi nevýhody se řadí nízká mez pevnosti v kolmém směru vyztužených vláken v kompozitu, obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu a nízká odolnost proti působení vlhkosti za tepla. Velkou nevýhodou je v současné době vnímána recyklace

kompozitních materiálů, neboť kvůli obtížné separaci vláken a matrice dochází často ke skládkování kompozitních materiálů, což je z ekologického hlediska nepřijatelné. [10; 12]

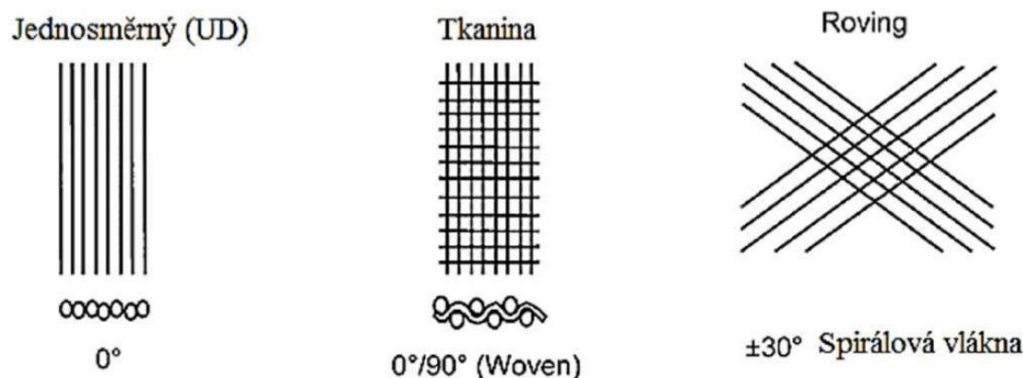
### 2.3 Vláknové výztuže

Vlákna jsou důležitou součástí kompozitních materiálů. Dodávají kompozitu tahové, ohybové a tvarové vlastnosti. Obecně jsou pevnější (především v tahu) a tužší (větší modul pružnosti) než matrice. Funkcí vláken je zejména přenášet zatížení. Napětí v kompozitu se přenáší adhezí (třením) na hranici matrice a výztuže. Při zatížení kompozitu se matrice, která má nižší modul pružnosti začne vnějším zatížením pružně nebo plasticky deformovat a vlákna v důsledku adheze toto zatížení přebírají. [13; 14]



Obr. 6 Dělení vláknových výztuží dle charakteru výztuže [13]

Důležitým faktorem je také orientace vláken, která modifikuje pevnost, tuhost a ovlivňuje odolnost proti únavě, vlhkosti a teplotě. Podle orientace vláken se výrazně mění pevnostní vlastnosti výsledného produktu. Základní směry orientace vláken používané z technologického hlediska jsou  $0^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ . Vlákna se v praxi uspořádávají nejčastěji jednosměrně (roving) nebo vícesměrně (tkanina). [15]



Obr. 7 Typy orientace vláken [15]

Vláknové výztuže se dělí u kompozitů hlavně podle materiálu. Obecně lze vlákna rozdělit na organická a anorganická. Mezi anorganická jsou řazena vlákna uhlíková, skelná, nebo také vlákna borová či vlákna z karbidu křemíku atd. Hlavním zástupcem organických vláken jsou vlákna polymerní (aramidová, PE, ...), přírodní vlákna a dále např. proteinová vlákna. [13]

Modul pružnosti je jeden z hlavních sledovaných parametrů mechanických vlastností, který ovlivňuje tuhost u kompozitních konstrukcí. Dále sledujeme parametry jako jsou: mez pevnosti v tahu a tažnost. Hustota nebo teplotní odolnost jsou pak důležitými parametry fyzikálních vlastností. U vláken je specificky zaveden parametr tržná délka, což je charakteristika, která vyjadřuje souvislosti pevnosti a

$$L_R = \frac{R_m}{\rho \cdot g} [m, km] \quad (1)$$

hustoty dle následujícího vztahu:

Kde:  $L_R$ ... tržná délka [m, km]

$R_m$ ... mez pevnosti v tahu [MPa]

$\rho$ ... hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$ ... gravitační zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]

Tržná délka je teoretická délka vlákna v okamžiku jeho přetržení jeho vlastní hmotností. Udává se v metrech, respektive v kilometrech. V následující tabulce jsou uvedeny orientační tržné délky vybraných materiálů:

Tab. 2 Tržná délka u vybraných materiálů [13]

Materiál	Tržná délka L <sub>R</sub> [km]
ocel	6
ocel lanová	20
hliník	3
slitiny hliníku	20
hedvábí	50
UHMWPE	300
aramidové vlákno	260
skelné vlákno	90-180
uhlíkové vlákno	200-340

### 2.3.1 Uhlíková vlákna

Diplomová práce se zaměřuje na práci s uhlíkovými vlákny a prepregy, proto bude dále z oblasti vláknových výztuží věnovaná pozornost pouze uhlíkovým vláknům, která jsou běžně využívána pro výrobu florbalové hole.

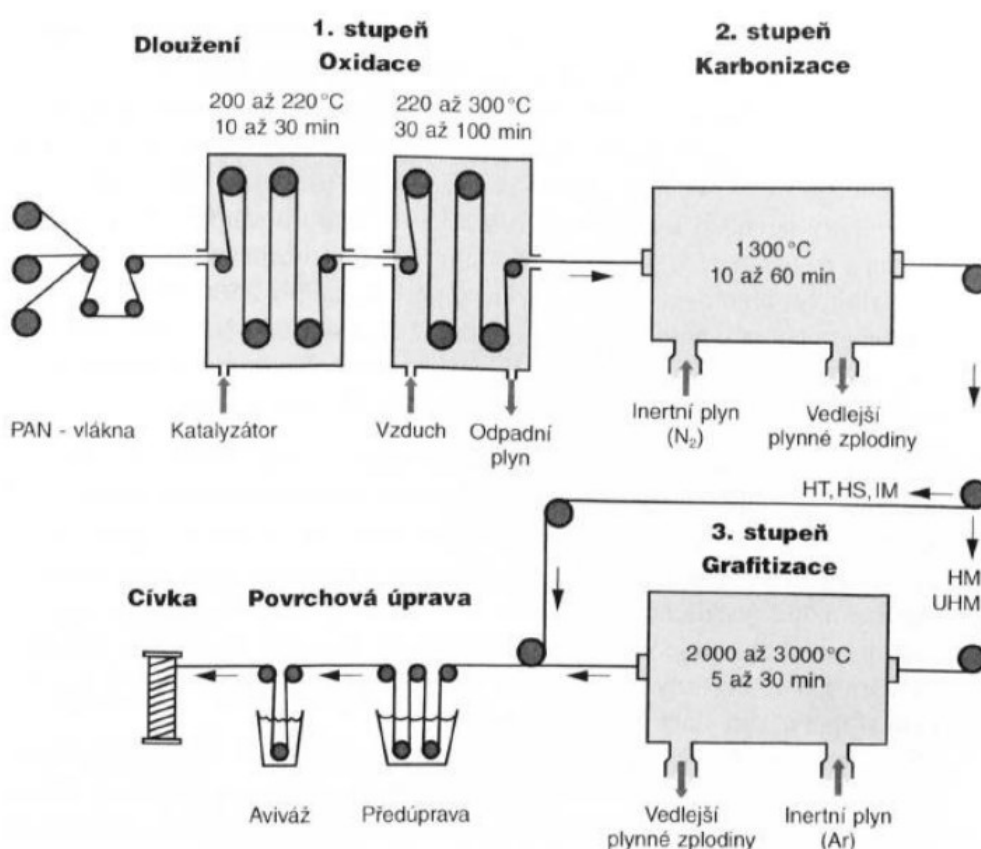
Uhlíkové vlákno se řadí mezi vlákna dosahující nejlepších mechanických vlastností. Mezi přední vlastnosti patří vysoký modul pružnosti, který je v kombinaci s nízkou hmotností velice efektivní. Polymerní kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny mají hustotu kolem 1,5 g.cm<sup>-3</sup>, přičemž dosahují srovnatelného modulu pružnosti v tahu s ocelí. Mezi další přednosti řadíme chemickou odolnost, a především neměnnost vlastností až do 2000 °C, kdy vlákna z jiných materiálů ztrácí své vlastnosti daleko dříve. Velkou výhodou je také odolnost proti únavě, dále pak tento materiál dobře tlumí vibrace. Uhlíková vlákna také vykazují nízký koeficient tepelné roztažnosti, tepelnou a elektrickou vodivost. Dříve se rozlišovala vlákna uhlíková a grafitová, ale v dnešní době se řadí do stejné skupiny a nerozlišují se podle struktury, ale podle dosahovaných vlastností. [13; 16]

Na trhu lze nalézt vlákna vysokomodulová nebo vysokopevnostní. Podle toho se dělí do 4 kategorií:

Tab. 3 Kategorie uhlíkových vláken [16]

Druh vlákna	R <sub>m</sub> [MPa]	E [GPa]	ρ [kg.dm <sup>-3</sup> ]
HT (high tenacity)	>3100	200 – 250	1,8 – 2,0
HS (high strength)	>2000 – 3100	200 – 250	1,73 – 1,87
UHM (ultra high modulus)	>1700	>400	1,95
HM (high modulus)	>1700	300–400	1,8 – 2,0

Výroba uhlíkových vláken je založena na karbonizaci oxidovaného polotovaru (např. PAN – polyakrylonitril) za vysoké teploty (1300 °C) v atmosféře inertních plynů (N<sub>2</sub>). Během této operace ztratí polotovar většinu neuhlíkových atomů v řetězci a karbonizací získáme vlákna s vysokou pevností a nižším modulem pružnosti. Pokud je požadováno vlákno s vyšším modulem pružnosti, je nutné po karbonizaci ještě zařadit grafitizaci, která se provádí za vyšších teplot (2000–3000 °C) v atmosféře argonu. Po tepelném zpracování následují povrchové úpravy, případné sdrůžování, splétání a navíjení. [13; 14]



Obr. 8 Výroba uhlíkových vláken [13]



### 3 VARIANTY VÝROBY DUTÝCH KRUHOVÝCH PROFILŮ

Při výrobě kompozitních materiálů a výrobků je technologický postup a zvolená technologie velmi důležitým faktorem. Zvolená výrobní technologie určuje konečné vlastnosti výrobku, ekonomiku výroby a je dána především charakterem a složitostí vyráběné součásti. Při její volbě se řídíme několika zásadními faktory, kterými jsou:

a) Sériovost dílce

V mnoha případech se při výrobě kompozitů jedná o kusovou, nebo malosériovou výrobu, kdy je lepší využít technologie jako je například ruční kladení. Při velkých sériích je logicky neekonomické takovou technologii využívat, proto se větší série výrobků vyrábí strojními technologiemi. [17]

b) Tvar a velikost výrobku

Některými technologiemi je možné vyrábět pouze určité tvary výrobků a některé postupy lze aplikovat pouze na jednoduché tvary. Například technologie navíjení nebo strojní stříkání. [17]

c) Kvalita povrchu

V některých technologických postupech lze získat pouze jednostranně kvalitu povrchu. Kvalita povrchu také závisí na předchozí úpravě a kvalitě povrchu formy. [17]

d) Požadované vlastnosti

Mechanické vlastnosti kompozitů jsou závislé zejména na obsahu a orientaci výztuže a na typu požité matrice. Tyto faktory se liší v závislosti na zvolené technologii. [17]

Obvykle je důležité volit kompromis, aby bylo možné co nejvíce vyhovět požadavkům a přiblížit se hlavně k těm, které jsou důležité a nejvíce ovlivňují konečné vlastnosti. [17]

Diplomová práce je zaměřena výrobu florbalové hole, v následujících podkapitolách budou pospány různé technologie kusové nebo malosériové výroby podobných profilů – trubek.

### 3.1 Výroba metodou roll-wrapping

Tato technologie využívá pryskyřici impregnované rovingy nebo textilní rohože (prepregy). Používá se k výrobě pevných a tuhých trubek o nízké hmotnosti z uhlíkových vláken. Touto metodou lze vyrábět pouze rovné trubky, nebo kuželové trubky, nikoli složité a zahnuté tvary trubky. Výhodou této technologie je nekomplikovaná výroba prototypů a jednoduchost výrobního procesu. [18]

Hlavní metodou technologie je obalení prepregových uhlíkových vláken kolem kovového trnu. Z toho vyplývá, že jaký průměr bude mít kovový trn, takový průměr bude mít výsledný dutý profil. Protože bude uhlíkový prepreg obalený kolem kovového trnu, znamená to, že vnější průměr kovového trnu bude vnitřním průměrem vyrobené trubky. Vnější průměr je určen počtem vrstev výztuže. Jako materiál kovového trnu je vhodné používat materiály s vyšší tepelnou roztažností. Vhodným materiálem je například hliník, který má mnohem vyšší teplotní roztažnost než třeba ocel nebo jiné kovy. Při zahřátí se materiál více roztáhne, prepreg díky pryskyřici ztuhne, a při ochlazení se materiál zpět stáhne a kovový trn se lépe vytáhne z hotového dutého profilu. Důležitou částí je, aby byl kovový trn před výrobou co nejvíce očištěný a hladký. Trn by měl být také důkladně připraven pomocí vysokoteplotního chemického separačního prostředku. [18; 19]



*Obr. 9 Příprava a separece kovového trnu [18]*

V praxi je možné využít různých materiálů a výztuh, nejvíce je však používán materiál uhlíkový prepreg, a to taky díky snadné manipulaci. Jednotlivé vrstvy můžou tvořit různé druhy prepregů o různé orientaci vláken. Záleží především na konečných požadovaných vlastnostech. Například prepreg s orientací vláken  $0^\circ$  dodává trubce její podélnou tuhost, orientace vláken  $90^\circ$  (po obvodu trubky) dodává trubce pevnost a odolnost proti rozdrčení a orientace vláken  $45^\circ$  dodává trubce například odolnost vůči torzním silám. [18]

Jednotlivé vrstvy uhlíkového prepregu se postupně nabalí na kovový trn. Důležité je si vrstvy dopředu změřit, aby nedošlo k neúplnému obalení a nevyžádaným přesahům.



*Obr. 10 Nabalování uhlíkových prepregů na kovový trn [18]*

Jakmile je předimpregnovaný materiál co nejtěsněji ovinutý kolem trnu, je poté pevně obalen kompozitní smršťovací páskou, aby se zajistilo další zpevnění. Při aplikaci smršťovací pásky je důležité zajistit, aby se hodně překrývala přes sebe. To zajistí konstantní tlak po celém dutém profilu, když se páska smršťuje. [18]



*Obr. 11 Obalování navinutého prepregu smršťovací páskou [18]*

Posledním krokem výroby je umístění nachystané prepregové trubky na kovovém trnu do pece. Jediný omezující faktor, který si tato technologie vyžaduje, je nutnost mít k dispozici dostatečně velkou vytvrzovací pec s regulací teploty. Výhodou je na rozdíl od jiných prepregových procesů, že se nevyžaduje přesné řízení teploty během vytvrzování. Není potřeba ani použití vakua k vytvrzovacímu procesu. [18]

### **3.2 Výroba pomocí pletených rukávů z uhlíkových vláken**

Výroba pomocí pletených uhlíkových rukávů se řadí mezi další jednoduché a poměrně levné metody výroby dutých profilů. Principem je výroba bezešvé trubky z uhlíkových vláken pomocí pleteného karbonového rukávu. Tato metoda se používá po celém světě k výrobě produktů v letectví, sportovních pomůcek, rybářských prutů, turistických holí a další. Výroba touto technologií je všestranná a vysoce efektivní. Kompozit ve formě rukávu nabízí vysokou pevnost, menší pravděpodobnost defektů na hotovém výrobku a jednoduchost aplikace při výrobě.

Prvním kritériem při výrobě touto technologií je volba rukávu. Kompozitní rukávy se dodávají v různých variantách, velikostech a s různou orientací vláken, a také s různou kombinací vláken (kevlar, skelná vlákna, aramid) pro požadované vlastnosti. Výsledný přívětivý vizuální efekt zajišťuje keprová vazba 2x2, která podporuje rovnoměrné rozložení zatížení. Schopnost kompozitního pleteného rukávu

roztahovat se a smršťovat, zajišťuje univerzálnost použití jednoho rukávu pro více průměrů. Obvykle se rukáv dokáže roztáhnout o 30% a smrstit o 70%, ale záleží na velikosti a druhu rukávu. Proto je výhodou použít tuto technologii při výrobě trubky s měnícím se průměrem v její délce. [20]



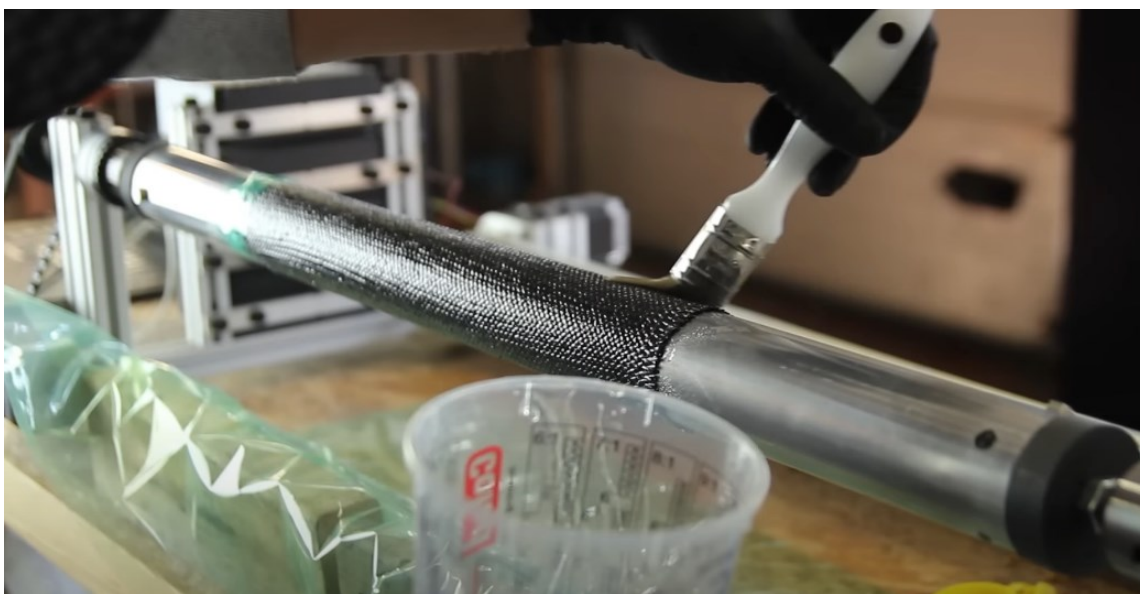
*Obr. 12 Pletený rukáv z uhlíkových vláken [20]*

Podobně jako při technologii roll-wrapping je potřeba jádro, na které pletený rukáv navlečeme. Jádrem mohou být různé produkty jako např. PVC trubka (pouze pro krátké trubky z důvodu kroucení), vzduchové jádro (duše pneumatiky) nebo kovové jádro (měděné trubky, ocelové trubky, hliníkové trubky). Nejčastěji se používají kovové trny. V prvním bodě výroby se pletený rukáv natáhne, nebo navleče na kovový trn.



*Obr. 13 Navlečení rukávu na trn [19]*

Po navlečení rukávu na trn je vrstva natažena nebo stažena dle tvaru trnu a malým štětcem je nanášena pryskyřice. Po nasycení celé vrstvy pryskyřicí se může navléknout další vrstva, u které se proces natírání opakuje.



*Obr. 14 Nanášení pryskyřice pomocí štětce [19]*

Jakmile jsou navlečeny a nasyceny všechny vrstvy, pokračuje proces k vytvrzování pryskyřice. Proces vytvrzování může probíhat vícero způsoby.

Nejčastější technika je vyvinutí tlaku pomocí smršťovací pásky nebo hadičky, pomocí vakuového balení nebo jiných mechanických technik. Nejjednodušší je použít smršťovací pásku, potom je proces stejný jako u metody roll-wrapping, kdy se nechá pryskyřice vytvrdit v peci. [19; 20]



*Obr. 15 Navíjení smršťovací pásky [19]*

### 3.3 Výroba pomocí dělené formy

Tuto technologii lze použít k výrobě nerovných a složitých tvarů trubek, jako jsou například říditka, kajaková pádla, rámy kol a další složitější výrobky. Stejně tak je vhodná pro výrobu florbalové hole, a v praktické části je tato technologie využita.

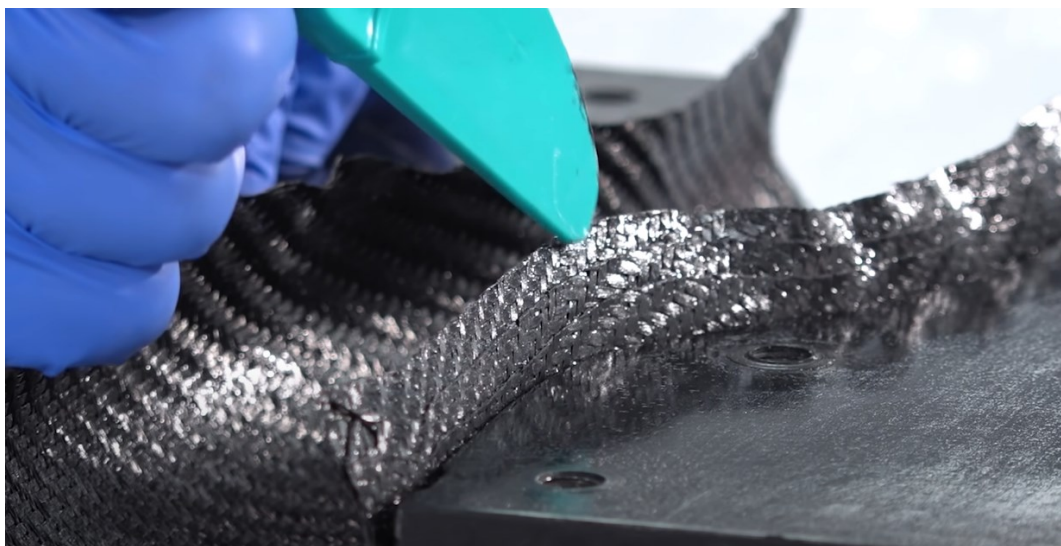
Oproti předem popsaným technologiím je technologie dělené formy více komplikovaná a příprava je složitější. Principem je použití před-impregnovaného materiálu, kterým se vylepí forma a následně se pomocí vakua a uložení v peci vytvrdí. Výhodou technologie je výroba složitých dílů a nevýhodou je komplikovanost výroby a nutnost výroby formy.

V prvním kroku výroby je potřeba získat přibližný tvar pro nařezání prepregu. To lze udělat pomocí maskovací pásky, díky které se přenese tvar z dutiny formy na rovný prepreg. Šablona ale není vždy úplně přesná, proto se doporučuje prodloužit alespoň o 1 cm. [21]



*Obr. 16 Nanesení tvaru dutiny na prepreg pomocí maskovací pásky [21]*

Vyříznutý prepreg je poté laminován do formy. Jakmile je pečlivě nanesený uvnitř dutiny formy, veškerý přečnívající prepreg je opatrně odříznut, aby byl v jedné rovině s okrajem formy. Zbylé odřezky jsou poté vloženy zpět na šablonu a oříznuté na přesný tvar dutiny. Dále je důležité, aby další jednotlivé vrstvy byly naměřeny tak, aby vzniklo přeplátování v dělicí rovině formy. V tomto případě záleží na počtu vrstev. Jednotlivé vrstvy se na jedné straně prodlužují přes dělicí rovinu a na druhé se zkracují, aby odpovídaly delším přesahům z druhé poloviny formy. Tak vznikne silný spoj, který zabrání rozpadnutí dutého profilu v dělicí rovině formy. [19; 21]



*Obr. 17 Přesah vrstev přes dělicí rovinu formy [21]*



Aby bylo dosaženo tlaku uvnitř dutého profilu, je zapotřebí použít fóliový rukáv, který se vloží dovnitř formy. Fóliový rukáv je poté spojen s venkovní vakuovací fólií a vytvoří uprostřed „tunel“. Při vakuování je rukáv nasáván na vnitřní stranu dutiny, a tím vytváří požadovaný tlak.



*Obr. 18 Fóliový rukáv uvnitř dutiny formy [21]*



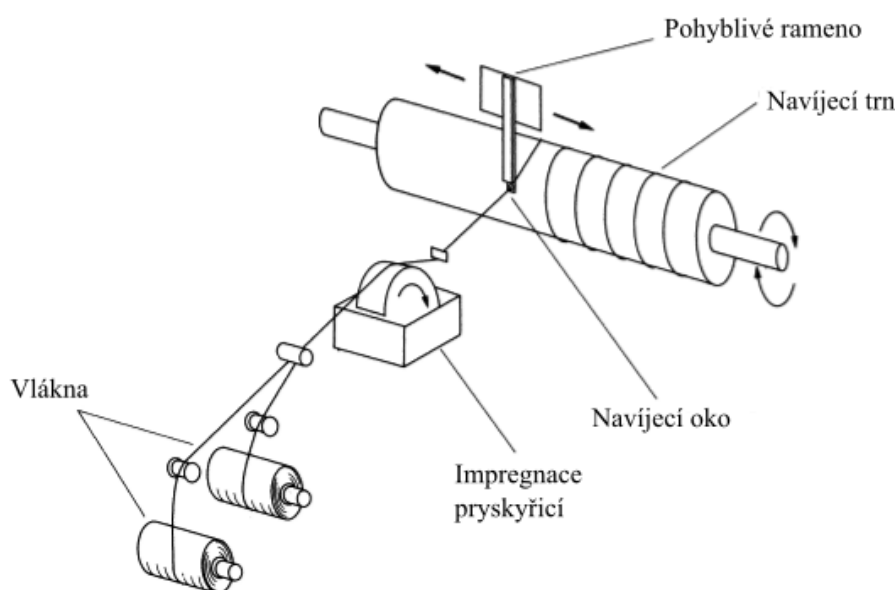
*Obr. 19 Vakuování formy [21]*

Vakuově zabalená forma se poté vloží do pece, kde se nechá vytvrdit. Vytvrzení probíhá pomocí řízené teploty a je třeba dodržet specifický cyklus vytvrzování k dosažení co nejlepších výsledků. O podrobnosti optimálního cyklu vytvrzování informuje materiálový list daného prepregu, se kterým je pracováno. [21]

### 3.4 Výroba navíjením

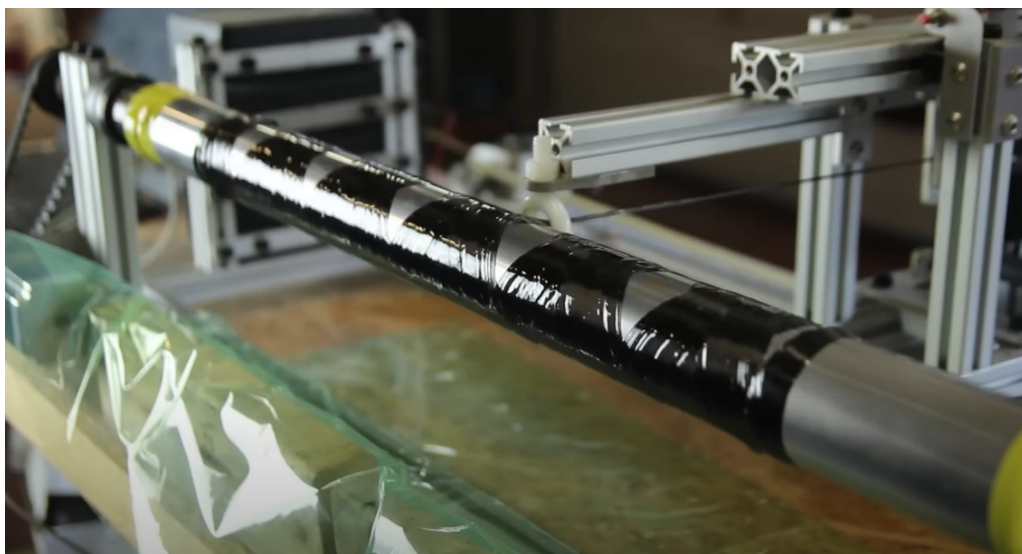
Výroba navíjením vlákna vytváří duté profily o velké pevnosti. Křížovým navíjením uhlíkových, skelných nebo aramidových vláken na trn a jejich nasycení pryskyřicí získáme optimalizovaný produkt, který je ideální při výrobě tlakových nádob, leteckých komponentů, sportovních potřeb, vojenské výzbroji a dalších produktů, při zachování velmi nízké hmotnosti a pevnosti. Hlavní výhodou výroby navíjením oproti jiným metodám výroby kompozitů, je možnost použití automatizačních robotů. Největší nevýhodou je geometrické omezení výroby, nelze vyrábět konkávní plochy. Chování vláken při navíjení také silně závisí na druhu použité pryskyřice.

Při procesu navíjení jsou důležité dvě funkce. První důležitou funkcí je rotace navíjecího trnu, na který se vytváří vrstvy z navíjeného vlákna. Druhou funkcí je pohyb ukládacího pramene pomocí ramena stroje podél osy trnu. Systém šroubovicového navíjení lze přirovnat z hlediska pohybu k soustruhu. Vhodná orientace vláken je určena regulací rychlosti rotace trnu a posuvu ramena. [12; 22]



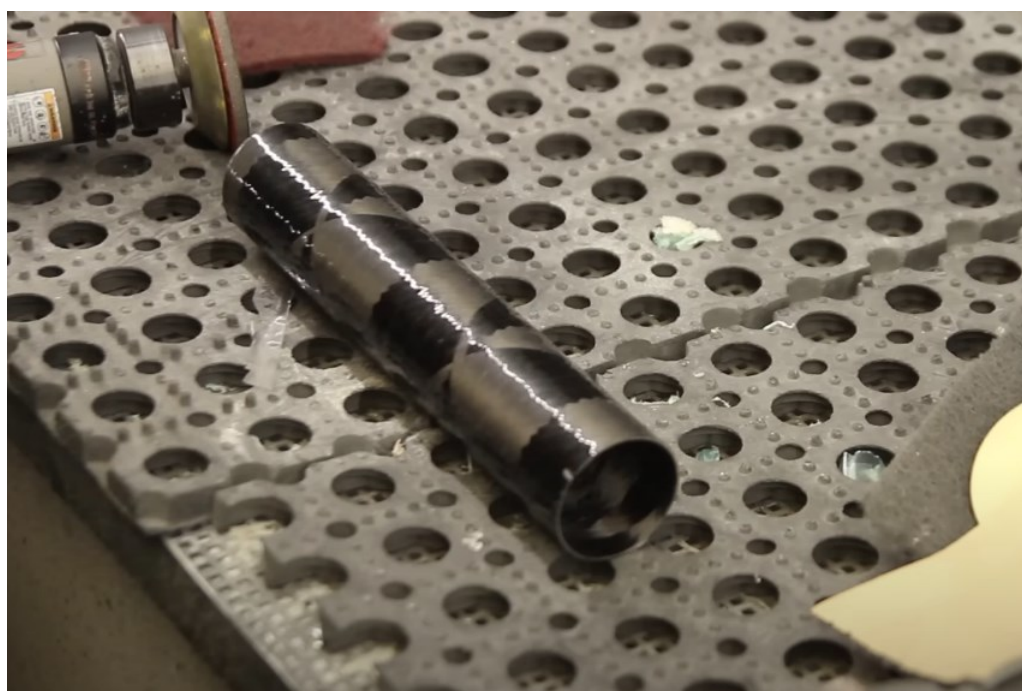
Obr. 20 Proces výroby navíjením [22]

Při navíjení je nejdříve vlákno nasyceno pryskyřicí, a poté je rovnoměrně nanášeno na rotující navíjecí trn. Rychlost navíjení a rychlost posuvu trnu závisí na požadovaných vlastnostech a směru orientace vláken. [19]



*Obr. 21 Navíjení vlákna na trn [19]*

Po navinutí všech vrstev na navíjecí kovový trn následuje proces vytvrzení. Způsobů vytvrzení je několik, tím nejjednodušším se jeví použití smršťovací pásky a následné zahřátí v peci. Způsobem vytvrzení může být také použití vakua nebo autoklávu. Po vytvrzení je hotový dutý profil potřeba sejmout z kovového trnu. Proto se používá materiál s vysokou tepelnou roztažností, v běžné praxi např. hliník. Je doporučeno na chvíli vložit trn i s hotovým vytvrzeným dutým profilem do mrazáku, kde se materiál stáhne a hotový výrobek se lépe odstraní z trnu. [19; 22]



*Obr. 22 Hotový výrobek vyrobený metodou navíjení [19]*

## 4 ZPŮSOBY TESTOVÁNÍ DUTÝCH PROFILŮ

Velkou část mechanických vlastností určuje zejména výztuž kompozitu, rozložení plniva nebo vláken, orientace vláken, a zvláště obsah vláken. Testování mechanických vlastností je u kompozitních materiálů mnohem složitější než u homogenních materiálů, např. kovů nebo nevyztužených plastů. Pevnost vláken lze měřit pouze v jejich směru, a to stejně obtížně z důvodu působení upnutí jako slabého místa. V kolmém směru na vlákno se prakticky měřit nedá. Snadnější je tedy vyjádřit anizotropii než pružnost. Z vláknových výztuží jsou izotropní pouze skleněná vlákna. Mezi testované a sledované vlastnosti se řadí např. pevnost v tahu, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku, modul pružnosti v ohybu, vzpěr, houževnatost a další. Hlavní sledované vlastnosti u dutých kruhových profilů (zejména u florbalových tyčí) jsou pevnost v ohybu a nárazová pevnost. [12]

### 4.1 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem se řadí mezi nejjednodušší zkoušky. Zkouška má spíše srovnávací význam, ale je vhodná pro porovnávání různých materiálů s různou orientací vláken a skladbou kompozitu. Hodnoty pevnosti v ohybu závisí výrazně na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině. Nutné je sledovat v průběhu zkoušky druh porušení, kterým je lom vyvolaný tlakem nebo tahem. Ohybem se pro různé druhy vyztužení zabývá několik norem např. ASTM D790 nebo ČSN EN ISO 14125. [12; 15]

V průběhu zkoušky je po celou dobu zaznamenávána síla, která působí na těleso. Díky zkoušce ohybem jsou stanoveny: pevnost v ohybu, průhyb, deformace ohybem a modul pružnosti v ohybu. Zkouška může být prováděna pro tříbodový nebo čtyřbodový ohyb. U čtyřbodového ohybu je zkušební těleso zatěžováno dvěma trny působící v jedné třetině vzdálenosti podpěrných trnů. Hlavní výhodou je konstantní ohybový moment  $M_0$  po celé délce rozteče uložení vzorku. U tříbodového ohybu je zkušební těleso zatíženo v jednom bodě, ve kterém dochází k napjatosti s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v bodě zatížení. U florbalových holí se k testování používá pouze tříbodový ohyb, jelikož kritické zatížení v praxi působí často právě jednobodově. Napětí v ohybu pro dutý kruhový profil se vypočítá:

$$s_o = \frac{8 \cdot D \cdot F_{max} \cdot l}{\pi \cdot (D^4 - d^4)} \quad (2)$$

Kde:  $s_o$ ... napětí v ohybu [MPa]

$F_{max}$ ... působící síla [N]

$l$ ... délka zkoušeného tělesa [mm]

$D$ ... vnější průměr dutého kruhového profilu [mm]

$d$ ... vnitřní průměr dutého kruhového profilu [mm]

Velikost průhybu nosníku v polovině dutého kruhového profilu je vyjádřena:

$$y_{max} = \frac{4 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot \pi \cdot (D^4 - d^4)} \quad (3)$$

Kde:  $y_{max}$ ... velikost průhybu [mm]

$F$ ... působící síla [N]

$l$ ... délka zkoušeného tělesa [mm]

$E$ ... modul pružnosti [MPa]

$D$ ... vnější průměr dutého kruhového profilu [mm]

$d$ ... vnitřní průměr dutého kruhového profilu [mm]

Průhyb je vzdálenost, o kterou se zkušební těleso při zatížení vychýlí mezi rozpěrami ze své původní polohy. Při některých testech nedochází k úplnému lomu, ale sleduje se deformace po zatížení. To znamená, že nedojde k lomu, ale těleso se z průhybu nevrátí zpět do své polohy. [12; 15; 23]

#### 4.1.1 Zkouška ohybem florbalových holí dle materiálový předpisů SPCR 011

Zkouška florbalových holí ohybem se provádí tříbodovým ohybem na univerzálním testovacím stroji s rychlostí 200 mm/min. Kvůli různým délkám florbalových holí se zkouška dělí na 2 metody:

**Metoda A – florbalové tyče o délce 850–1040 mm**

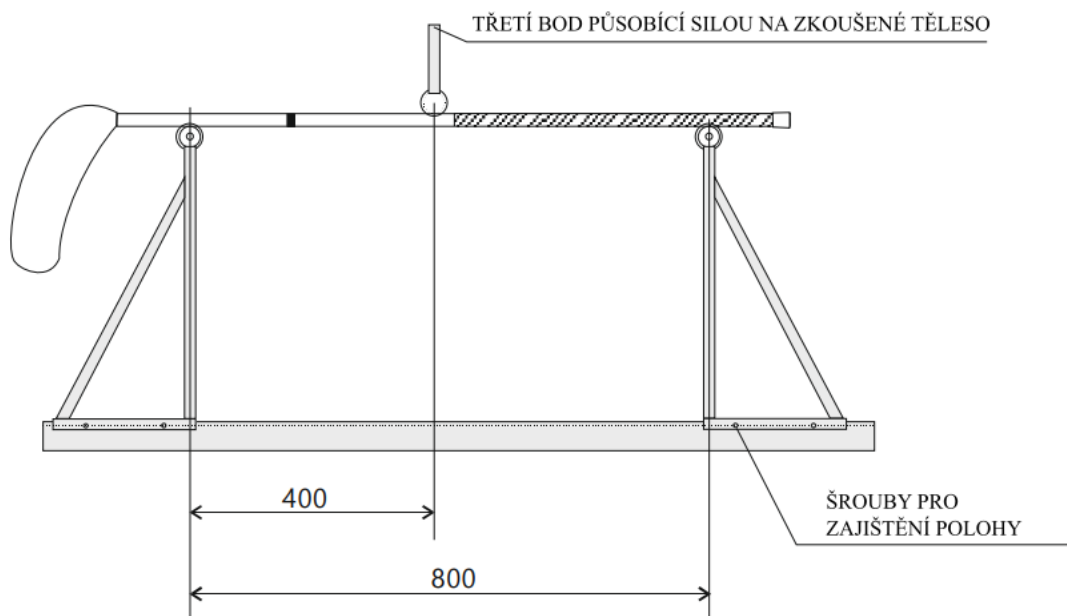
Florbalová hůl by se při zatížení 300 N měla vychýlit nejméně o 23 mm. Měřena je jako průměrná hodnota tří průhybů v každém směru, přičemž hodnota v nejužším směru nesmí být nižší než 17 mm. Tyč by měla snést průhyb 60 mm v nejpružnějším směru, aniž by došlo ke zlomení nebo prasknutí. Výsledná deformace po průhybu by neměla překročit 6 mm. [6]

**Metoda B – florbalové tyče o délce 650–849 mm**

Florbalová hůl by se při zatížení 300 N měla vychýlit minimálně o 10 mm. Měřena je jako průměrná hodnota tří průhybů v každém směru, přičemž hodnota v netužším směru nesmí být nižší než 8 mm. Tyč by měla snést průhyb 30 mm v nejpružnějším směru, aniž by došlo ke zlomení nebo prasknutí. Výsledná deformace po průhybu by neměla překročit 3,5 mm. [6]

**Průběh zkoušky**

Zkušební tyč je volně vložena na válcové podpěry. Válcové podpěry o průměru  $35 \pm 10$  mm jsou uloženy v ložiskách a vzdálené jsou od sebe 800 mm u metody A, 600 mm pak u metody B. Zatížení je aplikováno rychlostí 200 mm/min uprostřed tyče do průhybu 60 mm u metody A, 30 mm u metody B. Výstupem je diagram průhyb/síla. Florbalová hůl je zatěžována ve dvou směrech, svisle i vodorovně. Výsledná deformace se odečte po 10 sekundách. Výsledkem je průměrná hodnota průhybu při 300 N. Pokud se během testování objeví prasklina nebo se hůl zlomí, uvádí se síla, pod kterou hůl praskla. Dále je uvedena síla pro potřebný průhyb 60 mm (metoda A), 30 mm (metoda B). [6]



Obr. 23 Zkouška ohybem florbalové hole [6]

## 4.2 Rázová zkouška

Cílem rázových zkoušek je zjistit, jak se materiál bude chovat při dynamickém rázovém namáhání. Při dynamickém namáhání vzniká porušení za použití často menší zatěžující síly než u statického namáhání, a to z důvodu koncentrace působící síly do velmi malého časového úseku. Zkouška rázem se provádí pomocí Charpyho kladiva nebo rázovou zkouškou pádem.

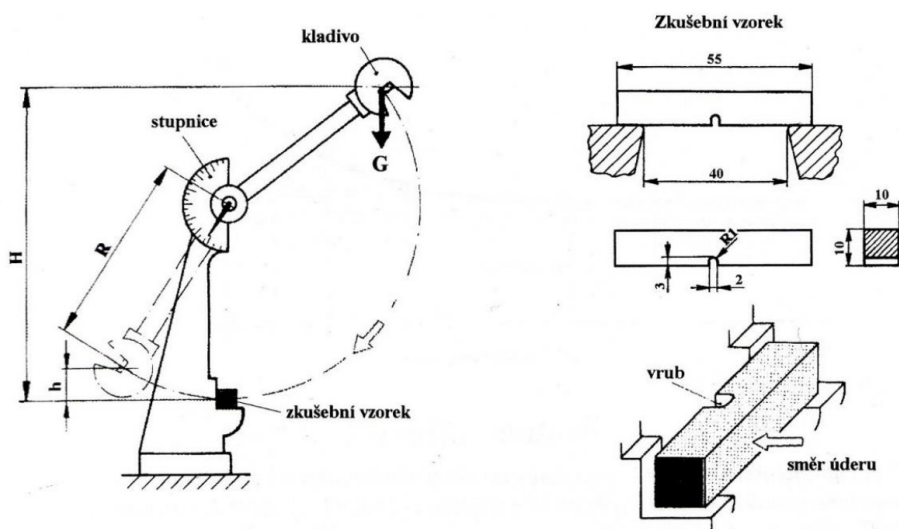
Kompozity nacházejí velké uplatnění v leteckém, automobilovém, sportovním průmyslu hlavně díky své pevnosti při nízké hmotnosti, ale jejich nevýhoda je citlivost na nárazy. Nárazy způsobují u kompozitů především vnitřní defekty jako je delaminace, praskání matrice nebo vláken. Tyto vady nemusí být viditelné na povrchu, přesto k nim dochází a snižují pevnost a únosnost materiálu. Proto se při návrhu kompozitních výrobků zohledňuje velká bezpečnostní rezerva. [16]

### 4.2.1 Zkouška rázem v ohybu

Tato zkouška se využívá pro zjištění houževnatosti materiálu. Houževnatost lze vyjádřit jako energii spotřebovanou na přeražení zkušebního tělesa. Zkouška rázem ohybu je nejznámější a nejpoužívanější rázová zkouška. Vzorky mají ve středu vruby,

v případě velké houževnatosti materiálu. Druhy a velikosti vzorků jsou popsány normou ČSN EN ISO 179-1, která popisuje metodu zkoušky rázem v ohybu Charpyho kladivem. [24]

Stroj pro měření vrubové houževnatosti se nazývá Charpyho kladivo. Průběh začíná umístěním vzorku do nejnižšího bodu dráhy kladiva a následně se upevní kladivo o hmotnosti  $G$  do výšky  $H$ . Poté je kladivo uvolněno, vzorek se přerazí a kladivo se vyhoupne do výšky  $h$ . Na základě těchto údajů je výpočtem zjištěna nárazová práce a vrubová houževnatost. Jako vzorky slouží malé kompozitní lamináty, duté profily se touto metodou téměř nezkontrolují. [24; 25]



Obr. 24 Charpyho kladivo [24]

#### 4.2.2 Rázová zkouška pádem

Stroj, na kterém probíhá rázová zkouška pádem, se nazývá padostroj. Stroj funguje na principu rovnoměrně zrychleného pohybu, v tomto případě to je volný pád. Těleso padající z definované výšky má nejčastěji tvar koule nebo polokoule. Nárazová plocha padajícího tělesa je leštěná. Padostroj je opatřen vodícími tyčemi, aby docházelo k dopadu tělesa vždy na stejné místo. Při dopadu tělesa na zkušební vzorek je použita energie tělesa k poškození zkušebního vzorku. Dopadová energie je závislá na počáteční výšce a hmotnosti padajícího tělesa. [26]



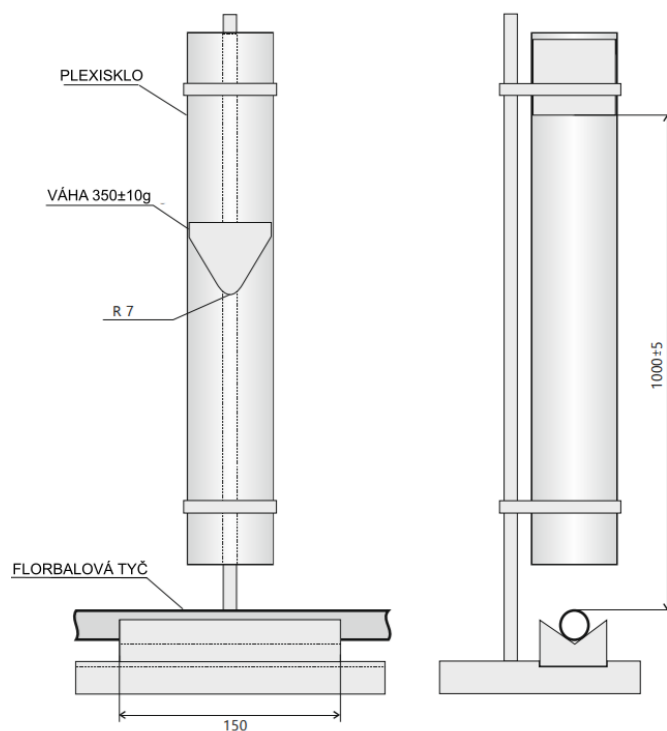
### 4.2.3 Rázová zkouška florbalových holí dle materiálových předpisů SPCR 011

Při rázové zkoušce florbalových holí většinou nedochází k destrukci, ale pouze k testu odolnosti proti nárazové síle. V praxi totiž při hře často dochází k situacím, kdy do sebe hokejky nárazově narazí nebo narazí na jiný předmět (mantinel, tyčka branky, protihráč). V takové situaci by nemělo dojít k destrukci hokejky. Při zkoušce tak může dojít k malému poškození, ale nedojde k úplnému lomu či prasknutí hole.

#### Průběh zkoušky

Zkouška probíhá na padestroji, kde je padajícím předmětem kladivo z kalené oceli o hmotnosti  $350 \pm 10$  g. Hlava kladiva má tvar hranolu s trojúhelníkovým profilem. Podélná osa hranolu je kolmá ke směru pohybu kladiva. Spodní hrana hranolu má tvar půlkruhu s rádiusem 7 mm. Výška pádu je stanovena na  $1000 \pm 5$  mm a musí být zajištěno volné padání kladiva po celou dobu pádu. Držák, do kterého se tyč položí, musí být konstruován do tvaru písmene V o délce 150 mm a vnitřním úhlu  $90^\circ$ . [6]

Zkouška se provádí na dvou místech tyče. První místo je 700 mm od konce florbalové hole a druhé místo je 40 mm od místa uchycení čepele. Florbalová hůl se umístí do držáku tak, aby čepel byla vertikálně a kladivo se pustí z výšky  $1000 \pm 5$  mm. Zkouška se provádí na 3 tyčích. [6]



Obr. 25 Rázová zkouška florbalové hole [6]

## 5 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY A SPORT

Jak již bylo v této diplomové práci naznačeno a uvedeno, není pochyb o tom, že jsou kompozity významnou součástí dnešních sportů. I právě díky nim se sport stává stále populárnější, a jedním z důvodů může být i fakt, že kompozity přinášejí do sportu jakýsi vývoj, který můžeme pozorovat například ve zkvalitňování sportovního vybavení či samotných sportovišť.

Kompozitní materiály jsou tedy v posledních letech stále více využívány ve sportovním průmyslu, protože nabízejí řadu výhod oproti tradičním materiálům jako jsou kovy nebo dřevo. Tyto materiály jsou většinou vyrobeny z více než jednoho typu materiálu, které jsou kombinovány tak, aby výsledný materiál měl optimální vlastnosti pro dané použití.

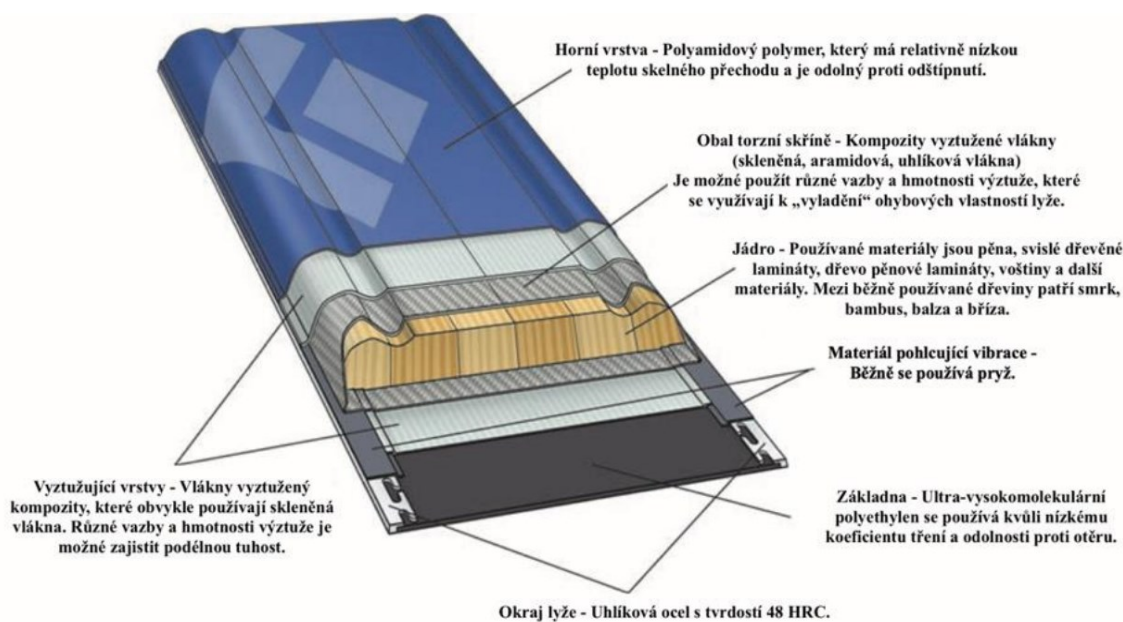
### 5.1 Kompozitní materiály v lyžařství

V lyžařském průmyslu se kompozitní materiály používají na výrobu lyží, hůlek, bot a dalších doplňků. Lyže z kompozitních materiálů mají mnoho výhod oproti lyžím z tradičních materiálů, neboť jsou lehčí, odolnější a mohou mít různé tvary a tvrdosti podle potřeby. Stejně tak lyžařské hůlky z kompozitních materiálů jsou lehčí a pevnější než hůlky z tradičních materiálů. Boty z kompozitních materiálů mají mnoho výhod, jako například lepší pro přenos síly na lyže, mají také vysokou odolnost proti vlhkosti a korozi, navíc mají vysokou odolnost proti nárazům. [27]

V lyžích je nejvíce používaným vláknem – skelné vlákno. Historie skelných vláken v lyžích sahá až do 60. let, kdy byly poprvé použity k jejich výrobě. V té době byla výroba lyží převážně založena na použití dřeva a kovových slitin. Skelná vlákna byla revolučním novým materiálem, který umožnil výrobcům lyží vytvořit lehčí, pevnější a flexibilnější lyže. V dalších letech bylo skelné vlákno jako výztuž čím dál populárnější, ale až v 80. letech se skelná vlákna stala standardním materiálem pro výrobu lyží a výrobci lyží tak používali skelná vlákna jako základ pro všechny své lyže, včetně závodních a freeridových lyží. Skelná vlákna byla stále kombinována s jinými materiály, jako je uhlíkové vlákno nebo aramid, aby se zlepšily jejich vlastnosti. V 90. letech však ztratila na popularitě, protože se zjistilo, že oproti jiným vláknům jsou těžší a méně pevnější. Proto se začalo více používat uhlíkové nebo aramidové vlákno. [27; 28]

Uhlíková vlákna jsou v lyžařském průmyslu v současné době jedním z nejpoužívanějších materiálů pro výrobu lyží. Uhlíková vlákna jsou extrémně pevná, tuhá a lehká, což znamená, že lyže vyrobené z tohoto materiálu nabízejí vysokou úroveň výkonu a přesnosti.

Výhodou uhlíkových vláken je také jejich schopnost být velmi přesně umístěna a orientována během výrobního procesu. To umožňuje výrobcům lyží navrhovat lyže s různými tvary a charakteristikami pro různé disciplíny a úrovně lyžařů. Výhodou uhlíkových vláken je také jejich schopnost absorbovat vibrace, což znamená, že lyže vyrobené z tohoto materiálu jsou velmi stabilní a snadno se ovládají i při velkých rychlostech. Tato vlastnost je velmi důležitá pro závodní lyže, které musí být schopny udržet vysokou rychlost a přesnost i na náročných a nerovných terénech. Hlavní nevýhodou lyží z uhlíkových vláken je především jejich cena. Oproti skelným vláknům jsou uhlíková vlákna dražší a jejich výroba je nákladnější. Z uhlíkových vláken se také v současné době vyrábí boty na lyže, hůlky anebo bezpečnostní prvky jako jsou chrániče či přilby. [27]

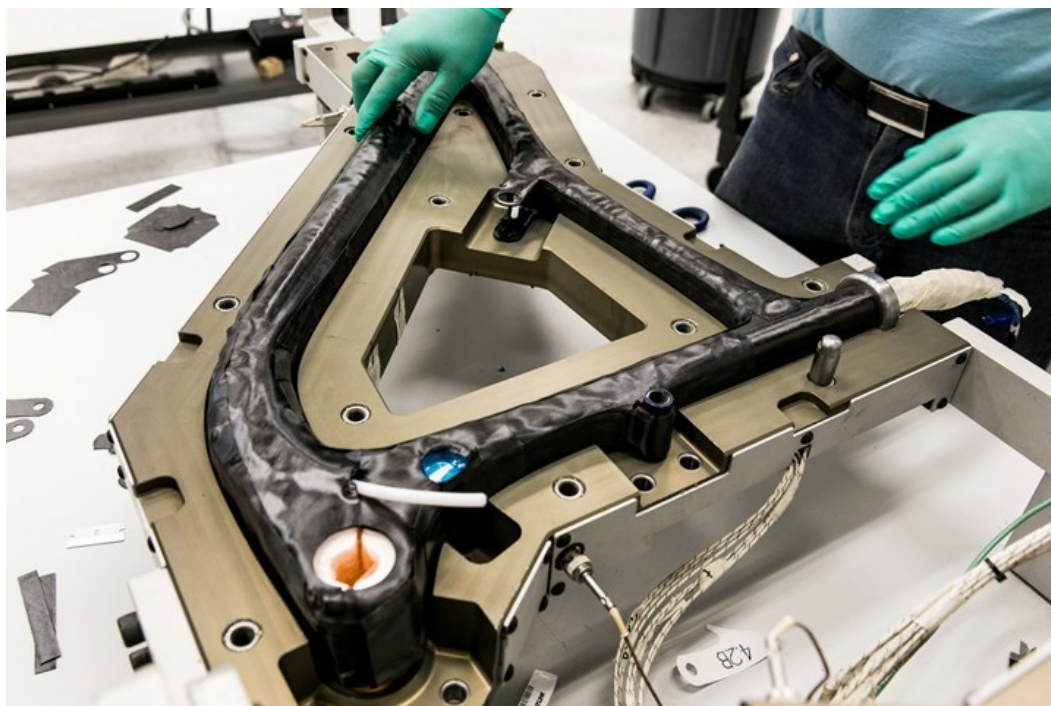


Obr. 26 Řez lyží z kompozitního materiálu [28]

## 5.2 Kompozitní materiály v cyklistice

Cyklistika je sport, který se stává stále populárnějším nejen v profesionálním, ale i v amatérském světě. Kromě jízdního stylu a tréninkového plánu hraje důležitou roli také výběr vhodného kola. Jedním z klíčových faktorů, které určují vlastnosti a kvalitu kola, jsou materiály, ze kterých je vyrobeno. V posledních letech se stále častěji používají kompozitní materiály, které i cyklistice přinášejí mnoho výhod. Jednou z nejvýraznějších výhod je snížení hmotnosti kola, neboť v porovnání s koly vyrobenými z tradičních materiálů, jako jsou hliník nebo ocel, jsou kompozitní kola mnohem lehčí. Toto snížení hmotnosti umožňuje jezdcům snadněji akcelerovat a ovládat kolo, což mnohonásobně zlepšuje jeho výkon. Další výhodou kompozitních materiálů je jejich odolnost. Díky vyšší pevnosti a tuhosti jsou kompozitní kola odolnější proti vnějším vlivům, jako jsou nárazy a vibrace. Navíc jsou kompozitní materiály méně náchylné k vzniku koroze nebo jiných forem opotřebení, což zvyšuje i životnost kola. I když jsou kompozitní materiály výhodné, mají také své nevýhody. Jednou z největších nevýhod je cena. Kola z kompozitních materiálů jsou obvykle mnohem dražší než kola vyrobená z tradičních materiálů, jako je hliník nebo ocel. Navíc jsou křehčí a citlivější na poškození, takže vyžadují pečlivější údržbu a opravy. [29; 30]

Proces výroby cyklistických kol z kompozitních materiálů se skládá z několika kroků a vyžaduje vysokou preciznost a zručnost pracovníků. Je prováděn mnoha způsoby, ale nejčastější postup začíná výrobou dutiny formy pomocí obrábění na CNC stroji, nebo 3D tiskem. Následně jsou prepregy vkládány a vlepujány rovnoměrně do formy, což vyžaduje vysokou preciznost. Poté je pomocí vakua a zvýšené teploty vytvořena pryskyřice a rám kola je vyjmut z formy a připraven k dalším úpravám, jako je broušení, zkrácení a upravení povrchu a tvaru do konečné podoby. Dalším způsobem, jak vyrábět rámy cyklistických kol, je možnost použít předem vyrobených kompozitních trubek a profilů, které se spojí kompozitními spojkami k sobě a vznikne rám. [29]



Obr. 27 Výroba rámu kola z uhlíkových vláken [29]

Celkově je zřejmé, že kompozitní materiály jsou důležitým prvkem v cyklistice a vývoj těchto materiálů se stále zlepšuje. V budoucnu můžeme očekávat ještě větší inovace v oblasti výroby a použití kompozitních materiálů v cyklistice.

### 5.3 Kompozitní materiály v kanoistice

Kanoistika je sport, který zahrnuje různé disciplíny, jako jsou kajakářský slalom, sprintová kanoistika, vodácká turistika a mnoho dalších. V průběhu posledních desetiletí byly v kanoistice provedeny zásadní změny v konstrukci kánoí, které vedly k vylepšení výkonu a zlepšení stability a rychlosti. Jedním z hlavních faktorů, který umožnil tyto inovace, je použití právě kompozitních materiálů. Tyto materiály nabízejí vysokou pevnost, nízkou hmotnost a vynikající odolnost proti poškození, což umožňuje výrobu kánoí s vysokou výkonností a dlouhou životností. Použití kompozitních materiálů v kanoistice má několik výhod. Kompozitní materiály jsou velmi lehké, což umožňuje větší rychlost a snadnější ovládání kánoí, navíc jsou tyto materiály velmi pevné, odolné a mají vynikající vlastnosti v boji s vodou. Tyto vlastnosti jsou zvláště užitečné v soutěžních kanoistických disciplínách. Nevýhodou je, že kompozity jsou často nákladnější a obtížnější na opravy než kánoe z jiných

materiálů, což může být pro amatérské kanoisty značnou překážkou. Navíc se mohou tyto materiály snadněji poškodit, například při nárazu na ostrý předmět. [31]

Nejčastější kompozitové kánoe jsou laminátové. To znamená, že se výroba provádí z několika vrstev. Výroba kompozitních kánoí zahrnuje několik kroků. Prvním krokem je vytvoření formy. Tato forma se obvykle vyrábí z pevných materiálů, jako jsou sklolamináty nebo kov. Poté se připraví vrstvy s vlákny z požadovaného kompozitního materiálu, (skelná, kevlarová nebo aramidová vlákna) a ty se pak ukládají do formy. Vrstvy jsou prosycovány polyesterovou nebo epoxidovou pryskyřicí, která vlákna spojuje a zajišťuje pevnost a tuhost celé konstrukce. Pryskyřice se nanáší postupně ve vrstvách, dokud není dosaženo požadované tloušťky. Po nanesení pryskyřice se vše vytvrdí při určité teplotě, nebo se vloží do chemické lázně, aby se zajistilo, že se materiál spojí a ztvdne. Nakonec se kánoe vyjme z formy a provedou se finální úpravy jako je oříznutí přebytečného materiálu nebo nanášení ochranných nátěrů. Kánoe z kompozitů mohou být vyráběny v mnoha tvarech a velikostech a lze je přizpůsobit požadavkům jednotlivých kanoistů a disciplín. [31]



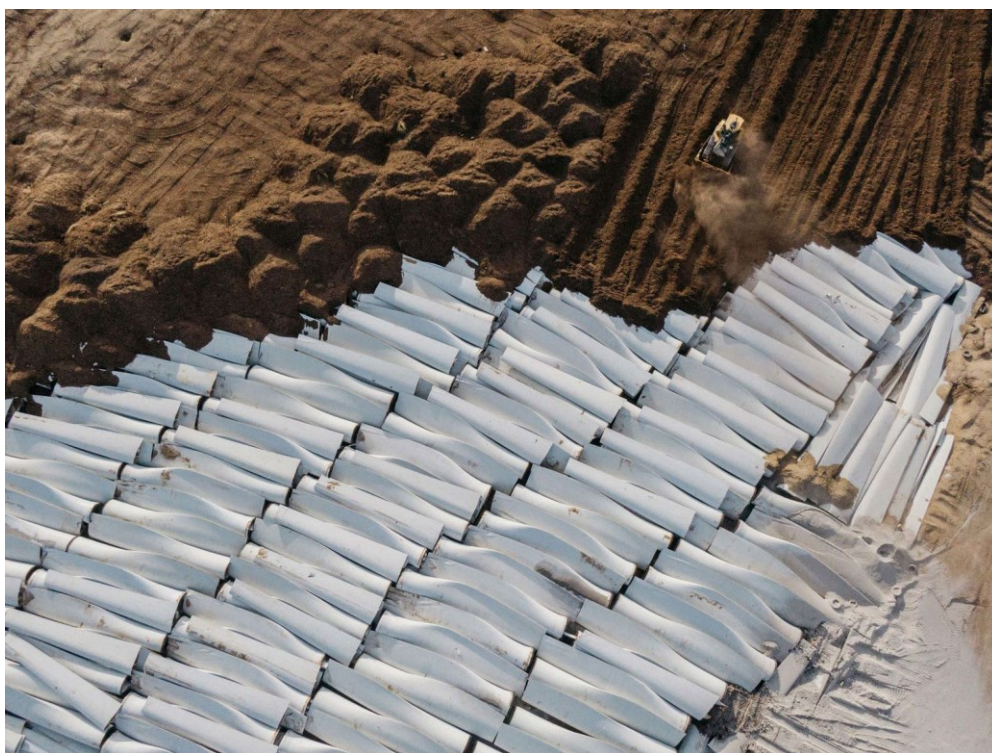
Obr. 28 Vrstvení materiálu do formy na kajak [31]

## 6 RECYKLACE KOMPOZITŮ

Mnoho výrobků a sportovních pomůcek, včetně florbalových holí, vyrobených z kompozitních materiálů jednou doslouží a uživatel je vymění za nové. Tato kapitola je zaměřena na problematiku dnešní doby, kterou je recyklace kompozitů.

Kompozitní materiály se řadí mezi nejlepší a nejužitečnější materiály, díky svým vlastnostem a nízké hmotnosti. Nesmí se ale opomíjet jejich velká úskalí a nevýhody, jež spočívají v jejich zpracování na konci jejich života. Ačkoli je dlouhá životnost jedna z hlavních výhod kompozitů, jednou i tyto materiály doslouží a je třeba si poradit s jejich odpadem. V dnešní době je vnímán větší nárůst odpadu vláknových kompozitů, protože kompozitní díly začínají nevyhovovat a jsou nahrazeny novými. Problémem jsou především velkoplošné díly např. vrtule větrných elektráren nebo díly letadel. Oba typy strojů využívají kompozity vyztužené obzvláště uhlíkovými a skelnými vlákny.

Ačkoliv jsou kompozitní materiály problematické z hlediska jejich separace jednotlivých složek, prozatím neexistuje mnoho technologií, které by si s nimi dokázaly poradit a byly stále ekonomicky výhodné. Možná proto je jednou z oblíbených metod, jak vyřešit problém, skládkování.



Obr. 29 Skládkování listů větrných elektráren [32]

Společnost si zatím neví rady, jak recyklovat velké kompozitní materiály, a proto dochází k jejich skládkování. Na tuto situaci zareagovalo Rakousko, Německo, Finsko a Nizozemsko zákazem skládkování kompozitních materiálů, čímž se snaží podpořit vývoj technologie i legislativní podněty, které by tuto problematiku řešily. Předpokládá se, že další evropské země se k tomuto zákazu přidají, aby byl urychlen vývoj nových recyklačních technologií, kterých je zatím minimum. [10; 32]

Řešením, jak lze zpracovávat velké kompozitní díly a obejít jejich skládkování, je využít jejich potenciál a tvar pro další druhořadé projekty. Přestože tyto materiály již nesplňují nároky leteckého nebo energetického průmyslu, pořád se jedná o kvalitní materiály, které překonávají ty běžně používané. Listy větrných elektráren můžou být například využívány jako přístřešky, lavičky, nebo nosné konstrukce pro lávky. [10; 33]



*Obr. 30 Nosníky lávky z listů větrných elektráren [33]*

## 6.1 Mechanická recyklace

Mechanická recyklace je často používaný postup recyklace u mnoha druhů materiálů. Zatímco u kovů mechanická recyklace funguje velmi dobře, u plastů a kompozitů má značné nedostatky. Mezi tyto nedostatky se řadí degradace během recyklačního cyklu a jeho následné znehodnocení. Takový materiál poté umožňuje pouze sekundární využití recyklátu, u kterého jsou sníženy hodnoty požadovaných vlastností. Jako matrice kompozitů se používají především reaktoplasty, které nejsou ve vytvrzeném stavu znovu tvarovatelné, ani tavitelné a musí být před dalším využitím rozdrceny. Recyklát nemůže být zpracováván pořád dokola. Každé jeho nové použití



zhoršuje vlastnosti, proto je třeba nalézt škálu, kdy na její konci bude využit pouze pro energetické účely. [10; 12]

Nejdříve dochází k hrubému rozdrčení dílů a následně k rozdrčení v kladivovém drtiči. Výstupem je drť s obsahem několika centimetrových svazků vláken, propojených zbytkem rozemleté matrice a matrice ve formě prášku. Tato směs je s novou dávkou pryskyřice znovu použita pro výrobu prepregového recyklátu, ke kterému se přidají nová vlákna a směs vláken z recyklátu. Problémem vzniklého výrobku není jenom jeho menší pevnost než původní, ale také nedostatečná kvalita povrchu. [10]

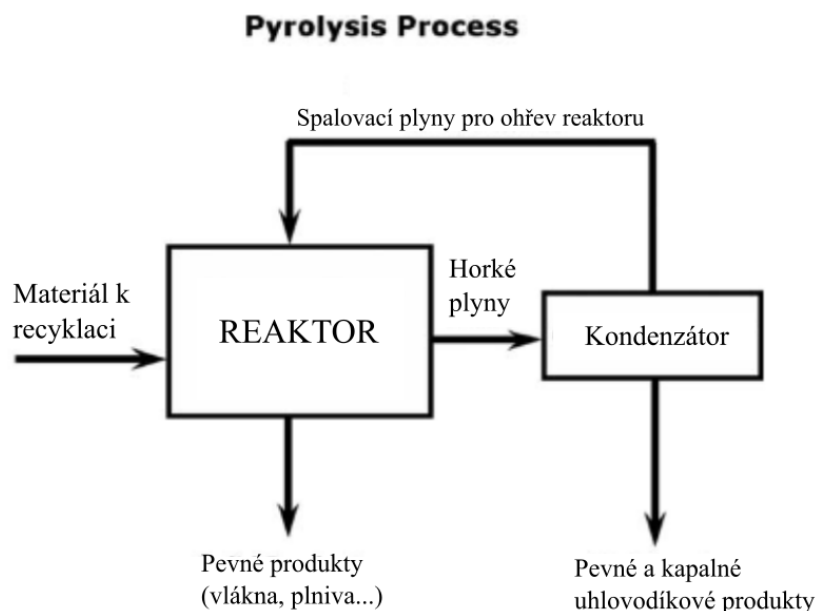
Při zkoumání mechanických vlastností recyklovaných kompozitů z leteckého průmyslu, bylo zjištěno, že u kompozitů, které prošly mechanickou recyklací a byly stlačeny do pelet se mechanické vlastnosti zhoršily o 60 %. Zlepšení mechanických vlastností recyklátu nastane při sjednocení orientace vláken a optimalizací poměrem matrice a vláken. Také bylo při studiích zjištěno, že je možné využít kompozit s kratšími rozemletými vlákny, kdy se použije 8 % uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici. Při takovém poměru nastává zlepšení mechanických vlastností. Směsi nad 8 % vykazují větší tvrdost, ale také větší křehkost. [34; 35]

## 6.2 Termální recyklace

Proces termální recyklace umožňuje znovu použít kompozitní materiál, který by jinak skončil na skládce. Je založen na recyklaci pomocí různých druhů pyrolýzy. Během procesu dochází k řízené degradaci polymerní matrice za vysoké teploty, bez přísunu vzduchu. Při správném řízení termální recyklace dochází k vypálení pryskyřice a zachování zpevňujících vláken pro další použití. Z hlediska mechanických vlastností je tato metoda účinnější než mechanická recyklace, protože jsou získávána delší vlákna než mechanickou cestou. [10]

Hlavním produktem pyrolýzy u plastů je ropa. V některých případech je možné přeměnit až 80 % plastu na ropu. Při termální recyklaci LDPE byla zjištěna až 80,8 % účinnost. Tekutá složka je následně využívána na výrobu paliv nebo petrochemikálií. Dalšími produkty jsou různé plyny a částice. Celá výroba a výstupní produkty vyžadují použití speciálních filtrů a zodpovědné nakládání s toxickým odpadem. [36]

Teplota pro znovuzískání ropy z plastů se pohybuje v rozmezí 450-700 °C. Ta je při termální recyklaci kompozitů z vláken nevyhovující, protože uhlíková vlákna oxidují už asi při 400 °C, pokud nejsou zahřívána v inertní atmosféře. Proto jsou používány katalyzátory, díky kterým se dá snížit teplota na 230-350 °C. [10]



Obr. 31 Proces recyklace pyrolýzou [37]

### 6.3 Chemická recyklace

Tato metoda recyklace je používána k rozkladu polymerní matrice na základní stavební jednotky (monomery), nebo jejich kratší řetězce (oligomery). K rozkladu a rozpuštění matrice jsou používány různé druhy rozpouštědel. Může se jednat o kyseliny, alkalické hydroxidy, enzymy nebo jiná rozpouštědla. Závisí především na druhu matrice a její odolnosti vůči rozpouštědlům. Velkou výhodou proti mechanické recyklaci je možnost znovu použít základních chemických složek v nových výrobních procesech. To snižuje množství odpadu a zdrojovou závislost na nových surovinách. Další výhodou je možnost recyklace takových materiálů, které není vhodné mechanicky recyklovat (např. kompozitní materiály s kovovými částmi). Nevýhodou je vysoká cena a zatím nevyspělost technologie, což ji činí komerčně nedostupnou. [10; 37]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 CÍLE PRÁCE

Tato diplomová práce se zabývá návrhem kompozitní florbalové hole s využitím předimpregnovaných materiálů. Součástí je návrh formy a následná výroba prototypu, na kterém bylo provedeno experimentální testování mechanických vlastností. Vzhledem k chybějícím, komerčně dostupným, informacím byla výroba prototypu prováděna experimentálně. Jednotlivé kroky výroby lze rozepsat do následujících bodů:

- Aktuální přehled využití kompozitních materiálů pro výrobu dutých profilů.
- Volba zpracovatelské technologie výroby.
- Návrh výrobní formy a vytvoření podkladů pro výrobu.
- Výroba dvoudílné formy pomocí CNC frézovacího stroje.
- Výroba prototypu z předimpregnovaného uhlíkového materiálu a vytvrzení pomocí autoklávu.
- Experimentální testování vlastností vyrobených prototypů na základě IFF.
- Vyhodnocení dosažených výsledků.
- Formulace závěru.

## 8 VÝROBA FORMY

Před samotnou výrobou prototypu florbalové hole se bylo potřeba zabývat, jakou zpracovatelskou technologií a postupem bude prototyp vyráběn. Po výběru technologie výroby byly následně stanoveny požadavky na materiál formy. Na základě formy byl nakonec zvolen materiál pro výrobu. Jakmile byla definována technologie a materiál formy, bylo nezbytné vytvořit návrh a dokumentaci formy pro její následnou výrobu.

### 8.1 Volba metody výroby

Vzhledem k chybějícím veřejným informacím o metodách výroby florbalových holí, bylo v prvním kroku provedeno zjištění různých způsobů výroby dutých válcových profilů z kompozitního (předimpregnovaného) materiálu. V druhém kroku bylo provedeno zkoumání komerčně dostupných holí, kde u tvaru a specifických známek výroby (dělicí rovina) lze odhadovat, jakou metodou byla daná hůl vyráběna. U mnoha vzorků, kdy se jednalo o hole z uhlíkových vláken, byla nalezena dělicí rovina. Lze tedy konstatovat, že hůl byla vyrobena za pomoci dvou částí forem. Na základě tohoto zjištění byla zvolena metoda výroby pomocí dvoudílné formy.



*Obr. 32 Dělicí rovina u komerčně dostupné hole*

## 8.2 Volba materiálu formy

Volba materiálu formy je dána především sériovostí a také typem technologie. Pro zvolenou metodu výroby, kdy je forma dvoudílná, lze formu vyrobit za pomoci speciální sádry, pěny, tmelu nebo použitím kompozitu, a to jako negativ vyráběného výrobku. Dalším způsobem je zvolení bloku materiálu a jeho následného obrobení. Jako blokový materiál se využívá např. dural, hliník nebo ocel, ale tyto materiály jsou pro výrobu prototypů velmi drahé. Dále je vhodné pro dvoudílnou formu použít jako blokový materiál epoxidový blok. Pro plánovanou výrobu byly stanoveny tyto požadavky na materiál:

- Dobrá obrobiteľnosť.
- Vysoká rozměrová stabilita.
- Vysoká teplotní odolnost (130 °C).
- Cenová dostupnost pro výrobu prototypu.

Na základě všech aspektů a požadavků byl jako materiál pro výrobu formy zvolen epoxidový blok Renshape BM 5060.

Tab. 4 Vlastnosti zvoleného materiálu formy

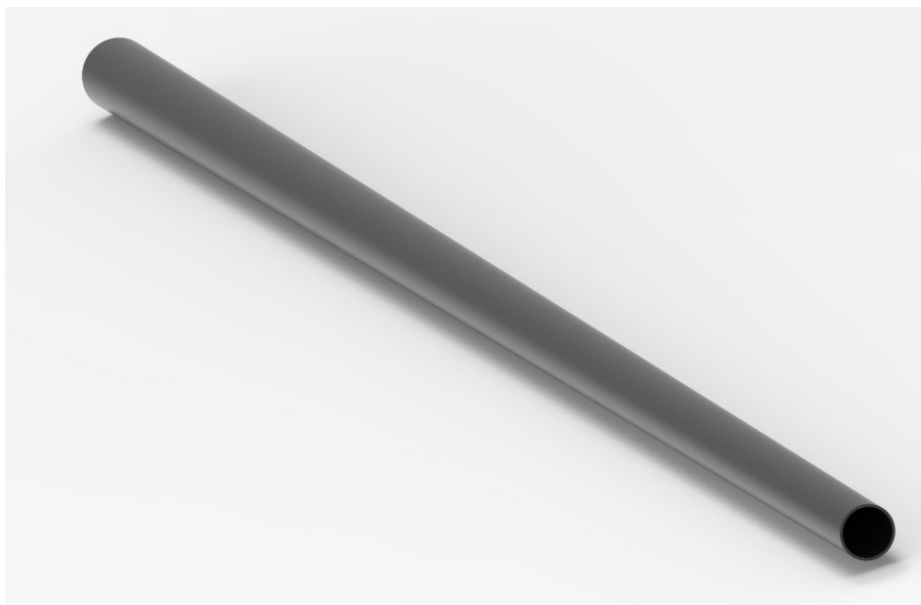
Renshape BM 5060	
Hustota	700-750 kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v tlaku	65-70 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2400-2700 MPa
Pevnost v ohybu	35-40 MPa
Shore tvrdost	70-80 Shore D
Tepelná odolnost	135-140 °C
Rozměr bloku	1524 x 600 x 50 mm

## 8.3 Návrh formy

Samotný výrobek (florbalová hůl) je dutý profil kónického tvaru o délce 1 metr a tloušťce stěny 2 milimetry. Florbalové hole jsou většinou kónického tvaru, a to z důvodu funkčnosti florbalové hole při hře. Užší strana hole je zasunuta do čepele, širší průměr má pak florbalová hůl nahoře – v místech určených pro uchopení hole. Toto zvětšení průměru tak řeší skutečnost, že průměr hole u čepele by byl pro pohodlné

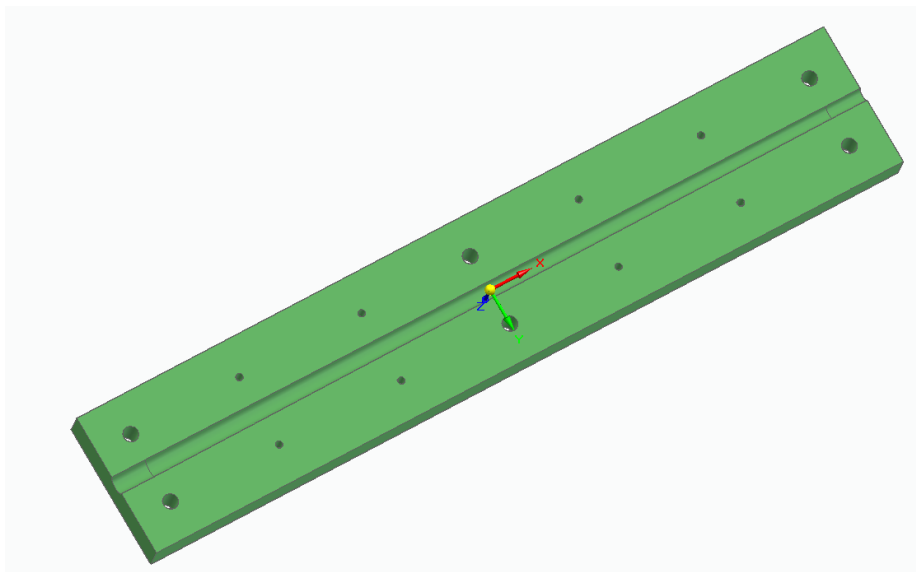
uchopení příliš malý, proto se průměr hole směrem k držení hole hráčem zvětšuje a florbalová hůl má kónický tvar.

V užší části byl navrhnout průměr 18 mm a na druhém širším konci hole průměr 25 mm. Návrh modelu byl proveden programem Solid Edge.



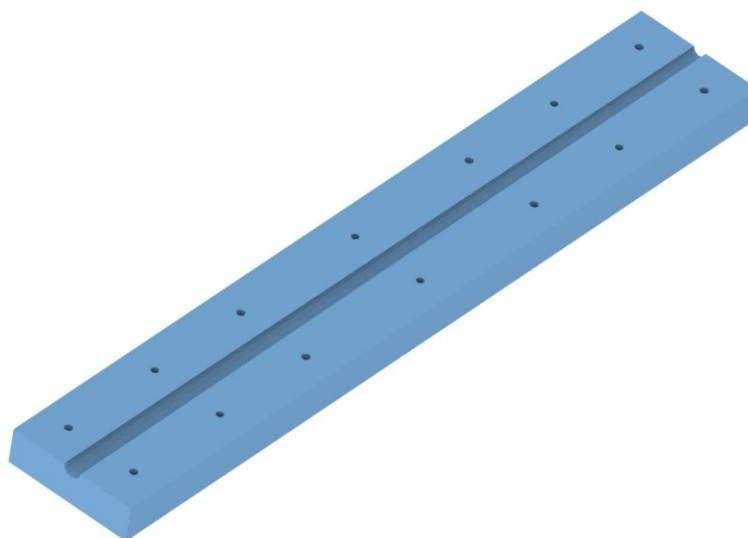
*Obr. 33 Navržená florbalová hůl*

V návaznosti na výsledný tvar výrobku, bylo navrženo řešení dvoudílné formy. Ve formě byla navržena dutina odpovídající polovině florbalové hole tak, aby po dosednutí obou dílů formy na sebe, dutina vytvořila tvar odpovídající vnější části florbalové hole. Dále bylo navrženo 8 děr o průměru 10H8 do každé části formy pro vodící kolíky, které by měly zajistit pozici obou částí forem. Děr pro šrouby M20 x 80 mm pro následné pevné spojení dvou dílů formy bylo navrženo 6. Celkový rozměr formy byl navržen na rozměry 1100 x 200 x 50 mm.



*Obr. 34 První návrh formy pro výrobu florbalové hole*

Po odborné konzultaci byl návrh formy upraven. Upraveny byly především počty a rozmístění děr pro šrouby a vodící kolíky. Díry pro kolíky byly prodlouženy přes celou šířku formy, a to z důvodu lepší demontáže. Dále byly zvoleny jiné šrouby, a to o velikosti M10. Následně byla upravena i šířka celé formy z původních 200 mm na 180 mm. Po těchto modelových úpravách již bylo možné zahájit samotnou výrobu formy.

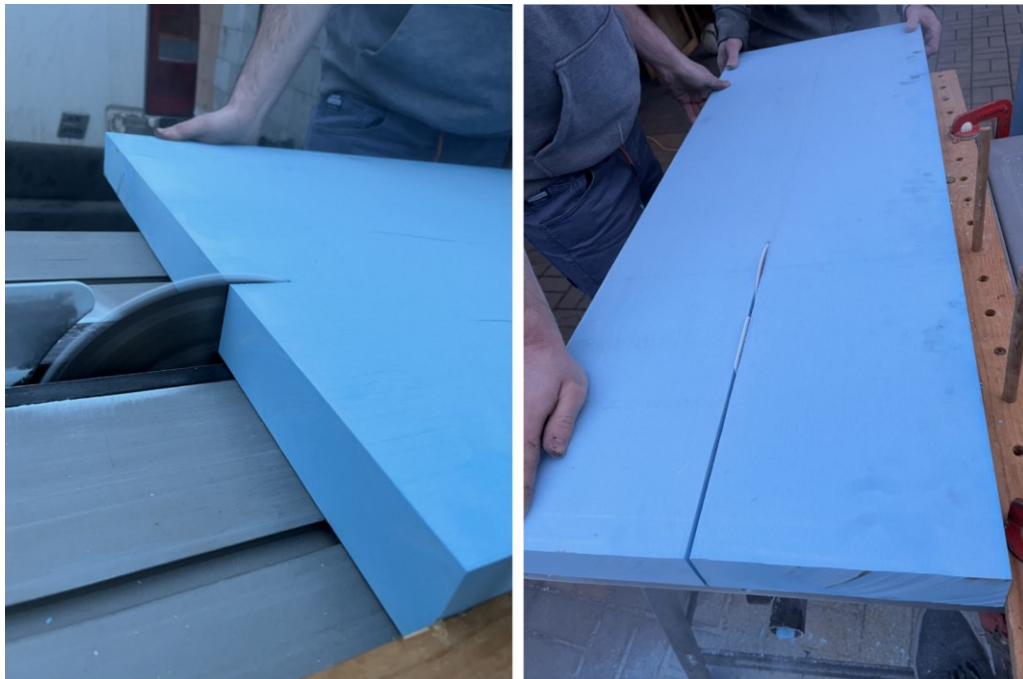


*Obr. 35 Druhý návrh formy pro výrobu florbalové hole*



## 8.4 Výroba formy

Po konečném návrhu byla před samotnou výrobou vytvořena výkresová dokumentace formy. Prvním krokem výroby bylo rozřezání epoxidového bloku. Původní rozměr bloku byl 1524 x 600 x 50 mm. Z tohoto rozměru bylo zapotřebí nařezat dva menší bloky (sloužící jako polotovary pro následné obrábění) o rozměrech 205 x 1105 x 50 mm. Z důvodu velké délky bloku, bylo obtížné sehnat pásovou pilu, proto bylo řezání bloku provedeno na stolní kotoučové pile.



*Obr. 36 Řezání bloku na kotoučové pile*

Po nařezání bloku na rozměr polotovaru formy, proběhnul jeho transport do firmy JAPA Vsetín, která se zabývá kovoobráběním. Firma disponuje několika CNC frézovacími stroji, na kterých bylo možné formu obrobít. Firmě byl dodán polotovar včetně výkresové dokumentace a požadavků na výsledný výrobek. Požadavky byly následující:

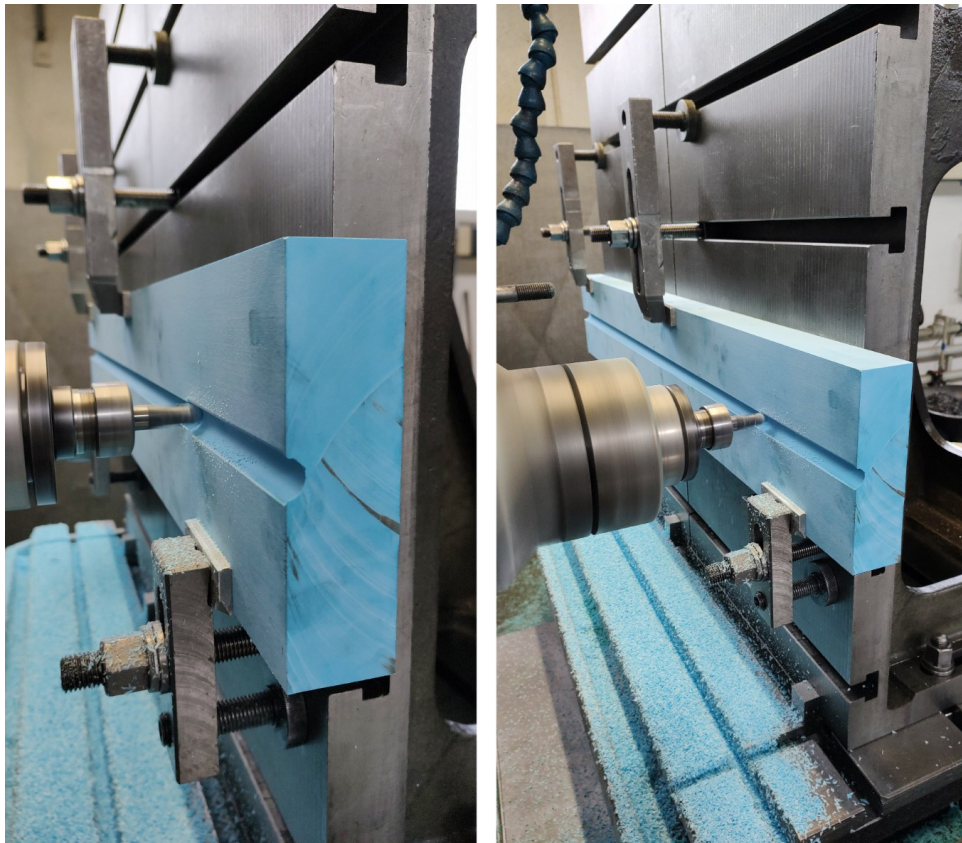
- Obrobít materiál dle modelu a výkresové dokumentace.
- V dutině formy použít co nejmenší krok úběru materiálu, pro co nejlepší povrch.
- Díry pro kolíky v toleranci H8.

Prvním krokem výroby bylo upnutí materiálu na stroj a vycentrování do pozice vhodné pro první obrábění. Úhlování bylo prováděno čelní frézou s osmi břity o průměru 60 mm. První obráběnou stranou byly boky formy, které byly zarovnány a obrobeny na rozměr dle předložené výkresové dokumentace.



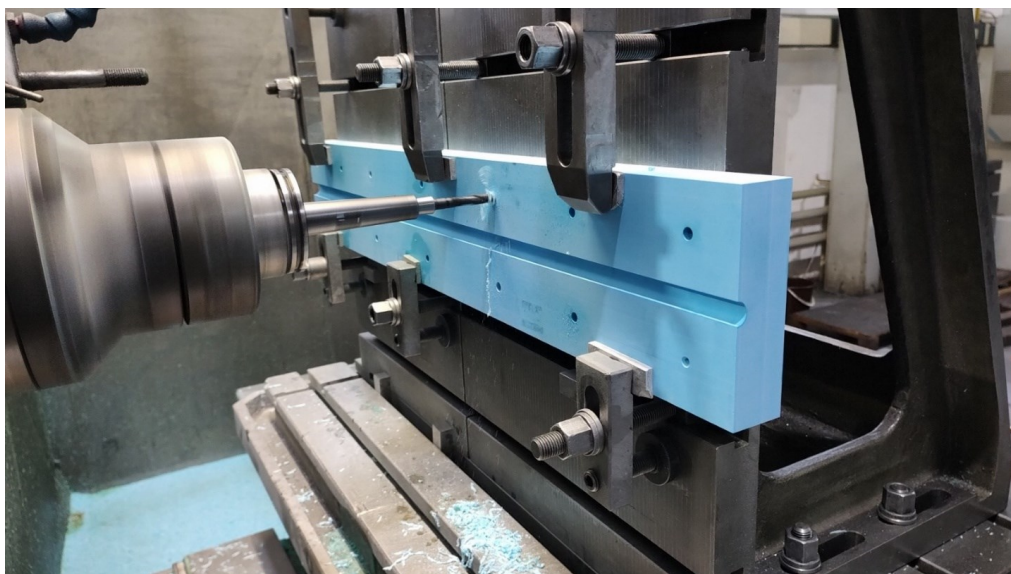
*Obr. 37 Obrobený bok upnutého bloku na CNC frézovacím stroji*

Dále se blok přeupnul do horizontální polohy, aby se mohlo pokračovat v obrábění dutiny. Obrábění dutiny zabralo nejdelší čas, a to především z důvodu malého kroku úběru materiálu. Bylo důležité, aby obráběný povrch dutiny dosahoval co nejlepší kvality, jelikož kvalita povrchu dutiny formy má velký vliv na výslednou kvalitu povrchu výrobku (florbalové hole). Jako nástroj byla zvolena monolitní kulová fréza o průměru 15 mm.



*Obr. 38 Obrábění dutiny formy na CNC frézovacím stroji*

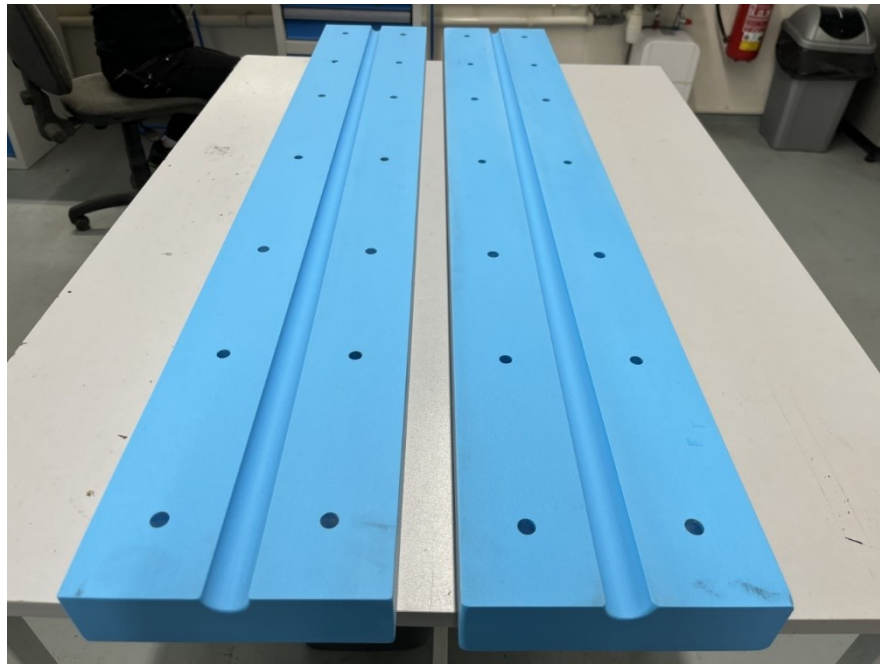
Následně proběhlo vrtání osmi děr  $\varnothing 11$  mm pro šrouby M10, jak bylo předloženo ve výkresové dokumentaci. Posledním krokem bylo vrtání a vystružování děr pro kolíky o průměru 10H8 do hloubky 35 mm. Nejdříve bylo provedeno předvrtání díry  $\varnothing 9,8$  mm a následně byl použit výstružník o průměru 10H8. Pro snadnější demontáž kolíků byly díry prodlouženy dírou  $\varnothing 5$  mm přes celou hloubku formy. V případě absence této díry by bylo obtížné kolík demontovat z formy, protože kolík, kterým se díra osadí, bude mít rozměr  $\varnothing 10h8$ . To znamená uložení s mírným přesahem, proto je potřeba v případě demontáže kolík vyklepat.



*Obr. 39 Vrtání děr pro vodící kolíky*

## 8.5 Separace formy

Před samotnou výrobou prototypu bylo potřeba dutinu formy nejdříve vybrousit a řádně naseparovat. Nejdříve bylo provedeno očištění povrchu od všech nečistot a mastnot vzniklých obráběním za pomoci přípravku Chemlease Mould Cleaner EZ. Následovala aplikace primeru Chemlease MPP 712 EZ, který připravuje povrch pro nanášení následných složek separačního systému. Primer byl aplikován způsobem nanášení a utření a byl proveden 2x s rozestupem 30 min. V dalším kroku byl aplikován plnič pórů Chemlease 15 Sealer, který zaplňuje mikro dutiny a redukuje porozitu povrchu. Aplikace byla provedena 2x s 15-ti minutovým rozestupem za použití měkké utěrky. Následovalo nanášení separátoru Chemlease PMR EZ, díky kterému byl na povrchu vytvořen neviditelný film, který odděluje funkční plochu od výrobku, a tím zabraňuje jeho přilepení k formě. K nanášení byl použit měkký hadřík a celý proces byl proveden 4x. Po každé aplikaci byla časová mezera 15 minut a po ukončení celého procesu 30 minut.



*Obr. 40 Vybroušená a naseparovaná forma*



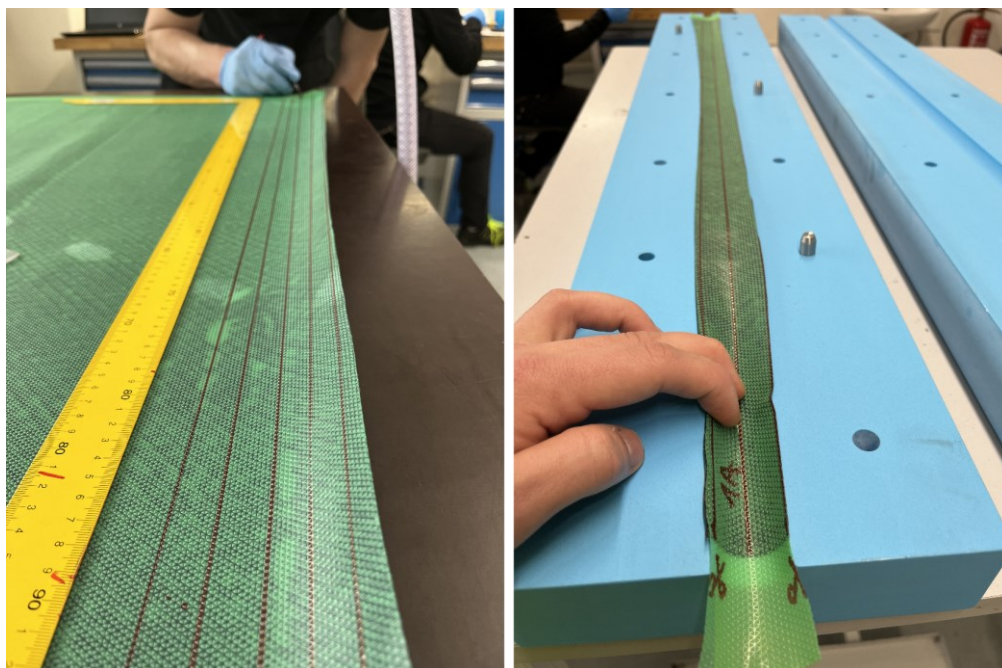
*Obr. 41 Použité prostředky k separaci formy*

## 9 VÝROBA PROTOTYPU HOKEJKY

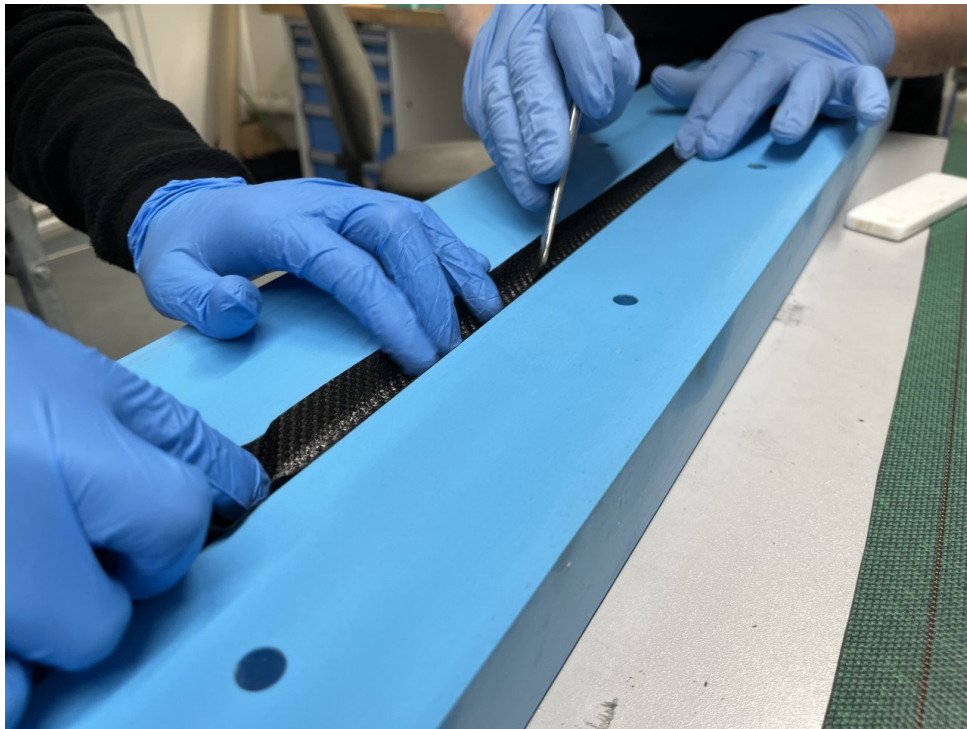
Zvolená výrobní metoda dělené formy měla již dopředu několik nejasných faktorů, které by mohly komplikovat samotnou výrobu. Jednalo se především o to, jak spojit oba díly formy dohromady, aby se prepreg nedostal mimo dutinu. Dalším úkolem bylo vymyslet způsob, jakým dostaneme fóliový rukáv dovnitř dutiny a jak vymyslet podporu prepregu uvnitř dutiny při spojování obou dílů formy.

### 9.1 Výroba prvního prototypu

Po provedené separaci formy byl nastříhán prepreg dle naměřených rozměrů z dutiny formy. Do každé dutiny byly nastříhány 3 vrstvy s tím rozdílem, že v jedné dutině docházelo k přesahu každé vrstvy (nástřih každé vrstvy se zvětšil o 5 mm) a v druhé dutině docházelo k negativnímu přesahu (nástřih každé vrstvy se zmenšil o 5 mm). Tím mělo dojít k vytvoření pevného spoje po zaformování a vytvrzení hole. Následovalo samotné kladení prepregu po jednotlivých vrstvách do dutin formy. Z důvodu kónického tvaru a úzké dutině vyžadovalo kladení precizní práci.

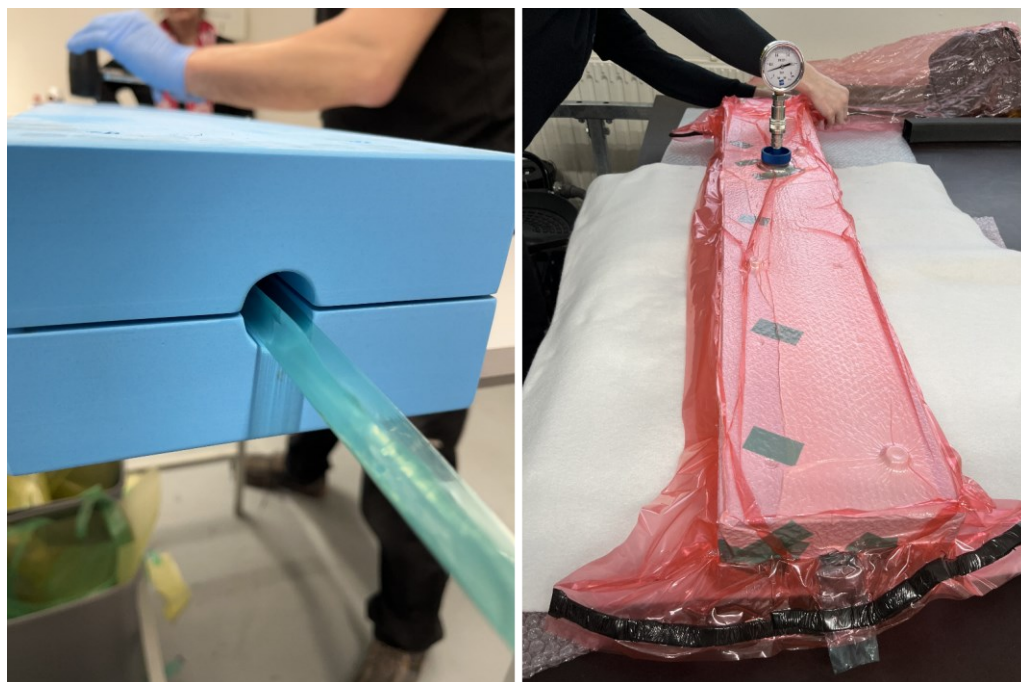


Obr. 42 Nástřihový plán – zkouška správnosti nástřihu v dutině formy



*Obr. 43 Kladení prepregu*

Po vklepení všech vrstev bylo potřeba vyřešit problém s vnitřním rukávem uvnitř dutiny. Nejlepší variantou bylo vložení hliníkového trubkového profilu o průměru 18 mm, který se vleze dovnitř celé dutiny. Vnitřní částí profilu byl protažen rukáv pro vakuování. Předpokladem bylo, že se tyč vytáhne po zaformování formy a rukáv zůstane uvnitř, ale z důvodu velké lepidlosti prepregu na trubkový profil se musel vytáhnout již před zaformováním. To značně zkomplikovalo proces zaformování, ale i přesto se nakonec formu podařilo uzavřít. Pokračovalo sešroubování formy šrouby a následné zabalení formy do odsávací textilie. Byl připraven rukáv z vakuovací fólie a konce byly opevněny vakuovací utěšňovací páskou. Na vrchní část byl umístěn ventil a celá forma se zavakuovala. Důležité bylo, aby se vnitřní rukáv správně při vakuování rozprostřel v dutině.



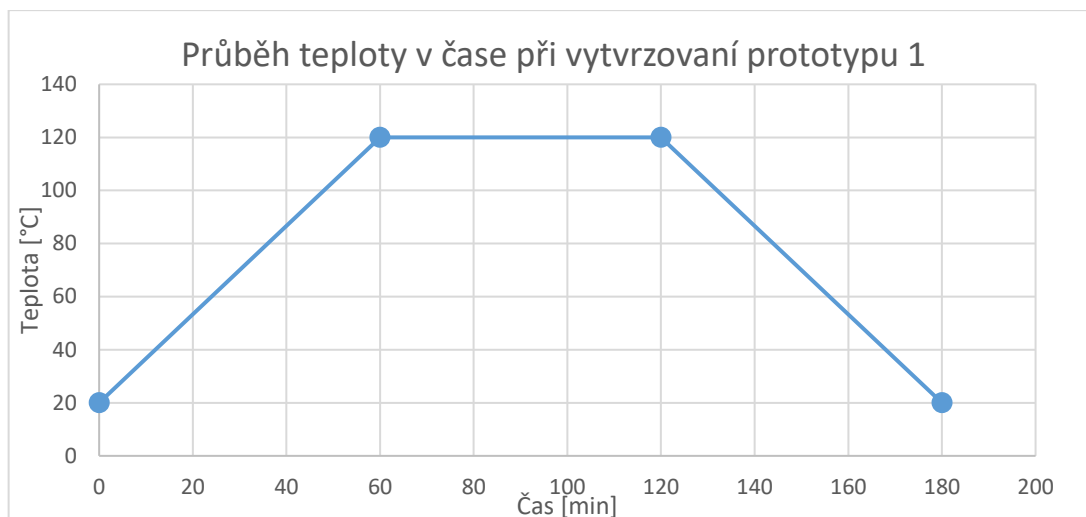
*Obr. 44 Zaformovaná forma, provedená vakuace formy*

Zavakuovaná forma se poté vložila do autoklávu, kde byl zvolen program vytvrzování (viz. Tab.5). Program se skládal ze 3 časových kroků s lineárním tlakem a proměnlivou teplotou v jednotlivých krocích. Teplota byla zvolena nižší vzhledem k teplotním limitům formy a předchozí odborné konzultaci, kdy by mohlo vyšší teplotou dojít k trvalé deformaci formy a velkým odchylkám výrobku.

*Tab. 5 Vytvrzovací program autoklávu pro prototyp 1*

	<b>Krok 0</b>	<b>Krok 1</b>	<b>Krok 2</b>	<b>Krok 3</b>
<b>Čas kroku [min]</b>	0	60	60	60
<b>Teplota [°C]</b>	20	120	120	20
<b>Tlak [bar]</b>	4	4	4	4
<b>Vakuum [bar]</b>	-1	-1	-1	-1
<b>Celkový čas [min]</b>	0	60	120	180





Obr. 45 Průběh teploty v čase vytvrzování – prototyp 1

Po provedení procesu vytvrzování došlo k vytažení formy z autoklávu a odformování výrobku z formy. Po odformování výrobku bylo zjištěno, že prototyp není na všech místech dostatečně vytvrzený a některá místa výrobku obsahovala navíc defekt v podobě nedotečení a nevytvrzení pryskyřice. Výrobek přesto držel tvar i pevnost, ovšem povrch hole byl těmito defekty značně ovlivněn.



Obr. 46 Odformování po procesu vytvrzování v autoklávu

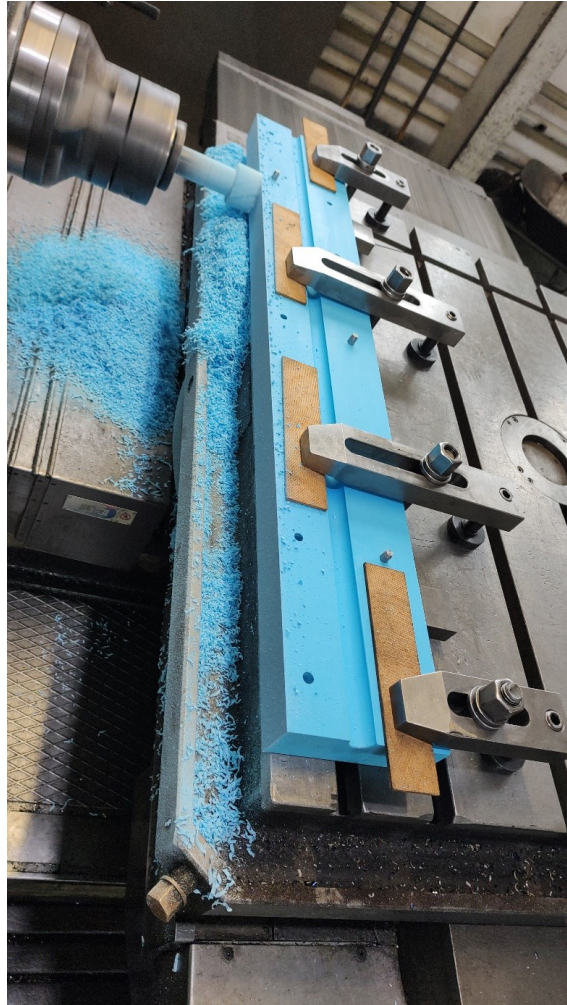


*Obr. 47 Defekty na výrobku*

## 9.2 Výroba druhého prototypu

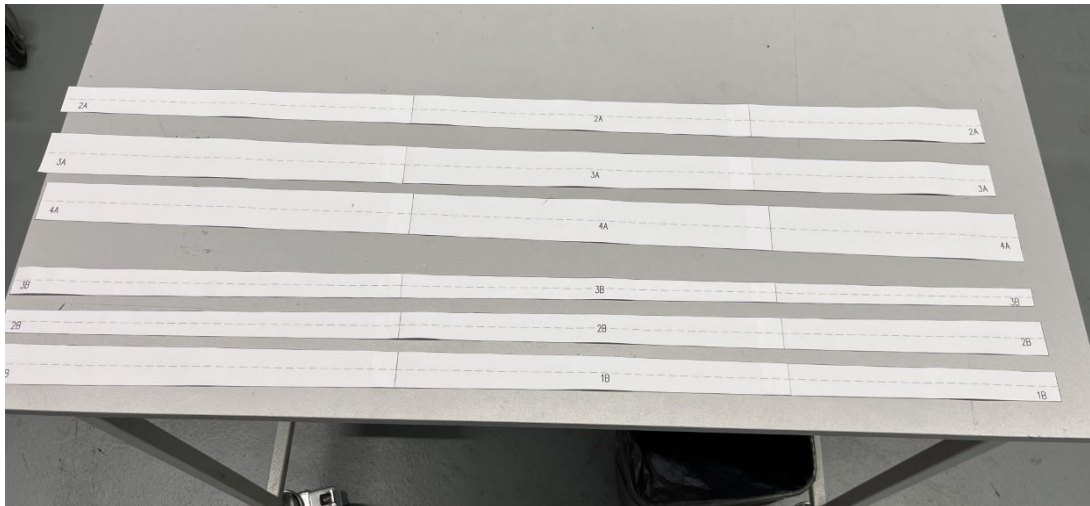
Po vizuální analýze prvního vyrobeného prototypu bylo zřejmé, že je potřeba udělat několik změn v procesu výroby. Problém nedostatečně vytvrzené pryskyřice v některých místech výrobku, mohl být způsoben tlustou stěnou formy, kdy se forma špatně temperovala a v dutině tak nebyla dosažena potřebná teplota k vytvrzení. Defektová místa, kde došlo k nedotečení pryskyřice, byla nejspíše způsobena předčasným pootevřením formy, kdy se nevytvrzená pryskyřice pravděpodobně vytlačila do dělicí roviny. Tomu odpovídá i oválný tvar na kraji výrobku s větším průměrem.

Na základě těchto zjištění, byla provedena reflexe, která se projevila navržením vhodných změn, které by eliminovaly výše zmíněné problémy. Na problém týkající se nedostatečně vytvrzené pryskyřice, bylo navrženo řešení zmenšení některých rozměrů formy. Změna rozměrů byla navržena tedy tak, aby nedošlo k zásahu do délky a dutiny formy. Nově navržený rozměr jedné poloviny formy byl tedy 1100 x 140 x 40 mm. Forma byla opět transportována do firmy JAPA Vsetín, která požadovanou úpravu provedla na frézovacím stroji.

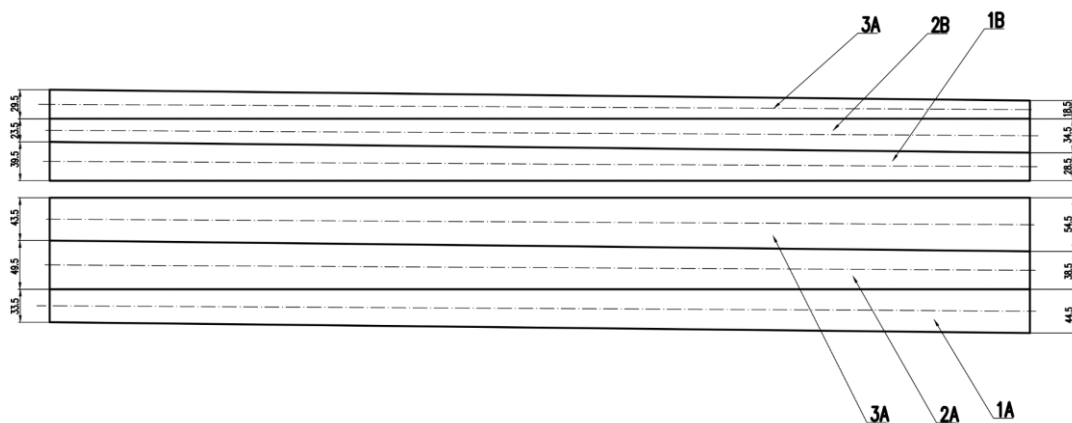


*Obr. 48 Úprava rozměrů formy na CNC frézce*

Úprava rozměrů se prováděla čelní frézou s osmi břity o průměru 60 mm. Po úpravě a převozu formy do firmy C. S. O. spol. s r.o. se provedla separace formy pomocí separátoru Chemlease PMR EZ. Forma byla poté připravena k výrobě dalšího prototypu. Na základě rozměrů z 3D modelu byly nově vytvořeny šablony pro nástřih prepregu. Při prvním pokusu se odměřovaly rozměry přímo na formě a nástřihy nebyly dostatečně přesné. Zapojení nových šablon by tak mělo usnadnit a ulehčit práci při nástřihu prepregu.

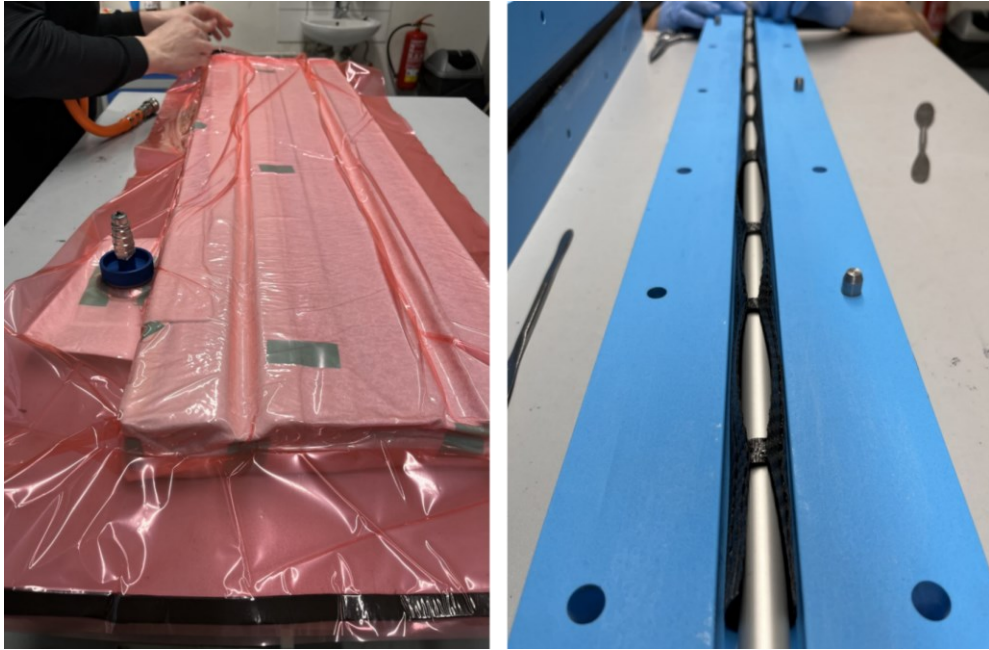


Obr. 49 Nástřihové šablony



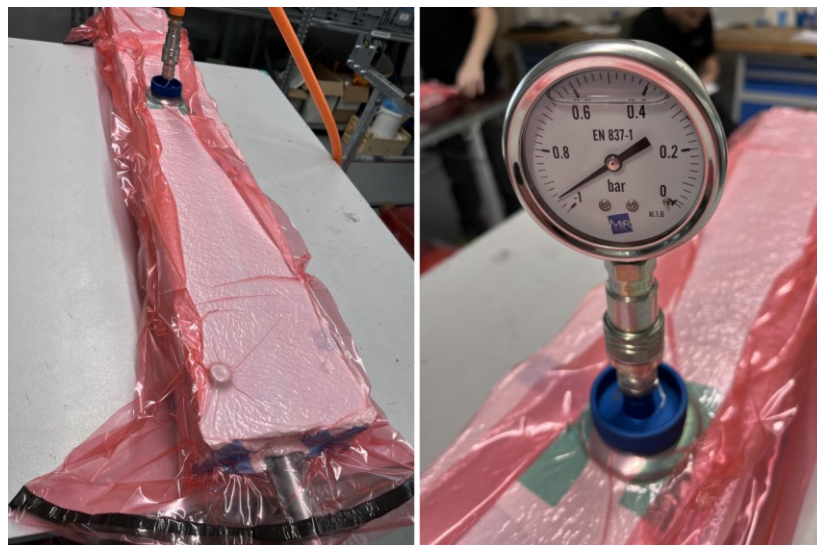
Obr. 50 Výkres nástřihového plánu

Proces kladení prepregu do formy byl stejný jako při prvním pokusu. Změnou bylo akorát zavakuování (vacuum debulking) obou částí formy po vložení první vrstvy. Důvodem bylo především docílení lepší manipulace při kladení dalších vrstev, ale také to, aby „povrchová“ vrstva výrobku byla co nejlépe vložena a vytvrzena. Další změnou bylo řádné naseparování hliníkové tyče, která se poté tolik nepřilepovala, k již naskládaným vrstvám prepregu a zároveň mohla sloužit jako podpora pro prepreg při zavírání formy. Aby došlo ke správnému zavření formy a nedocházelo k přivření přesahu prepregu v dělicí rovině, byly ustřižnuty malé části prepregu, které spojily obě přesahující strany.



Obr. 51 Vakuace první vrstvy (vlevo), pásky a hliníková podpěra (vpravo)

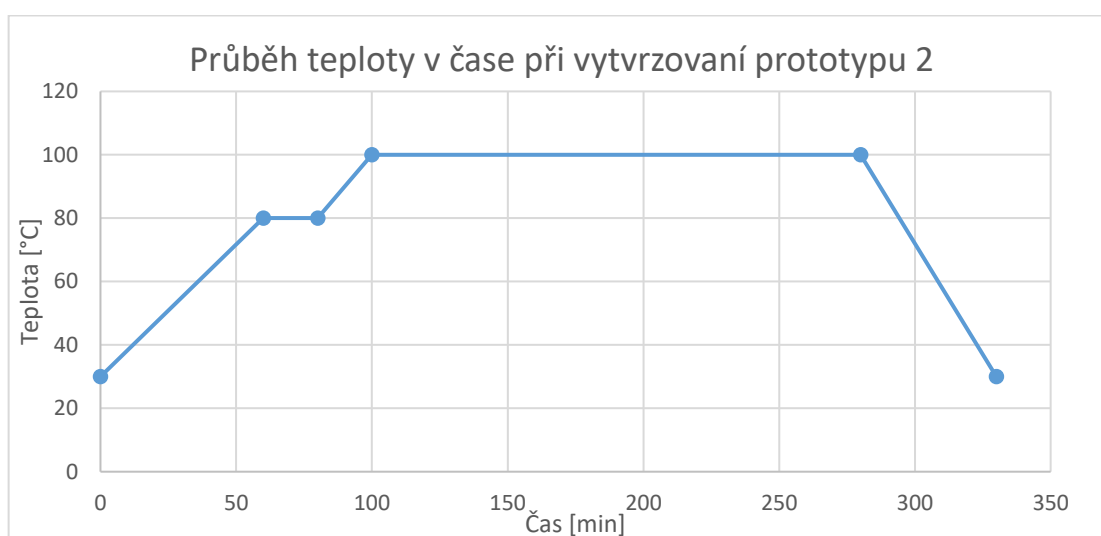
Po úspěšném vlepení všech vrstev a zavření formy proběhla opět příprava pro proces vakuace. Forma se pevně sešroubovala, byla zabalena do separační tkaniny a vložena do rukávu z vakuovací fólie, který byl utěsněn těsnící páskou. Na vrchní stranu formy byl umístěn ventil. Z dutiny byla vytažena hliníková tyč tak, aby v dutině zůstal vnitřní rukáv. Následně mohla proběhnout vakuace celé sestavy. Jako první proběhla kontrola těsnosti, zda sestava drží tlak. Poté byla forma vložena do autoklávu. Program vytvrzování byl upraven, čas vytvrzování se prodloužil na 330 min. Tlak v autoklávu byl konstantní a teplota se měnila v jednotlivých krocích. (Viz. Tab. 6)



Obr. 52 Vakuace formy a kontrola tlaku

Tab. 6 Vytvrzovací program autoklávu pro prototyp 2

	Krok 0	Krok 1	Krok 2	Krok 3	Krok 4	Krok 5
Čas kroku [min]	0	60	20	20	180	50
Teplota [°C]	30	80	80	100	100	30
Tlak [bar]	0	5	5	5	5	5
Vakuum [bar]	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	0
Celkový čas [min]	0	60	80	100	280	330



Obr. 53 Průběh teploty v čase vytvrzování – prototyp 2

Jakmile proběhl program vytvrzování v autoklávu, byla forma vytažena a odformována. Na výsledku bylo již na první pohled znatelné, že provedené změny na formě a změna vytvrzovacího programu měly vliv na výslednou kvalitu vyrobeného prototypu. Povrch měl lepší kvalitu a defekty, které se vyskytly při výrobě prvního prototypu, téměř zmizely.



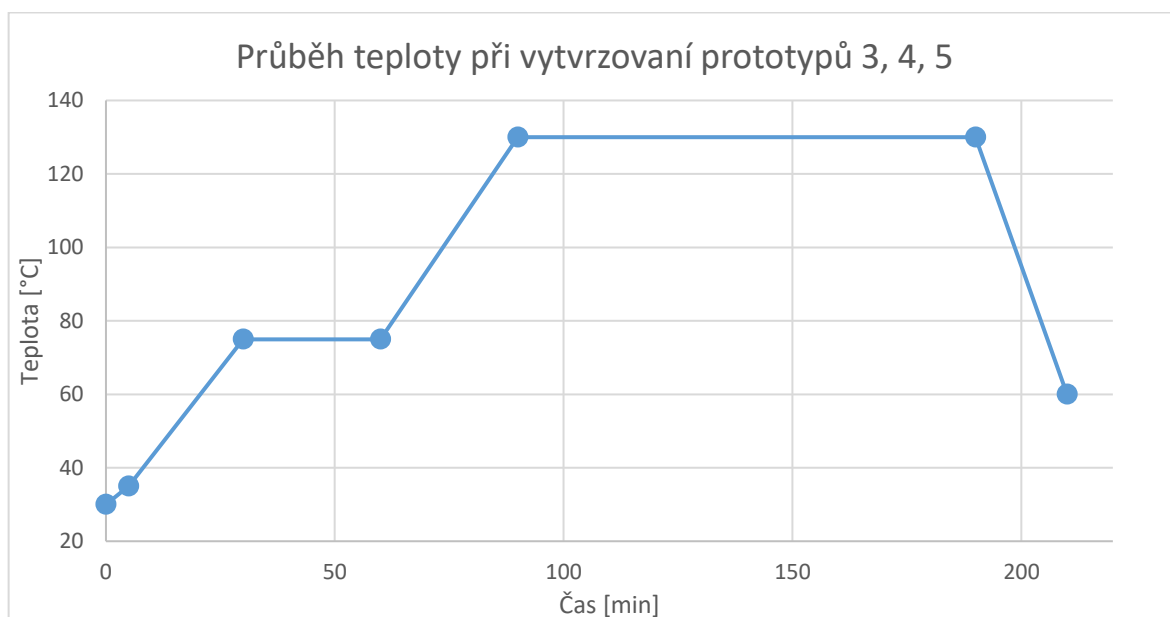
Obr. 54 Druhý vyrobený prototyp

### 9.3 Výroba třetího a čtvrtého prototypu

Na základě pozitivního výsledku z výroby druhého prototypu se postup a proces výroby dalších prototypů nezměnil. Nebylo potřeba provádět další změny výroby, ale bylo nezbytné vyzkoušet, zda dané změny (provedené po výrobě prvního prototypu) budou fungovat i u další výroby. Celý postup výroby třetího a čtvrtého prototypu proběhl stejně jako u výroby druhého prototypu. U pátého prototypu byla provedena změna, kdy se dvě vrstvy prepregu nastříhaly pod úhlem 45°. Vrstvy byly poté v pořadí 45°, 90°, 45°. Další malá změna byla v podobě vytvrzovacího programu v autoklávu. Čas vytvrzování se zkrátil na 210 minut a teplota byla v některých krocích procesu zvýšena na 130 °C. Taktéž tlak nebyl konstantní, ale v jednotlivých krocích se měnil. (Viz. Tab. 7)

Tab. 7 Vytvrzovací program autoklávu pro prototypy 3, 4, 5

	Krok 0	Krok 1	Krok 2	Krok 3	Krok 4	Krok 5	Krok 6
Čas kroku [min]	0	5	25	30	30	100	20
Teplota [°C]	30	35	75	75	130	130	60
Tlak [bar]	0	2	2	6	6	6	0
Vakuum [bar]	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Celkový čas [min]	0	5	30	60	90	190	210



Obr. 55 Průběh teploty v čase vytvrzování – prototyp 3, 4, 5

## 10 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ PROTOTYPŮ DLE SPCR 011

Dle materiálových předpisů SPCR 011 daných mezinárodní florbalovou federací IFF musí mít všechny hole používané ke hře florbal certifikaci, která byla udělena na základě splněných mechanických testů popsanych v materiálových předpisech SPCR 011. V této normě se nejedná pouze o florbalové hole, ale o veškeré vybavení, které je používáno ve florbale (míč, čepel hokejky, mantinel, vybavení brankáře, branka). Veškeré vybavení musí podléhat zmíněné certifikaci IFF. Jak již bylo řečeno a popsáno v teoretické části, florbalové hole se testují ohybovou a rázovou zkouškou. [6]

### 10.1 Zkouška prototypů na ohyb

Podle předpisu mezinárodní florbalové federace má zkouška hokejky na tříbodový ohyb probíhat na univerzálním zkušebním stroji s rychlostí během zkoušky 200 mm/min. Pro florbalové hole o délce 650–849 mm je zapotřebí mít podpory vzdáleny 600 mm a pro hole o délce větší než 850 mm je vzdálenost podpor 800 mm. [6]

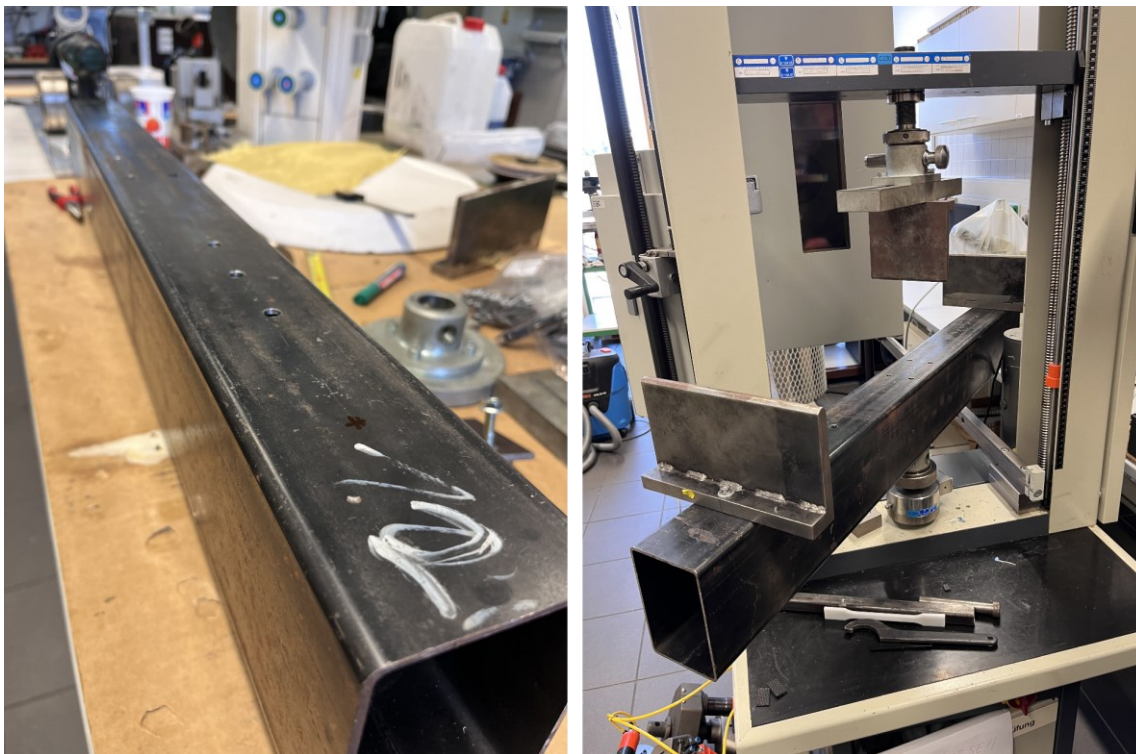
Pro zkoušení vyrobených prototypů byl zvolen zkušební stroj Zwick/Roell 1456 používaný pro určení materiálových vlastností při statických zatíženích v tahu, tlaku a ohybu.

*Tab. 8 Technické údaje univerzálního testovacího stroje Zwick 1456*

Univerzální zkušební stroj Zwick/Roell 1456	
<b>Maximální posuv příčnicku</b>	800 mm/min
<b>Snímače síly</b>	2,5 a 20 kN
<b>Teplotní komora</b>	-80 / +250 °C
<b>Určení stroje</b>	Tah / Ohyb / Tlak
<b>Testovací software</b>	TestXpert II

Pro výrobky o větší délce se na stroji využívá nosník, do kterého jsou připevněny podpory. Vzhledem k absenci děr pro vzdálenost podpor v délce 800 mm bylo nutné nosník upravit a tyto díry přidat. Po vyvrtání nových děr byly podpory přišroubovány k nosníku a celý nosník se ukotvil do měřicího stroje.





*Obr. 56 Úprava nosníku a uložení nosníku s podporami do zkušebního stroje*

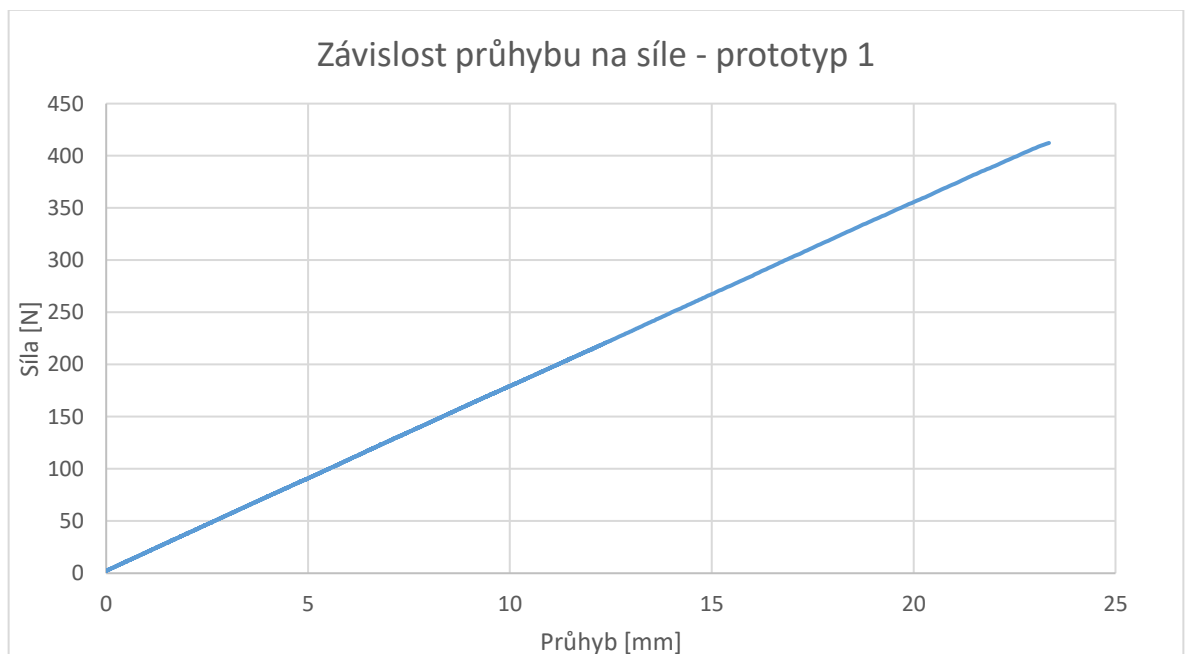
Podle předpisu IFF by měl zkušební stroj obsahovat podpory, které mají rádius  $15 \pm 5$  mm a třetí (zatěžující) bod by měl mít podobu válce s průměrem  $35 \pm 10$  mm. Vzhledem k absenci podpor předpisových rozměrů, byly využity univerzální rozměry podpor. Rozměry podpor zásadně neovlivňují výslednou pevnost v ohybu. Na stroji byla nastavena maximální deformace 60 mm a rychlost zatěžování 200 mm/min, tak jak je definováno v materiálovém předpisu IFF. [6]

### **10.1.1 Zkouška na ohyb prvního prototypu**

Po veškerých provedených přípravách byl testován první vyrobený prototyp. Prototyp byl vložen do testovacího stroje, který působil postupně na vzorek silou. Maximální hodnota působené síly byla 412 N, než došlo ke zlomení prototypu. Maximální deformace při zatížení touto silou byla 23,4 mm.



Obr. 57 Prototyp v průběhu zkoušky



Obr. 58 Graf průběhu zkoušky tříbodovým ohybem – prototyp 1

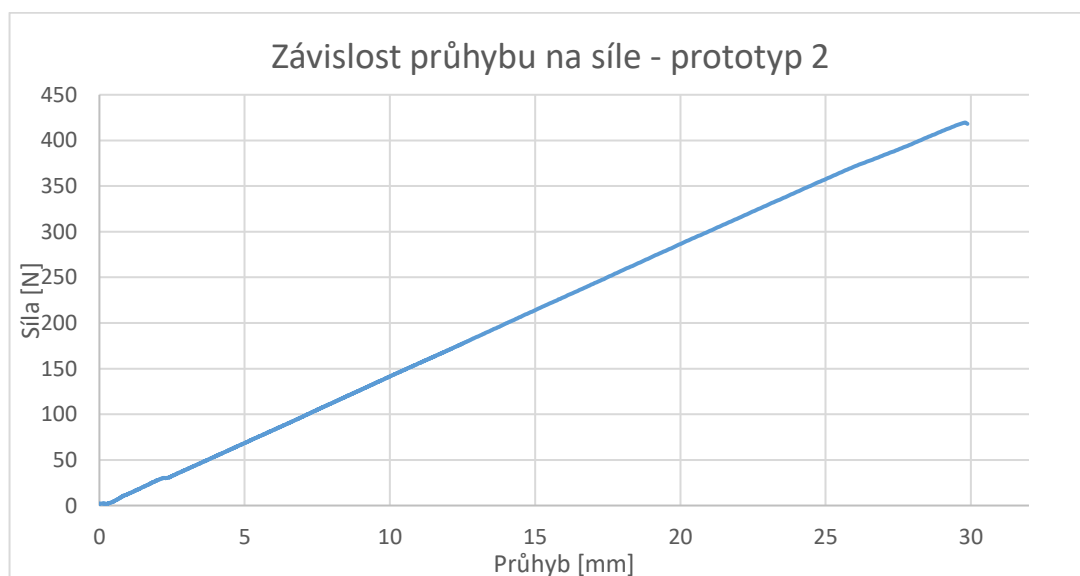
K prasknutí prototypu došlo již při průhybu 23,4 mm. Dle materiálového předpisu IFF by měla hůl vydržet průhyb 60 mm a při 300 N vykazovat deformaci minimálně 23 mm. Zkoušený prototyp vykazoval při 300 N hodnotu průhybu 16,9 mm. Výsledná pevnost ovšem mohla být ovlivněna defekty vzniklými při výrobě tohoto prototypu.

### 10.1.2 Zkouška na ohyb druhého prototypu

Druhý zkoušený prototyp byl osazen veškerými komponenty, které na florbalovou hůl patří. Na prototyp florbalové hole se tedy nasadila florbalová čepel, byla namotána omotávka a horní část trubky byla osazena krytkou. Poté byla hůl vsazena do stroje a bylo spuštěno testování. Nastavení stroje bylo totožné jako při testování prvního prototypu. Postupně zatěžující síla dosáhla maximální hodnoty 418 N, při které byla deformace 23,9 mm. Následně došlo ke zlomu prototypu a zkouška byla ukončena. Při síle 300 N vykazovala hůl průhyb 21 mm (dle IFF se tímto parametrem určuje tvrdost hole).



Obr. 59 Testování druhého prototypu (vlevo), místo zlomu (vpravo)



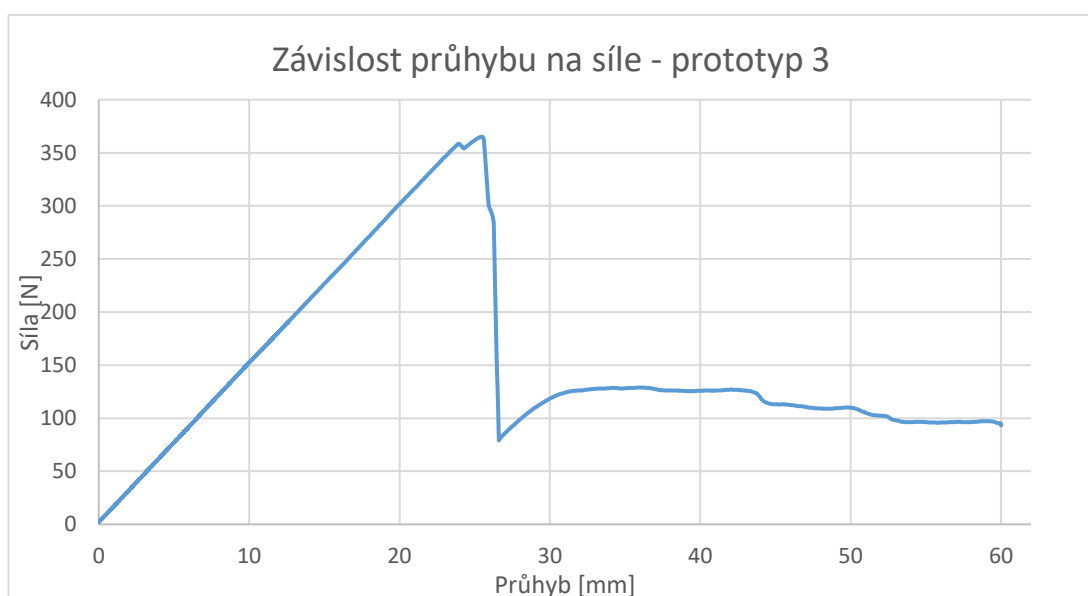
Obr. 60 Graf průběhu zkoušky tříbodovým ohybem – prototyp 2

### 10.1.3 Zkouška na ohyb třetího prototypu

Třetí vyrobený prototyp se vizuálně nijak neodlišoval od druhého a čtvrtého prototypu. Po umístění do stroje proběhla ohybová zkouška, která vykazovala maximální zatěžující sílu 365 N a průhyb 25,5 mm. V tomto bodě došlo k nalomení prototypu, ale protože nedošlo k úplnému zlomu, zkouška pokračovala až do průhybu 60 mm, ovšem už pod mnohem menší silou. Při síle 300 N byla deformace prototypu 20 mm.



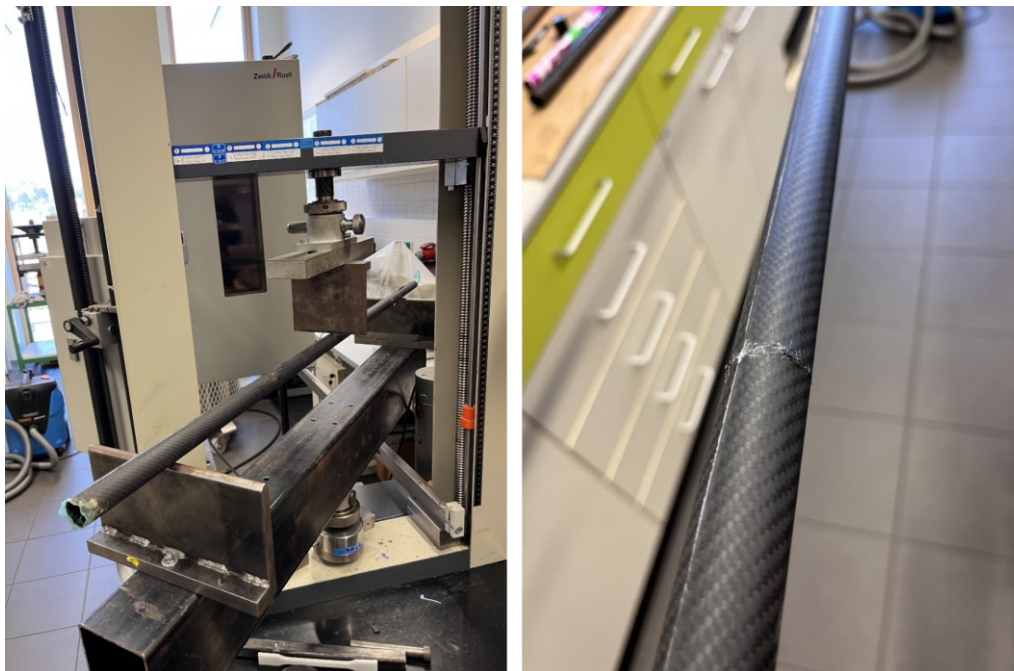
Obr. 61 Zlom při zkoušce ohybem u třetího prototypu



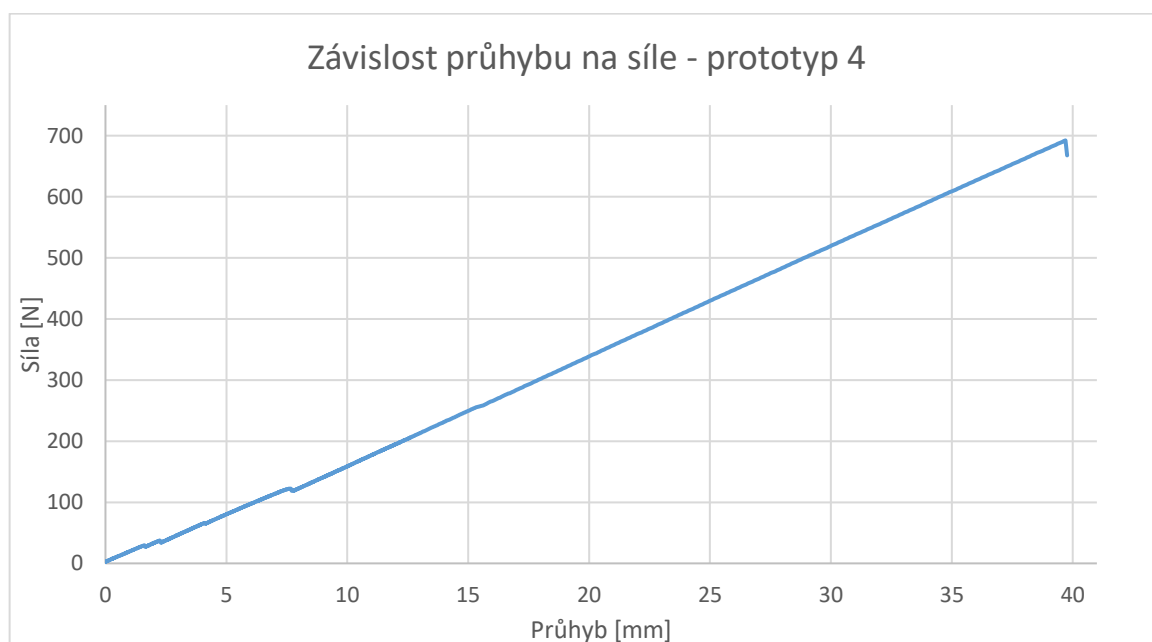
Obr. 62 Graf průběhu zkoušky tříbodovým ohybem – prototyp 3

### 10.1.4 Zkouška na ohyb čtvrtého prototypu

Prototyp byl umístěn do zkušebního stroje a byla provedena zkouška na ohyb. Výsledkem zkoušky bylo dosažení maximální zatěžující síly 667 N, při které došlo ke zlomu. Průhyb při maximální síle byl pak 39,8 mm. Hodnota průhybu při síle 300 N činila 17,9 mm.



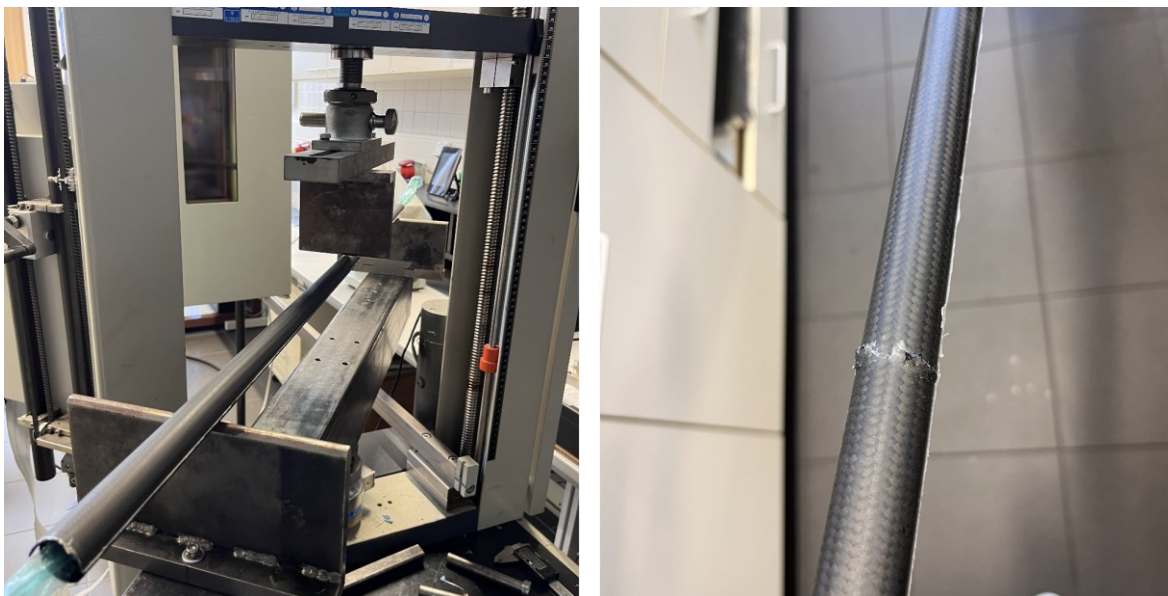
Obr. 63 Testování čtvrtého prototypu (vlevo), místo zlomu (vpravo)



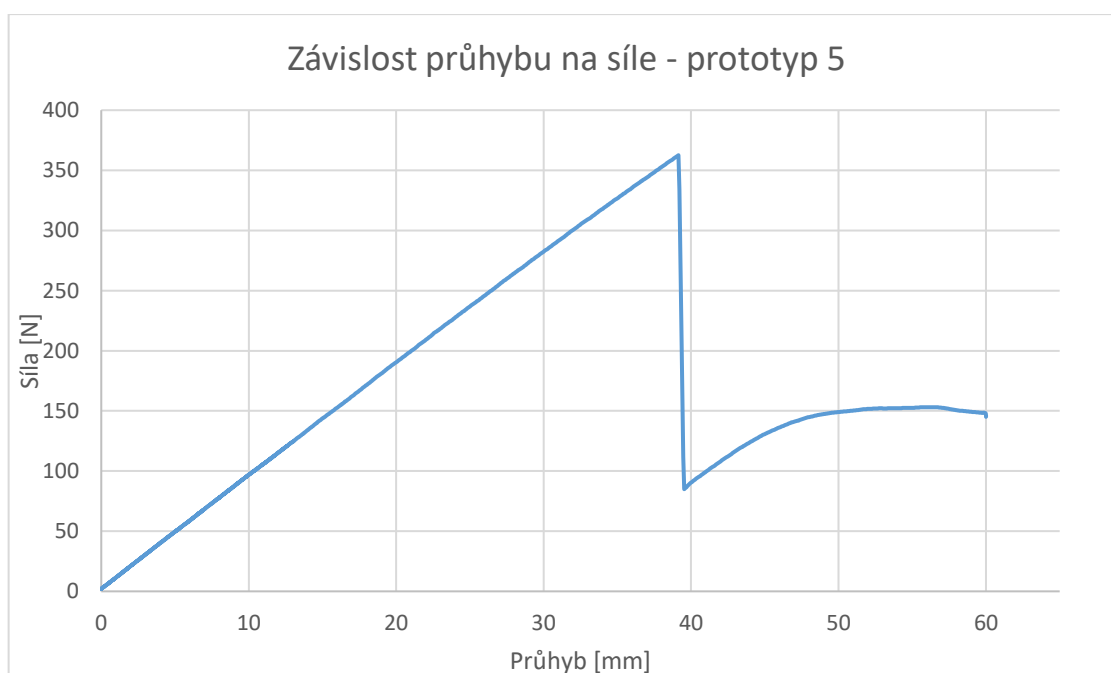
Obr. 64 Graf průběhu zkoušky tříbodovým ohybem – prototyp 4

### 10.1.5 Zkouška na ohyb pátého prototypu

Jak již bylo uvedeno, u pátého prototypu došlo k malým změnám. Změna orientace vláken ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ) u prototypu 5 by tak měla znamenat zvýšení pružnosti a flexibility hole. Po umístění prototypu do testovacího zařízení a provedeném testu, bylo dosaženo maximální zatěžující síly 363 N a průhybu 39,1 mm. Při zatížení 300 N byla hodnota průhybu 32 mm.



Obr. 65 Testování pátého prototypu (vlevo), místo zlomu (vpravo)



Obr. 66 Graf průběhu zkoušky tříbodovým ohybem – prototyp 4

### 10.1.6 Celkové hodnocení zkoušky na ohyb

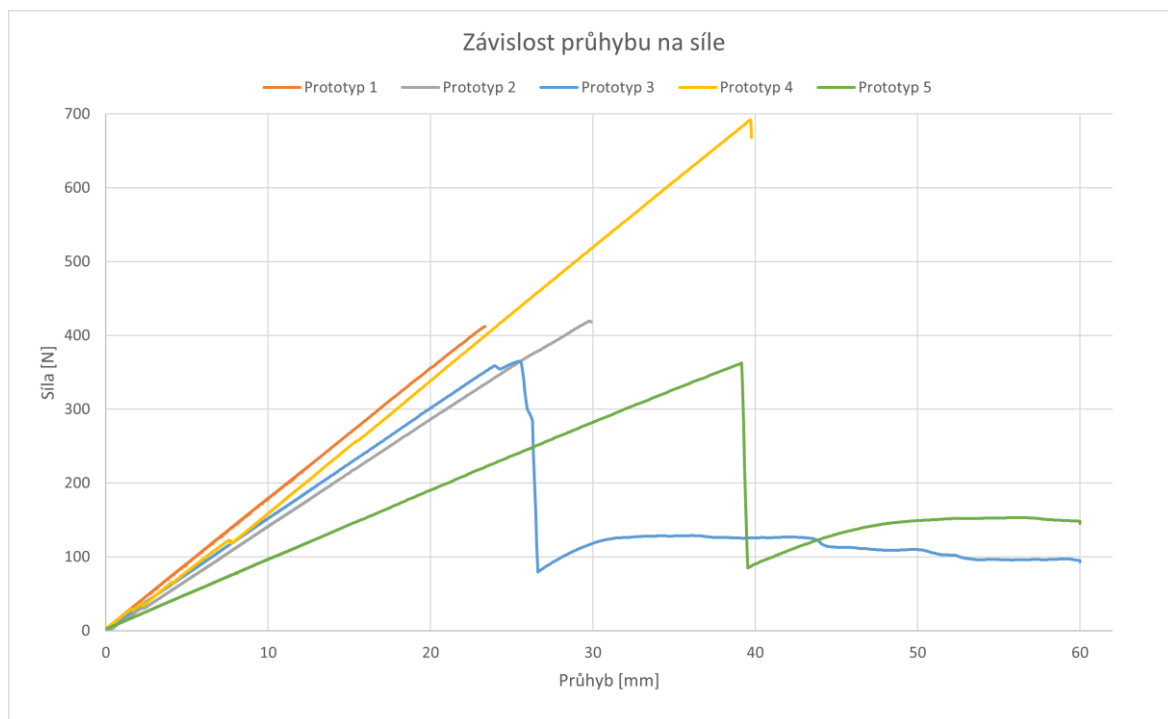
V této podkapitole jsou porovnány výsledky zkoušky na ohyb vyrobených prototypů s předpisově vytvořenými holemi pro florbal (dle IFF).

Dle materiálového předpisu SPCR 011 by se každá hůl měla testovat ve dvou směrech. V případě testování vyrobených prototypů na ohyb to nebylo možné, protože u každého prototypu došlo k destrukci ještě předtím, než bylo dosaženo průhybu 60 mm. Dále by dle materiálového předpisu měla hůl při zatížení 300 N vykazovat průhyb minimálně 23 mm. Této podmínky dosáhl pouze prototyp 5 s rozdílnou orientací vláken v jednotlivých vrstvách. U ostatních prototypů (s jednotnou orientací všech vrstev 90°) nebylo této podmínky při testování na ohyb dosaženo. Mezi výsledky jednotlivých prototypů byl patrný rozdíl. To mohlo být způsobeno kvalitou vytvrzení, správností kladení vrstev prepregu, odolností materiálu v dělicí rovině, vytvrzovacím programem autoklávu a vlivem dalších aspektů vzniklých při výrobě jednotlivých prototypů. Nejlepších výsledků při ohybové zkoušce dosahoval čtvrtý prototyp. U něj byla zaznamenán průhyb 39,8 mm při zatěžující síle 667 N. Pátý prototyp se zase nejvíce přiblížil materiálovému předpisu, když při zatěžující síle 300 N dosáhl průhybu 32 mm. Ovšem předepsaných 60 mm průhybu již nevydržel. Aby vyrobené prototypy splňovaly materiálový předpis, bylo by potřeba, aby při stejné zatěžující síle dosáhly většího průhybu. Jako jedno z vhodných řešení se nabízí upravit orientaci vláken.

Tab. 9 Hodnoty z testování prototypů na ohyb

	$E_f$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$y_{max}$ [mm]	$y_{300N}$ [mm]
<b>Prototyp 1</b>	44500	412	23,4	16,9
<b>Prototyp 2</b>	36700	418	23,9	21,0
<b>Prototyp 3</b>	37800	365	25,5	20,0
<b>Prototyp 4</b>	40700	667	39,8	17,9
<b>Prototyp 5</b>	23800	363	39,1	32,0

Kde:  $E_f$  [MPa] - Modul pružnosti v ohybu  
 $F_{max}$  [N] - Maximální zatěžující síla  
 $y_{max}$  [mm] - Průhyb při maximální zatěžující síle  
 $y_{300N}$  [mm] - Průhyb při síle 300 N



Obr. 67 Graf průběhu zkoušky tříbodovým ohybem u všech prototypů

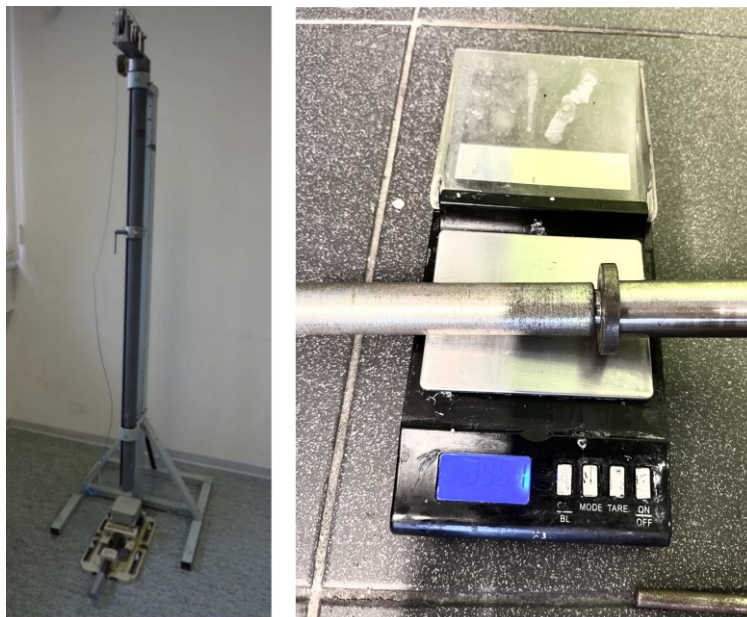
## 10.2 Rázová zkouška prototypů

Další zkouškou, která je definována v materiálových předpisech je zkouška rázem na padostroji. Zkouška by měla probíhat na padostroji, kdy je na hůl pouštěno z výšky  $1000 \pm 5$  mm závaží o hmotnosti  $350 \pm 10$  g. Padající závaží musí být z kalené oceli a ve tvaru hranolu s trojúhelníkovým profilem. Spodní hrana hranolu má mít tvar půlkruhu o poloměru 7 mm. Testovaná hůl má být uložena do V-bloku o délce 150 mm a vnitřním úhlem  $90^\circ$ . [6]

Padající závaží na zkoušeném vzorku udělá malý kulovitý otisk, avšak přípustný je pouze pokud se na povrchu, kde závaží dopadlo, nevytvoří viditelné trhliny, praskliny nebo se zde nenachází uvolněné části. [6]

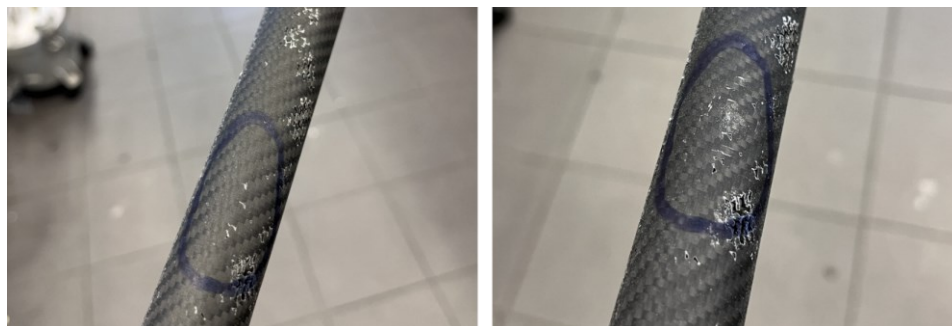
Kvůli předchozí zkoušce ohybem, kdy došlo ke zlomení všech prototypů, byly pro rázovou zkoušku použity jen některé části prototypů. Test probíhal na padostroji, kde bylo k dispozici pouze závaží kruhového průřezu o průměru 20 mm. Čistá váha, bez přidání dalších závaží byla také v rozporu s předpisem, a to 395 g.





Obr. 68 Padostroj (vlevo), závaží o hmotnosti 395 g (vpravo)

Část zkoušeného prototypu se umístila mezi dvě čelisti tvořící prostor, kde dopadne závaží. Tyto čelisti plnily stejnou funkci jako předpisem daný V-blok. Dále se odměřila výška, odkud bude závaží padat. Výška byla stanovena na 1000 mm a postupně se testovaly části všech vyrobených prototypů.



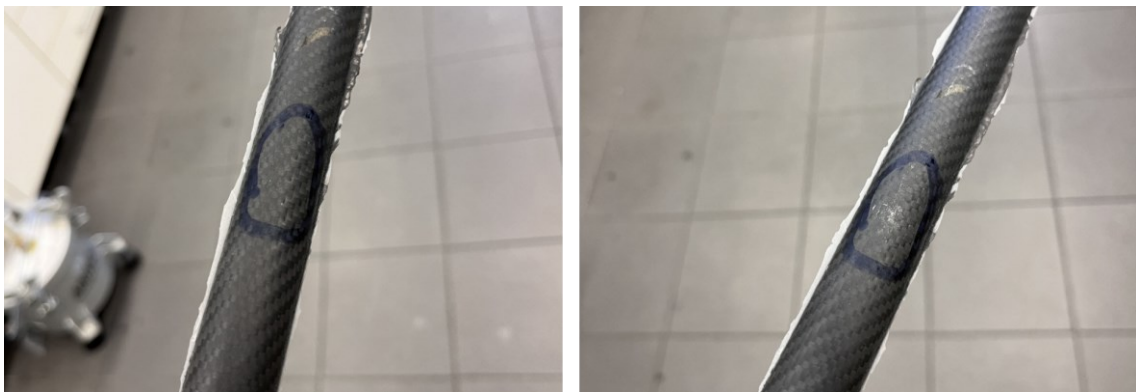
Obr. 69 První prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji



Obr. 70 Druhý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji



*Obr. 71 Třetí prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji*



*Obr. 72 Čtvrtý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji*



*Obr. 73 Pátý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji*

Průběh testu byl u všech prototypů stejný. Po provedení testu byly prototypy vizuálně zhodnoceny a na žádném ze zkoušených prototypů se neobjevily žádné rozsáhlejší trhliny nebo praskliny. Povrch byl po zkoušce odřený a vznikl malý kulovitý otisk po závaží, ale nevyskytly se žádné negativní jevy, které by ovlivnily kladné hodnocení zkoušky. Hmotnost závaží byla navíc dokonce vyšší, než uvádí materiálový předpis IFF, z čehož lze usuzovat, že pro předepsanou hmotnost  $350 \pm 10$  g by zkouška vyšla taktéž pozitivně. Dále byla stejnou zkouškou otestována

komerčně dostupná florbalová hůl značky OXDOG, kde výrobce uvádí materiál hole jako 100 % karbon. Výsledek byl obdobný jako u vyrobených prototypů.



Obr. 74 Karbonová OXDOG hůl před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji

Dále bylo provedeno experimentální testování, které již není uvedeno v materiálovém předpisu IFF. Hodnota hmotnosti závaží byla postupně navyšována, aby bylo zjištěno, při jaké hmotnosti dojde k poškození a negativním jevům uvedených ve zmíněných materiálových předpisech. Hmotnost padajícího závaží byla zvýšena na 621 g a zkouška proběhla na čtvrtém prototypu. Výška pádu zůstala zachována – tedy z výšky 1000 mm.



Obr. 75 Čtvrtý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 621 g

Při zvýšené hmotnosti závaží došlo na prototypu k nepatrnému rozdílu v porovnání s původní vahou závaží. Kulovitý vtisk byl větší, ale k výrazné deformaci povrchu a negativním jevům nedošlo. Proto bylo závaží navýšeno na hodnotu 950 g. Ostatní parametry zůstaly stejné.

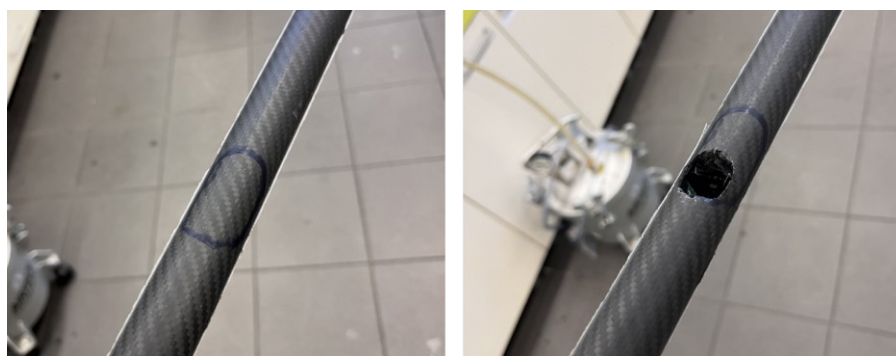


Obr. 76 Čtvrtý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 950 g

Zvýšená hmotnost závaží na 950 g se projevila na prototypu větším vtiskem, ale také větší odřenou plochou. Horní vrstva pryskyřice se deformovala, ale vlákna držela soudržnost a nedošlo k prasklinám, trhlinám ani porušení materiálu. Hodnota závaží byla dále navýšena na hmotnost 1400 g. Ostatní parametry zůstaly zachovány. Testovány byly prototypy 2 a 3.



Obr. 77 Druhý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 1400 g



Obr. 78 Třetí prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 1400 g

Při hmotnosti závaží 1400 g vznikly na zkoušených prototypěch vady, které prototypy značně deformovaly. Na prototypu 2 vznikly rozsáhlé trhliny a prasknutí bylo vidět jak v příčném, tak podélném směru. U prototypu 3 došlo k úplnému proražení a destrukci materiálu. (viz. Obr. 69, 70) Totožně byla pro porovnání otestována komerčně dostupná hůl OXDOG.



*Obr. 79 Karbonová OXDOG hůl před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 1400 g*

Na komerčně dostupné hokejce od výrobce OXDOG vznikly po zkoušce na padostroji (hmotnost závaží 1400 g) praskliny a trhliny (viz Obr. 71).

Prototypy testované zkouškou rázem na padostroji dle předpisu SPCR 011 splňovaly parametry a nedošlo u nich k poškození, trhlinám či rozsáhlejším prasklinám. Dosahované parametry byly stejné jako u komerčně dostupné hole. V dalším kroku bylo provedeno experimentální testování, kdy se s postupným přidáváním hmotnosti (621 g, 950 g, 1400 g) padajícího závaží prototypy testovaly a byla sledována jejich odolnost – zda nedochází k trhlinám, či zásadním deformacím vláken. Hodnota závaží, při které došlo k negativním jevům, byla 1400 g. Při této hmotnosti se prototypy deformovaly či úplně prorazily. Ke stejným výsledkům došlo i při testování komerčně dostupné hole, kdy závaží 1400 g způsobilo trhliny a praskliny hole.

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala návrhem kompozitní florbalové hole s použitím předimpregnovaných materiálů. Cílem práce bylo navrhnout a realizovat řešení výroby prototypu florbalové hole z kompozitních materiálů a následné experimentální testování mechanických vlastností na základě technické specifikace SPCR 011. Součástí práce bylo vytvoření aktuálního přehledu využití kompozitních materiálů pro výrobu a volba zpracovatelské technologie výroby.

Práce je strukturována do dvou částí. V první, teoretické části je čtenář v první kapitole seznámen se sportem florbal a základním florbalovým vybavením. Druhá kapitola se věnuje kompozitním materiálům a vede k porozumění dané problematiky. Především je zde popsáno, jak se kompozity definují a jakými vlastnostmi disponují proti běžně používaným materiálům. Třetí kapitola se zabývá přehledem dostupných variant výroby dutých kruhových profilů a podrobně tyto metody popisuje. Čtvrtá kapitola pak charakterizuje způsoby testování dutých profilů, zejména je pozornost věnována postupům testování dle technické specifikace SPCR 011. V předposlední kapitole je představeno využití kompozitních materiálů ve sportovním odvětví, a to konkrétně v lyžařství, cyklistice a kanoistice. Poslední kapitola se věnuje problematice recyklování kompozitních materiálů a seznamuje čtenáře s možnostmi i současnými problémy recyklace kompozitů včetně odlišných pohledů různých zemí.

Druhou, neméně důležitou částí diplomové práce je její praktická část. Ta je směřována jak na návrh a realizaci výroby formy, tak na následnou výrobu prototypu florbalové hole. Součástí praktické části je i testování prototypů prostřednictvím mechanických zkoušek. Po prostudování příhodné literatury a seznámení se s technologickými postupy výroby forem, byla v rámci této diplomové práce zvolena metoda výroby pomocí dvoudílné formy, a to hlavně z důvodu vizuální analýzy komerčně dostupných holí, na kterých byla viditelná dělicí rovina. Dalším důvodem byla stabilita a rozměrová přesnost výsledného prototypu díky předem přesně vyrobené dutině ve formě. V dalším kroku proběhl výběr vhodného materiálu pro formu dle předem specifikovaných kritérií. Jako materiál byl zvolen epoxidový blok Renshape BM 5060. Po zvolení materiálu byl vytvořen 3D model a výkresová dokumentace. Po přípravě polotovaru bylo vše předáno firmě JAPA Vsetín, která provedla výrobu obou dílů formy na CNC frézovacím stroji. Ihned po výrobě formy

začala výroba jednotlivých prototypů. Na prvním prototypu se vyskytly značné defekty, proto byly rozměry formy upraveny tak, aby se tyto defekty eliminovaly. Po úpravě rozměrů formy a změnách vytvrzovacího programu v autoklávu bylo u dalších čtyř prototypů dosaženo optimálních výsledků.

V poslední kapitole práce jsou popsány výsledky mechanických zkoušek vyrobených prototypů, jež byly prováděny dle technické specifikace SPCR 011. První zkouškou byla zkouška na ohyb. Důležitými měřenými parametry byly: maximální zatěžující síla, průhyb při této síle a průhyb při síle 300 N, díky kterému se určuje tvrdost hole. Testovaná hůl by dle předpisu měla vydržet průhyb 60 mm, ovšem žádný z testovaných prototypů tuto podmínku nesplnil. Druhou mechanickou zkouškou byla zkouška rázem na padostroji. V průběhu zkoušky bylo na prototyp puštěno závaží o hmotnosti 395 g z výšky 1000 mm. Výsledkem zkoušky byla vizuální analýza, zda nedošlo vlivem nárazu k značným negativním jevům v podobě trhlin a rozsáhlých prasklin. U všech prototypů byl zaznamenán pouze nepatrný kulovitý vtisk, který žádným způsobem materiál neporušil. Dále probíhalo experimentální testování, kdy byla postupně zvyšována hmotnost padajícího závaží. Toto experimentální testování probíhalo do doby, dokud nedošlo k větší deformaci prototypu florbalové hole. Té bylo dosaženo při hmotnosti závaží 1400 g, i proto se jednalo o poslední testovanou váhu. Stejně experimentální testování proběhlo pro porovnání i s komerční florbalovou holí, u které k finální destrukci došlo při stejné hmotnosti závaží, tedy když mělo závaží 1400 g.

Zvolená metoda výroby má jistě několik výhod, například v podobě možnosti vytvrzení v autoklávu, výhoda stability vytvrzování ve formě a další. Po zkušenostech s výrobou několika prototypů bylo zaznamenáno také několik nevýhod, jako například problematické kladení prepregu do úzké dutiny formy, negativní vliv dělicí roviny na pevnost a soudržnost výrobku nebo nutnost výroby samotné formy a složitost procesu. Proto by bylo vhodné uvažovat o zvolení jiné metody pro porovnání dosažených výsledků stejného výrobku rozdílnou metodou. Pro zvýšení pevnosti a flexibility by se mohlo uvažovat o změně druhu prepregu a experimentálních zkouškách při různých kombinacích orientace vrstev.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SKRUŽNÝ, Zdeněk. *Florbal: technika, trénink, pravidla hry*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. Sport (Grada). ISBN 8024703831.
- [2] KYSEL, Jiří. *Florbal: kompletní průvodce*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010. Sport extra. ISBN 978-80-247-3615-0.
- [3] TERVO, Taru a Anna NORDSTROM. Science of floorball: a systematic review. *Open Access Journal of Sports Medicine* [online]. [cit. 2023-01-30]. ISSN 1179-1543. Dostupné z: doi:10.2147/OAJSM.S60490
- [4] *Rules of the Game: International Floorball Federation Rules and Competition Committee* [online]. In: . Helsinki [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: [https://dltaw1vhj9zy5.cloudfront.net/2022/05/Rules-of-the-Game-2022-Final\\_updated\\_18.05.2022.pdf](https://dltaw1vhj9zy5.cloudfront.net/2022/05/Rules-of-the-Game-2022-Final_updated_18.05.2022.pdf)
- [5] *Pravidla florbalu a jejich výklad* [online]. In: . Praha: Český florbal [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://old.ceskyflorbal.cz/dms/serve/assigned-file/7529/>
- [6] *Material Regulations and Certification Rules for IFF-marking of Floorball Equipment SPCR 011*. Edition 2020. Borås: RISE Research Institutes of Sweden AB, 2020. Dostupné také z: <https://dltaw1vhj9zy5.cloudfront.net/2020/09/IFF-Material-Regulations-2020.pdf>
- [7] *FLORBAL.COM: Florbalové hole* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.florbal.com/florbalove-hole/>
- [8] *THE RIGHT FLEX (STIFFNESS) OF YOUR FLOORBALL STICK: floorballshop.com* [online]. Germany, 2022 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: [https://www.floorballshop.com/schaftflex?\\_\\_store=en&\\_\\_from\\_store=floorballshopstoreview](https://www.floorballshop.com/schaftflex?__store=en&__from_store=floorballshopstoreview)
- [9] *Zone floorball: Materials Shafts* [online]. In: . Sweden, 2022 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.zonefloorball.com/materials-shafts>
- [10] KSANDR, Václav. Kompozity na konci svého života. *MATERIAL TIMES* [online]. 2021, 2021 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/tema/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>
- [11] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [13] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [14] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [15] CAMPBELL, F.C. *Structural Composite Materials*. 1 vydání. Ohio: ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.



- [16] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu - 4.část: Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [17] Technologie výroby kompozitů. In: *HAVEL Composites s.r.o.* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [18] How to Make a Roll Wrapped Carbon Fibre Tube. In: *Easycomposite* [online]. Stoke-on-Trent [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/learning/how-to-make-a-roll-wrapped-carbon-fibre-tube>
- [19] LIBEERT, Matthieu. How To Make Carbon Fiber Tubes - 4 different techniques. In: *MAT2 Composites* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.mat2composites.com/>
- [20] Composite Sleeving. In: *Composite Envisions LLC* [online]. Wausau, USA [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://compositeenvisions.com/document/composite-sleeving/>
- [21] Laminating and Bagging a Carbon Fibre Tube Using a Split Mould. In: *Easycomposite* [online]. Stoke-on-Trent [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/learning/split-mould-carbon-fibre-tube>
- [22] KENNY, Jose M. a Luigi NICOLAIS, ed. 18 - Science and Technology of Polymer Composites. In: ALLEN, Geoffrey a John C. BEVINGTON. *Comprehensive Polymer Science and Supplements*. Pergamon, 1989, s. 471-525. ISBN 9780080967011.
- [23] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [24] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN isbn80-7183-262-6.
- [25] TOMČÍK, Petr a Petr MOHYLA. *Teorie technologických procesů: návody do cvičení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1289-2.
- [26] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Vlastnosti kovových materiálů*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03686-0.
- [27] FUSS, Franz, Aleksandar SUBIC, Martin STRANGWOOD a Rabindra MEHTA. *Routledge Handbook of Sports Technology and Engineering*. 1st Edition. Routledge, 2014. ISBN 978-0415580458.
- [28] CALLISTER, JR., William D. a David G. RETHWISCH. *MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING*. 9th Edition. USA: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-32457-8.
- [29] MASON, Karen. Cycling forward with bike frame materials and processes. In: *CompositesWorld* [online]. Cincinnati, USA [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/cycling-forward-with-bike-frame-materials-and-processes>
- [30] LIU, Thomas Jin-Chee a Huang-Chieh WU. Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate.

- Materials & Design*. 2010, **31**(4), 1971-1980. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.036>
- [31] WATSON, Tom. Types of Kayak Materials. In: *PADDLING.COM* [online]. 2020 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://paddling.com/learn/types-of-kayak-materials>
- [32] MARTIN, Chris. Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills. *Bloomberg* [online]. 2020 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>
- [33] SPEKSNIJDER, Stijn. HERGEBRUIK VAN WINDTURBINEBLADEN IN EEN VOETGANGERSBRUG. *Bruggen*. Rijswijk: Nederlandse Bruggenstichting, 2019, (27). ISSN 1571-4586.
- [34] LI, Hui a Karl ENGLUND. Recycling of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite wastes from the aerospace industry. *Journal of Composite Materials*. SAGE Publications Ltd STM, 2016, **51**(9), 1265-1273. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998316671796
- [35] OZSOY, N, M. OZSOY a A. MIMAROGLU. Mechanical Properties of Chopped Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Acta Physica Polonica A* [online]. 2016, **130**(1), 297-299 [cit. 2023-02-25]. ISSN 0587-4246. Dostupné z: doi:10.12693/APhysPolA.130.297
- [36] PANDEY, UMESH, JAN ARILD STORMYR, ALIREZA HASSANI, RAJAN JAISWAL, HILDEGUNN H. HAUGEN a BRITT M. E. MOLDESTAD. *PYROLYSIS OF PLASTIC WASTE TO ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PRODUCTS* [online]. In: . s. 61-74 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: doi:10.2495/EPM200071
- [37] PICKERING, S.J. Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006, **37**(8), 1206-1215. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$s_o$	napětí v ohybu [MPa]
$E_f$	modul pružnosti v ohybu [MPa]
$F_{max}$	maximální působící síla [N]
$L_R$	tržná délka [m]
$R_m$	mez pevnosti v tahu [MPa]
$y_{300N}$	velikost průhybu při síle 300N [mm]
$y_{max}$	velikost průhybu [mm]
$D$	vnější průměr dutého kruhového profilu [mm]
$E$	modul pružnosti [MPa]
$F$	působící síla [N]
$d$	vnitřní průměr dutého kruhového profilu [mm]
$g$	gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ]
$l$	délka zkoušeného tělesa [mm]
$\rho$	hustota [ $kg/m^3$ ]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1 Testování tvrdosti florbalové hokejky [8]</i> .....	15
<i>Obr. 2 Florbalová čepel UNIHOC [7]</i> .....	16
<i>Obr. 3 Florbalová hůl ZONE Airlight [9]</i> .....	17
<i>Obr. 4 Struktura dřeva pod mikroskopem [10]</i> .....	18
<i>Obr. 5 Ohýbání kompozitu vyztuženého vlákny [10]</i> .....	20
<i>Obr. 6 Dělení vláknových výtuzí dle charakteru výtuzě [13]</i> .....	21
<i>Obr. 7 Typy orientace vláken [15]</i> .....	22
<i>Obr. 8 Výroba uhlíkových vláken [13]</i> .....	24
<i>Obr. 9 Příprava a separece kovového trnu [18]</i> .....	26
<i>Obr. 10 Nabalování uhlíkových prepregů na kovový trn [18]</i> .....	27
<i>Obr. 11 Obalování navinutého prepregu smršťovací páskou [18]</i> .....	28
<i>Obr. 12 Pletený rukáv z uhlíkových vláken [20]</i> .....	29
<i>Obr. 13 Navlečení rukávu na trn [19]</i> .....	30
<i>Obr. 14 Nanášení pryskyřice pomocí štětce [19]</i> .....	30
<i>Obr. 15 Navíjení smršťovací pásky [19]</i> .....	31
<i>Obr. 16 Nanesení tvaru dutiny na prepreg pomocí maskovací pásky [21]</i> .....	32
<i>Obr. 17 Přesah vrstev přes dělicí rovinu formy [21]</i> .....	32
<i>Obr. 18 Fóliový rukáv uvnitř dutiny formy [21]</i> .....	33
<i>Obr. 19 Vakuování formy [21]</i> .....	33
<i>Obr. 20 Proces výroby navíjením [22]</i> .....	34
<i>Obr. 21 Navíjení vlákna na trn [19]</i> .....	35
<i>Obr. 22 Hotový výrobek vyrobený metodou navíjení [19]</i> .....	35
<i>Obr. 23 Zkouška ohybem florbalové hole [6]</i> .....	39
<i>Obr. 24 Charpyho kladivo [24]</i> .....	40
<i>Obr. 25 Rázová zkouška florbalové hole [6]</i> .....	41
<i>Obr. 26 Řez lyží z kompozitního materiálu [28]</i> .....	43
<i>Obr. 27 Výroba rámu kola z uhlíkových vláken [29]</i> .....	45
<i>Obr. 28 Vrstvení materiálu do formy na kajak [31]</i> .....	46
<i>Obr. 29 Skládkování listů větrných elektráren [32]</i> .....	47
<i>Obr. 30 Nosníky lávky z listů větrných elektráren [33]</i> .....	48
<i>Obr. 31 Proces recyklace pyrolýzou [37]</i> .....	50
<i>Obr. 32 Dělicí rovina u komerčně dostupné hole</i> .....	53
<i>Obr. 33 Navržená florbalová hůl</i> .....	55

<i>Obr. 34 První návrh formy pro výrobu florbalové hole</i> .....	56
<i>Obr. 35 Druhý návrh formy pro výrobu florbalové hole</i> .....	56
<i>Obr. 36 Řezání bloku na kotoučové pile</i> .....	57
<i>Obr. 37 Obrobený bok upnutého bloku na CNC frézovacím stroji</i> .....	58
<i>Obr. 38 Obrábění dutiny formy na CNC frézovacím stroji</i> .....	59
<i>Obr. 39 Vrtání děr pro vodící kolíky</i> .....	60
<i>Obr. 40 Vybroušená a naseparovaná forma</i> .....	61
<i>Obr. 41 Použité prostředky k separaci formy</i> .....	61
<i>Obr. 42 Nástřihový plán – zkouška správnosti nástřihu v dutině formy</i> .....	62
<i>Obr. 43 Kladení prepregu</i> .....	63
<i>Obr. 44 Zaformovaná forma, provedená vakuace formy</i> .....	64
<i>Obr. 45 Průběh teploty v čase vytvrzování – prototyp 1</i> .....	65
<i>Obr. 46 Odformování po procesu vytvrzování v autoklávu</i> .....	65
<i>Obr. 47 Defekty na výrobku</i> .....	66
<i>Obr. 48 Úprava rozměrů formy na CNC frézce</i> .....	67
<i>Obr. 49 Nástřihové šablony</i> .....	68
<i>Obr. 50 Výkres nástřihového plánu</i> .....	68
<i>Obr. 51 Vakuace první vrstvy (vlevo), pásky a hliníková podpěra (vpravo)</i> .....	69
<i>Obr. 52 Vakuace formy a kontrola tlaku</i> .....	69
<i>Obr. 53 Průběh teploty v čase vytvrzování – prototyp 2</i> .....	70
<i>Obr. 54 Druhý vyrobený prototyp</i> .....	70
<i>Obr. 55 Průběh teploty v čase vytvrzování – prototyp 3, 4, 5</i> .....	71
<i>Obr. 56 Úprava nosníku a uložení nosníku s podporami do zkušebního stroje</i> .....	73
<i>Obr. 57 Prototyp v průběhu zkoušky</i> .....	74
<i>Obr. 58 Graf průběhu zkoušky třibodovým ohybem – prototyp 1</i> .....	74
<i>Obr. 59 Testování druhého prototypu (vlevo), místo zlomu (vpravo)</i> .....	75
<i>Obr. 60 Graf průběhu zkoušky třibodovým ohybem – prototyp 2</i> .....	75
<i>Obr. 61 Zlom při zkoušce ohybem u třetího prototypu</i> .....	76
<i>Obr. 62 Graf průběhu zkoušky třibodovým ohybem – prototyp 3</i> .....	76
<i>Obr. 63 Testování čtvrtého prototypu (vlevo), místo zlomu (vpravo)</i> .....	77
<i>Obr. 64 Graf průběhu zkoušky třibodovým ohybem – prototyp 4</i> .....	77
<i>Obr. 65 Testování pátého prototypu (vlevo), místo zlomu (vpravo)</i> .....	78
<i>Obr. 66 Graf průběhu zkoušky třibodovým ohybem – prototyp 4</i> .....	78
<i>Obr. 67 Graf průběhu zkoušky třibodovým ohybem u všech prototypů</i> .....	80
<i>Obr. 68 Padostroj (vlevo), závaží o hmotnosti 395 g (vpravo)</i> .....	81

<i>Obr. 69 První prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji ....</i>	81
<i>Obr. 70 Druhý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji...</i>	81
<i>Obr. 71 Třetí prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji .....</i>	82
<i>Obr. 72 Čtvrtý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji...</i>	82
<i>Obr. 73 Pátý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji.....</i>	82
<i>Obr. 74 Karbonová OXDOG hůl před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji .....</i>	83
<i>Obr. 75 Čtvrtý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 621 g.....</i>	83
<i>Obr. 76 Čtvrtý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 950 g.....</i>	84
<i>Obr. 77 Druhý prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 1400 g.....</i>	84
<i>Obr. 78 Třetí prototyp před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 1400 g.....</i>	84
<i>Obr. 79 Karbonová OXDOG hůl před (vlevo) a po (vpravo) rázové zkoušce na padostroji – hmotnost závaží 1400 g.....</i>	85

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Doporučené délky hole [7].....</i>	14
<i>Tab. 2 Tržná délka u vybraných materiálů [13].....</i>	23
<i>Tab. 3 Kategorie uhlíkových vláken [16].....</i>	24
<i>Tab. 4 Vlastnosti zvoleného materiálu formy.....</i>	54
<i>Tab. 5 Vytvrzovací program autoklávu pro prototyp 1.....</i>	64
<i>Tab. 6 Vytvrzovací program autoklávu pro prototyp 2.....</i>	70
<i>Tab. 7 Vytvrzovací program autoklávu pro prototypy 3, 4, 5.....</i>	71
<i>Tab. 8 Technické údaje univerzálního testovacího stroje Zwick 1456.....</i>	72
<i>Tab. 9 Hodnoty z testování prototypů na ohyb.....</i>	79

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technický list použitého prepregu

Příloha P II: Materiálový list materiálu formy

Příloha P III: Výkresová dokumentace

- Výkres formy
  - DP\_V\_1
- Výkres upravené formy
  - DP\_V\_2



# PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST POUŽITÉHO PREPREGU



COMPANY WITH QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001: 2015 CERTIFIED BY BUREAU VERITAS N° 223933

Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 [www.impregnatex.it](http://www.impregnatex.it)

**MATRIX PRODUCT DATA**

**IMP503Z-HT**

ST-010415- rev12-09/09/2020

## DESCRIPTION

Modified epoxy matrix IMP503Z-HT prepregs are suitable for high cosmetic applications such as Carbon Look composite parts.

IMP503Z-HT can withstand higher service temperatures than IMP503Z.

Both composite and metal tools can be used.

IMP503Z-HT prepregs are best processed by autoclave curing or press moulding.

IMP503Z-HT is available with woven carbon, glass, aramid and natural fibers reinforcements.

Light-black pigmented IMP503Z-HT, named IMP503Z-HT P, is also available.

## BENEFITS AND FEATURES

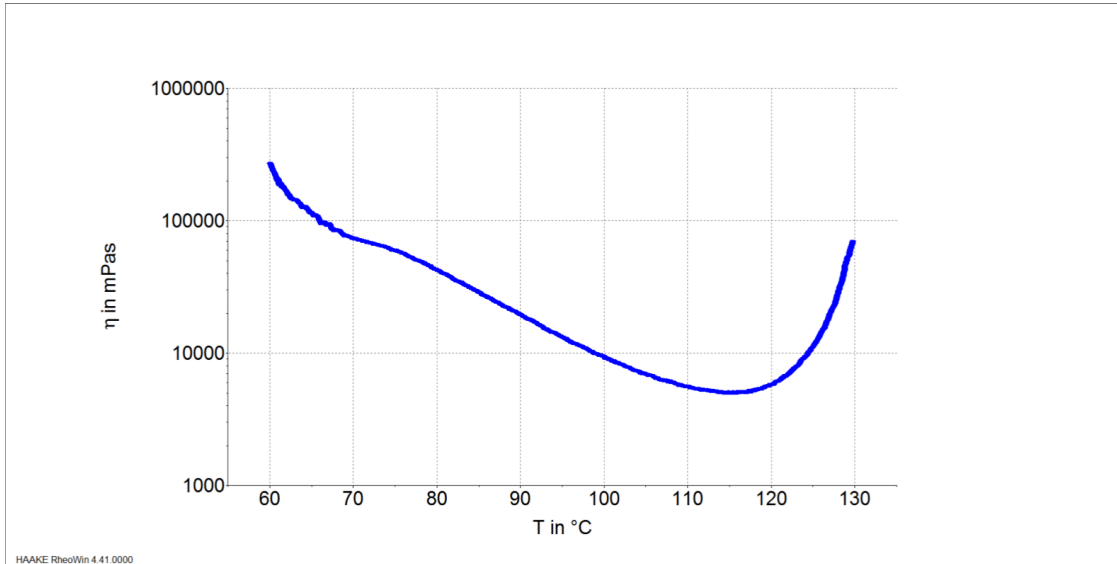
- IMP503Z-HT finds its main uses in automotive, sports & leisure, marine and industrial applications.
- Good mechanical properties.
- Toughened resin.
- Compatible with IMP503Z and IMP505L prepregs.
- Excellent UV resistance and environmental stability for aesthetic cosmetic components.

## RESIN PROPERTIES

<b>TYPE</b>		<b>TOUGHENED</b>
<b>Cured resin's density</b>	g/cm <sup>3</sup>	1.20 to 1.22
<b>Gel Time at 125 °C</b>	min	6 to 8
<b>Gel Time at 110 °C</b>	min	20 to 25
<b>TACK</b>		<b>MEDIUM</b>
<b>Out-life (23 °C)</b>	weeks	5
<b>Shelf Life (-18 °C)</b>	months	12

## VISCOSITY PROFILE

The chart below shows the rheological behaviour of IMP503Z-HT.  
Cone-plate rheometer, frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/min



## RECOMMENDED CURE SCHEDULES

One of the following autoclave cure schedules needs to be selected:

**2 Hours @ 140°C** For Development of Maximum Glass Transition Temperature (115 °C to 120 °C, DMA Onset T<sub>g</sub>).

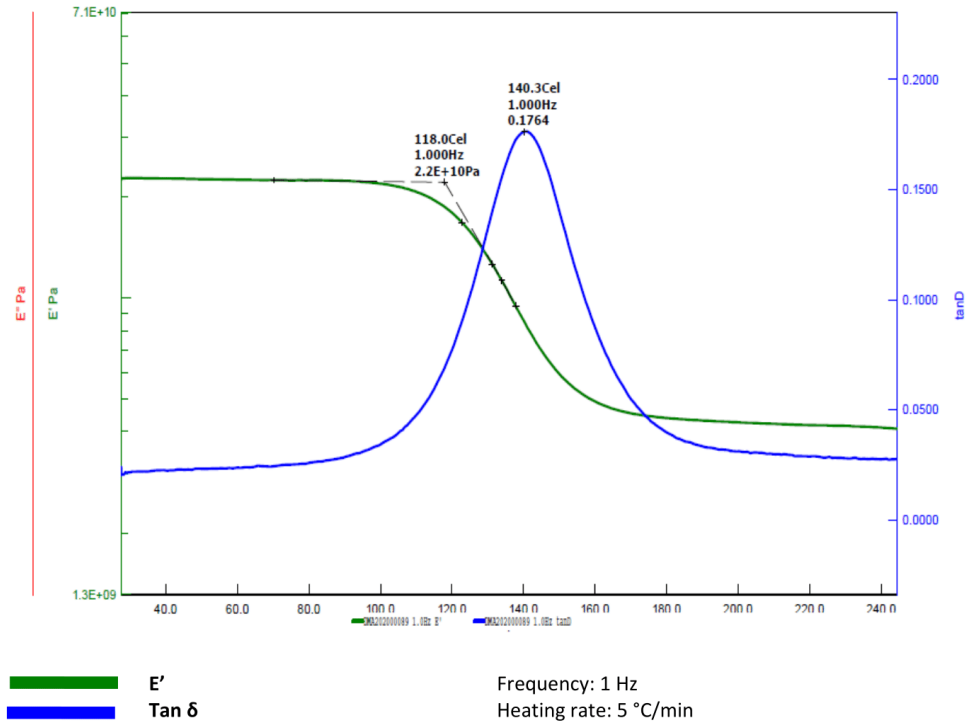
or

**1.5 Hours @ 135°C** General Cure Cycle (T<sub>g</sub> approximately 110 °C).

**THERMAL PERFORMANCE**

The following chart shows a DMA-Tg trace for GG204T-GG380T-IMP503Z-HT laminate, tested to ASTM D7028.

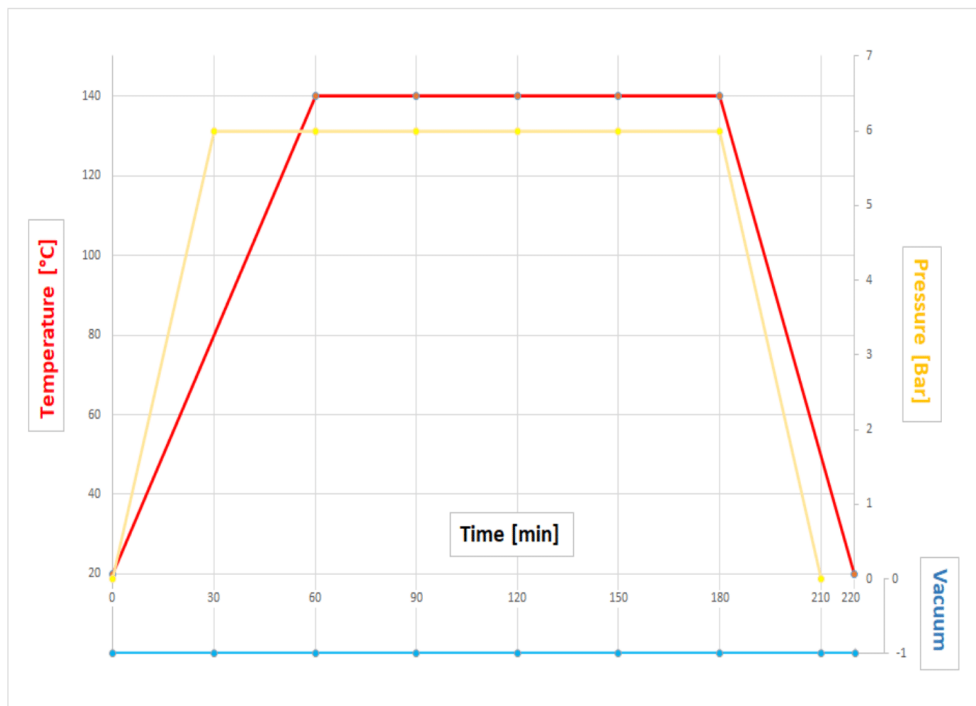
**Cure schedule: 120 minutes @ 140 °C.**



## PROCESSING GUIDELINES

**Recommended 140°C Autoclave Cure Cycle:**

- From the beginning of the cure cycle apply maximum vacuum pressure to the bagged component(s).
- From the beginning of cure cycle apply an over pressure of  $6.0 \pm 1.0$  Bar.
- Use temperature monitoring thermocouples applied to the surface of the component(s) to define the actual cure temperature. At those places with the highest thermal inertia in responding to heating ("Coldest Area").
- Use a controlled heating rate of 1.0 to 2.0 °C/min from room temperature to 140 °C.
- The tolerance on actual cure temperature on the component bag is 140 °C, +5 °C -0 °C.
- The cure cycle dwell duration starts once the slowest monitoring thermocouple on the component(s) reaches the 140 °C.
- The tolerance on the 120 minutes cure time at 140 °C is +30 minutes, -0 minutes.
- Once cured, the cooling rate can be 2.0 to 3.0 °C/min back to room temperature or 30 °C whichever is higher.



IMP503Z-HT is a reactive resin formulation which may undergo high exothermic heating during initial curing process if guidelines are not followed. Carefully setting recommended heating rate and dwell temperatures cure schedules is required. Exotherm risk increases with increasing laminate thickness.

**MECHANICAL PROPERTIES**

The table below shows average mechanical properties of IMP503Z-HT laminates.

Reinforcement	Flexural Strength ASTM D790 [MPa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	ILSS ASTM D2344 [N/mm <sup>2</sup> ]	Volume of fibre [%]
GG204T	830	57	68	58
GG204P	846	58	67	59
GG 240T	901	54	59	54
GG380T	930	60	71	60
GG428T	920	57	69	62
GG450T	890	59	63	58
GG630T	705	62	55	63
UD-DYX HS 15/130 DLN2	1350	88	-	45
DYF15 GG180P	660	42	54	43
KK285T	456	22	46	58
GV335UD	650	234	59	43
VV 350	400	21	45	60

The mechanical data shown above refers to laminates press-mould cured 90 minutes @ 135°C.

**STORAGE**

Prepreg materials should be stored as received @ - 18 °C.

Shelf-life @ -18 °C : 12 months

Out-life @ 23 °C: 5 weeks

Allow the material to fully thaw before removing it from its packaging.

**MATERIAL HANDLING - SAFETY**

Operators should wear protective gloves to avoid direct contact with the skin and to prevent product contamination. Please consult MSDS.

**NOTE**

The technical specifications, data and measures provided are accurate to the best of Impregnatex Compositi knowledge. Impregnatex Compositi give no warranty, express or implied, as to the completeness, accuracy, reliability or fitness for any specific or particular use, field of use, application, performance, result or purpose. Above mentioned technical information are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.

# PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST MATERIÁLU FORMY (RENSHAPE BM 5060)



## RenShape® Epoxy RenShape® Epoxy

**Standardtypen und -abmessungen** Technische Daten (Gemessene Mittelwerte sind nur für Informationszwecke angegeben)  
Standard types and dimensions technical data (measured average values, given for information purposes only)

Type   Type	BM 5050	BM 5055	BM 5060
Farbe   Colour	blau   blue	hellgrün   light green	blau   blue
Anwendungsbereiche   Applications	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prepreg Legewerkzeuge</li> <li>• Datenkontrollmodelle</li> <li>• Cubing Modelle</li> <li>• Vakuumtiefziehformen</li> <li>• prepregs</li> <li>• data control models</li> <li>• cubing</li> <li>• vacuum forming moulds</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prepreg Legewerkzeuge</li> <li>• Datenkontrollmodelle</li> <li>• Cubing Modelle</li> <li>• Vakuumtiefziehformen</li> <li>• prepregs</li> <li>• data control models</li> <li>• cubing</li> <li>• vacuum forming moulds</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prepreg Legewerkzeuge</li> <li>• Datenkontrollmodelle</li> <li>• Cubing Modelle</li> <li>• Vakuumtiefziehformen</li> <li>• prepregs</li> <li>• data control models</li> <li>• cubing</li> <li>• vacuum forming moulds</li> </ul>
Materialeigenschaften   Properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr feine Oberflächenstruktur</li> <li>• sehr gut bearbeitbar</li> <li>• sehr dimensionsstabil</li> <li>• wärmeformbeständig bis 110°C</li> <li>• very fine surface structure</li> <li>• easily machinable</li> <li>• very good dimensional stability</li> <li>• high deflection temperature up to 110 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr feine Oberflächenstruktur</li> <li>• sehr gut bearbeitbar</li> <li>• sehr dimensionsstabil</li> <li>• wärmeformbeständig bis 140°C</li> <li>• very fine surface structure</li> <li>• easily machinable</li> <li>• very good dimensional stability</li> <li>• high deflection temperature up to 140 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr feine Oberflächenstruktur</li> <li>• sehr gut bearbeitbar</li> <li>• sehr dimensionsstabil</li> <li>• wärmeformbeständig bis 135°C</li> <li>• very fine surface structure</li> <li>• easily machinable</li> <li>• very good dimensional stability</li> <li>• high deflection temperature up to 140 °C</li> </ul>
Dichte ca. g/cm <sup>3</sup>   Density approx. g/cm <sup>3</sup>	700 – 750	700 – 750	700 – 750
Druckfestigkeit (DIN EN ISO 604 ) ca. MPa Compressive strength (DIN EN ISO 604) approx. MPa	60 – 65	60 – 70	65 – 70
Biege-E-Modul (DIN EN ISO 178) ca. MPa Flexural strength (DIN EN ISO 178) approx. MPa	2200 – 2600	2300 – 2600	2400 – 2700
Biegefestigkeit (DIN EN ISO 178 ) ca. MPa Bending strength (DIN EN ISO 178) approx. MPa	30 – 40	30 – 40	35 – 40
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient Temperaturbereich ca. 25 – 70 °C (in Anlehnung an DIN 53752) 10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup> Linear thermal expansion coefficient temperature from approx. 25 up to 70 °C (according to DIN 53752) 10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup>	35 – 45	35 – 40	30 – 40
Shore-Härte (DIN 53505) Shore-D   Shore hardness (DIN 53505) Shore-D	72 – 78	67 – 75	70 – 80
Wärmeformbeständigkeit °C   Deflection temperature °C	105 – 110	135 – 140	135 – 140
Standardabmessungen mm   Standard dimensions mm	1524 x 610 x 50 1524 x 610 x 75 1524 x 610 x 100 1524 x 610 x 150 1524 x 610 x 200	1524 x 610 x 50 1524 x 610 x 75 1524 x 610 x 100 1524 x 610 x 150 1524 x 610 x 200	1524 x 610 x 50 1524 x 610 x 75 1524 x 610 x 100 1524 x 610 x 150 1524 x 610 x 200

## Bearbeitungshinweise (empfohlene Richtwerte) | Machining recommendation

	Schrupfräsen   Roughing cut	Schlichten   Konturfräsen   Finishing   Contour cut
Umdrehungen (n)   Spindle speed (n)	8.000 – 15.000 1/min	8.000 – 15.000 1/min
Vorschub (vf)   Feed rate (vf)	2.000 – 3.000 mm/min	1.000 – 3.000 mm/min
Schnitttiefe (ap)   Cutting depth (ap)	3,0 – 5,0 mm	0,2 – 0,5 mm
	Vollhartmetallfräser mit zwei oder drei Schneiden Solid carbide cutters with 2 or 3 cutting edges	Vollhartmetallfräser mit zwei oder drei Schneiden oder Vollhartmetallkugelfräser Solid carbide cutters with 2 or 3 cutting edges or solid carbide ball milling cutters

Lagerung: Das Blockmaterial kann auf einer Palette bei 20°C bis 40°C im Trockenem flach gelagert werden. Temperaturschwankungen sollten beim Transport und bei der Lagerung vermieden werden. Alle Angaben über das Material und die Be- und Verarbeitung werden nach bestem Wissen gemacht und sind nicht als Zusicherung von Eigenschaften des Materials zu betrachten. | Storage: The block material can be stored flat on a pallet at 20 °C to 40 °C in dry condition. Temperature variations should be avoided during transport and storage. The technical data relating to the material and its processing has been compiled carefully and is correct to the best of our knowledge. The information cannot, however, be taken to be legally binding nor as any commitment that the material has certain properties or is suited for any particular purpose.