



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VÝROBY A ZPRACOVÁNÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ

PRODUCTION TECHNOLOGY AND PROCESSING OF CARBON
COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr Bouchal

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Bouchal

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů

v anglickém jazyce:

Production technology and processing of carbon composites

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie zpracování uhlíkových kompozitů s ohledem na jejich nákladnost a perspektivní aplikace

Cíle bakalářské práce:

Úvod

Teoretický rozbor problému

Možnosti výroby kompozitních materiálů, jejich trendy a inovace

Aplikace poznatků pro návrh technologie výroby vybrané součásti

Diskuze

Závěry

Seznam odborné literatury:

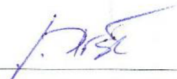
- Buckley, John D. Edie Dan D. Carbon-Carbon Materials and Composites William Andrew. 1993, pp. 294, ISBN 0815513240, 9780815513247.
- Stuart M. Lee Handbook of Composite Reinforcements. John Wiley & Sons, 1992. pp.732. ISBN 0-471-18861-1.
- Strong A. B. Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications. SME, 2008, pp. 620. 2nd ed. ISBN 13:978-087263854-9
- Hearle, J. W. S. High-performance Fibres. Woodhead Publishing, 2001. pp. 329 ISBN 185573-539-3.
- HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110 s. Praha, 2004, ISSN 1212-2572.
- HUMÁR, A. and PÍŠKA, M. Analysis of Cutting Forces when Drilling Composites. In Proceedings of the XVI IMEKO World Congress IMEKO 2000, Volume III, Topic 3 - Measurement of Force, Mass and Torque. Austrian Society for Measurement and Automation, Vienna, Austria, 25.-28.9.2000, ISBN 3-901888-05-5, pp.97-102.
- HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Cutting Forces Analysis when Drilling Glass Fibre Reinforced Plastics. In Proceedings of the 31st International SAMPE Technical Conference, Volume 31, Advanced Materials & Processes Preparing for the New Millenium. McCormick Place, Chicago, Illinois, USA, ISBN 0-938994-85-9, October 26 -30, 1999, pp.276-285.
- HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Tool Life when Machining Glass Fibre Reinforced Plastic. In Proceedings of the 3rd International Scientific Conference "Development of Metal Cutting DMC2000", TU Košice, Slovensko, 3.- 4.7.2000, ISBN 80-7099-505-3, p.CZ8-CZ11.
- PISKA, M., HUMAR, A., POLZER, A., CIHLAROVA, P. Drilling of Glass Fibre Reinforced Plastics. In: Transfer 2003. Trenčianska universita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, Trenčín 2003, pp. 345-353. ISBN 80-8075-001-7.


Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 21.11.2013




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o výrobních technologiích uhlíkových kompozitních materiálů. V práci jsou popsány složky kompozitních materiálů a je také uveden stručný přehled různých druhů výroby. Detailně je rozebrána technologie pultruze. V poslední části práce byla provedena zkouška profilu tříbodovým ohybem.

Klíčová slova

Uhlíkové kompozitní materiály, technologie výroby, pultruze, zkouška tříbodovým ohybem, Prefa, s.r.o., 5M, s.r.o.

ABSTRACT

Bachelor's thesis is focused on manufacturing technology of carbon fibers composites. In the first part there is an introduction to the components of the composite materials and basic overview of the types of production. In the following part the topic of pultrusion is further discussed. In the last part is bending test run.

Key words

Carbon fibers composites, production technology, pultrusion, bending test run, Prefa,s.r.o., 5M s.r.o.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOUCHAL, P. *Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 41 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Technologie výroby a zpracování uhlikových kompozitů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Petr Bouchal

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc., za odborné vedení, směřování mých myšlenek, nápadů a za pomoc při mém samotném studiu.

Dále bych rád poděkoval společnosti PREFA KOMPOZITY, a.s., a společnosti 5M, s.r.o., za ukázkou a vysvětlení technologií.

Zároveň děkuji mé rodině, kolegům a blízkým, kteří při mě stáli při mém bakalářské studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD.....	9
1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU.....	10
1.1 Vlastnosti uhlíkových kompozitních materiálů.....	10
1.2 Rozdělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže	11
1.2.1 Roving	11
1.2.2 Vytuzující rohož	12
1.2.3 Tkanina.....	12
1.2.4 Povrchová rohož.....	12
1.3 Vlákna v uhlíkových kompozitních materiálech.....	13
1.4 Pryskyřice (matrice)	14
1.4.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice	14
1.4.2 Vinylesterové pryskyřice	15
1.4.3 Epoxidové pryskyřice.....	15
1.4.4 Fenolické pryskyřice	15
2 MOŽNOSTI VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, JEJICH TRENDY A INOVACE.....	16
2.1 Ruční kladení.....	16
2.2 Metoda vakuového prosycování	16
2.3 Vytvrzování v autoklávu.....	17
2.4 Navíjení	19
2.5 RTM- metoda lisování se vstřikem matrice.....	20
2.6 SMC- metoda lisování se vstřikem matrice.....	21
2.7 Pultruze	22
3 APLIKACE POZNATKŮ PRO NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY VYBRANÉ SOUČÁSTI.....	23
3.1 Uplatnění uhlíkových kompozitních materiálů.....	23
3.1.1 Automobilový průmysl	23
3.1.3 Sportovní potřeby	25
3.2 Pultruze v praxi	25
3.2.1 O společnosti Prefa Kompozity, a. s.	26
3.2.2 O společnosti 5M, s.r.o.	26

3.2.3	Technologie výroby pultruzní linky firmy Prefa Kompozity.....	26
3.2.3.1	Zásobník výztuží	26
3.2.3.2	Impregnační část.....	28
3.2.3.3	Tvarovací a vytvrzovací hlava	29
3.2.3.4	Tažná sekce.....	30
3.2.3.5	Řezná část	31
3.2.4	Testování mechanických vlastností	32
3.2.4.1	Zkouška ohybem	32
4	DISKUZE	38
5	ZÁVĚR	39
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	41

ÚVOD

V posledních desetiletích nastal celosvětový rozmach uhlíkových kompozitních materiálů s polymerní matricí vyztuženou vlákny. Tento druh materiálů nachází využití v různých průmyslových odvětvích. Nejčastěji tam, kde chceme dosáhnout nízké váhy a vysoké pevnosti (letecký průmysl, automobilní, sportovní pomůcky, apod.).

Uhlíkové kompozitní materiály mají dle názoru autora velkou budoucnost, svědčí o tom i situace na automobilovém trhu. Automobilky spouští sériově vyráběné vozy z uhlíkových kompozitních materiálů.

Téma této bakalářské práce si autor vybral, aby se lépe zorientoval a prohloubil své znalosti. Autor chce udělat jednoduchou příručku o nejčastějších výrobních metodách a poté se zaměřit na výrobu tyčového profilu technologie pultruze.



Obr. 1 Různé druhy uhlíkových kompozitních materiálů [1].

1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

Materiály z vláken lidé používají již mnoho let, aniž by je nazývali kompozitními. Příkladem mohou být například „vepřovice“ z hlíny a slámy. Sláma působí jako zpevňující složka, kyseliny z uvolněné slámy hlínu vytvrzují. Tyto „cihly“ mají vyšší pevnost oproti samotné nepálené hlíně.

Lidé jsou obklopeni kompozitními materiály. Například tkáně živočichů (svaly, cévy, kosti), dřevovláknité desky (lisované, lepené třísky či piliny), zubní výplně, protézy či povrch raketoplánu jsou vše složené materiály, kompozity. Keramika je tepelně odolná a kov velmi tažný (nikl, molybden, kobalt). Rozšířené jsou kompozity na bázi polymerů, matricemi jsou termoplasty nebo termosety a výztuhou je dřevo, sklo, uhlík, kevlar, hliník či bor. Poslední kategorie jsou kompozity na bázi kovů. Matricí je hliník, hořčík, titan či ocel. Výztuhou u této kategorie jsou vlákna uhlíku či bromu.

„První využití uhlíkových kompozitních materiálů je přičítáno Thomasi Edisonovi, který vynalezl vlákno žárovky [2].“ Avšak praktické komerční využití začalo až kolem roku 1950, kdy se rozvíjel kosmický průmysl. Mezi lety 1960 a 1970 uhlíková vlákna stoupla na popularitě. Celosvětová poptávka do roku 1980 byla přibližně 1000 tun za rok [3]. Bylo to způsobeno rychlým rozvojem leteckého průmyslu a také sportovního zboží. Do roku 2000 se vývoj výrazně zrychlil a cena se rapidně snížila.

1.1 Vlastnosti uhlíkových kompozitních materiálů

Rozmach kompozitů v posledních 20 letech je přičítán i skutečnosti, že vláknové kompozity jsou většinou vyráběny s konečným dílcem. Nejtradičnějším způsobem výroby je ruční kladení. Výztuž se kladena do formy, kde je následně prosycena pojivem.

V konstrukci kompozitů je velké množství možných kombinací výztuž/pojivo, mnoho různých technologií výroby a způsobů, jak docílit unikátní směsi. Tato variabilita dává konstruktérům „nový rozměr“ při navrhování výrobků.

Tyto nové konstrukční možnosti mohou být užitečné jen za předpokladu, že se konstruktér dostatečně seznámí s vlastnostmi, výrobou a možnosti montáže daného kompozitního materiálu. Mnohokrát se stává, že ocelový profil je konstruktérem zaměněn za uhlíkový kompozit. Taková chyba způsobuje, že mechanické vlastnosti kompozitu nejsou plnohodnotně využity, a ani z ekonomického hlediska tato chyba nikterak nepřispívá.

Hlavní výhody kompozitních materiálů:

- vynikající odolnost proti korozi v širokém spektru agresivních prostředí,
- nízká měrná hmotnost (4krát lehčí než ocel),
- snadná údržba,
- vysoká tvarová komplexnost relativně snadno dosažitelná,
- vynikající tepené a elektrické izolační vlastnosti,
- zanedbatelné ztráty elektromagnetického záření,
- snadné probarvení v objemu, snadné úpravy povrchu [3].

Jako nevýhodu lze brát nutnost vysoké přesnosti při výrobě, přesného poměru výztuže a matrice, vytvrzování a orientace vláken.

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže

V dnešní době na trhu existuje široké spektrum kompozitních materiálů, které se liší typem výztuží (rohože, tkanina, rouna,...), pojivem (pryskyřicí) a způsobem výroby (tažení, navíjení, RTM,...). Jedno z nejrozšířenějších rozdělení kompozitů z hlediska typu výztuže je 3D prostorové uspořádání výztuže.

1.2.1 Roving

Jde o formu výztuže, kde jsou nekonečná vlákna bez krutu. Společným znakem je pramenec tvořený individuálními vlákny navinutý na cívku. Nejčastěji se tato forma používá pro technologii pultruze [3].



Obr. 2 Ukázka role rovingu [18].

1.2.2 Vyztužující rohož

Jedná se o netkanou rohož z nasekaných rovingů (krátká a středně dlouhá vlákna). Je slabě naimpregnovaná pryskyřicí a poté tepelně slisovaná do ploché rohože. Maximální obsah vláken v této formě je prostorově limitovaný [3].

1.2.3 Tkanina

Jde o stejný způsob jako při výrobě běžné textilie. Výrobky mají různou plošnou hmotnost a jsou tkány různými způsoby. Velkou výhodou je větší obsah vláken (vyšší pevnost a tuhost) [3].

1.2.4 Povrchová rohož

Oproti tkanině má velmi jemnou strukturu a nízkou plošnou hmotnost. Většinou slouží k estetickým účelům. Zvyšuje odolnost proti vnějším vlivům a zajišťuje maximální ochranu proti nepříznivému počasí [3].



Obr. 3 Dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže [5].

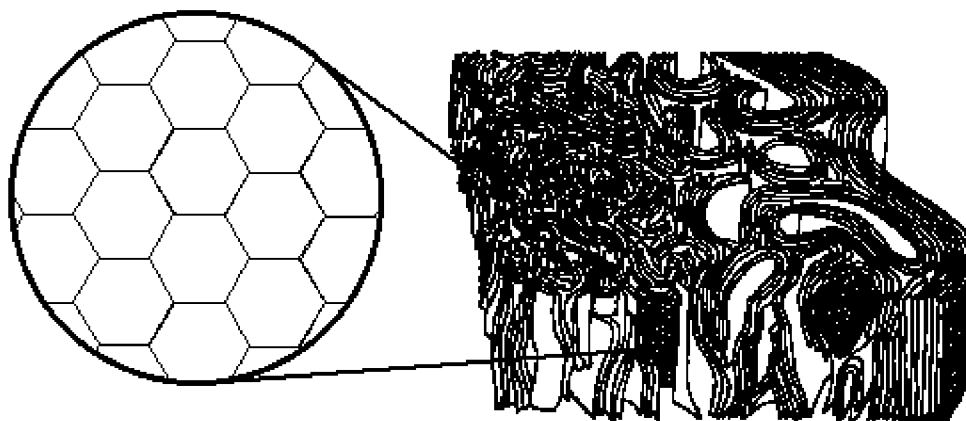
1.3 Vlákna v uhlíkových kompozitních materiálech

Rozmach vláknových výztuží proběhl především v 60. a 70. letech, kdy byla představena první komerční uhlíková vlákna (vysoký modul pružnosti až 600 GPa).

Během konce 70. let se objevila na trhu i další vlákna, která mají vysoký modul pružnosti v tahu (120 až 190 GPa) a navíc nejsou křehká. Jedná se především o aramidová vlákna (obchodně nazývaná KEVLAR) či vlákna v Evropě obchodně nazývaná DYNEEMA a US SPECTRA.

V uhlíkových vláknech se pojí vysoká pevnost, modul pružnosti a tepelná odolnost s nízkou měrnou hmotností. Po stránce specifické pevnosti a modulu pružnosti (na jednotku hmotnosti) je překonávají pouze monokrystaly (whiskery) Al_2O_3 . Uhlíková vlákna se vyrábějí z viskóзовých nebo lyakrylonitrilových (PAN) vláken a alternativně i z tzv. anizotropní smoly (pitch) zvlákňované v tavenině.

Prvním výrobním krokem přípravy uhlíkových vláken (C-vlákna) je karbonizace primárního vlákna, při níž se surovina nesmí roztavit a zreagovat na nedefinované produkty. Proto se například zvlákněné smoly zesítují opatrným naoxidováním do netavitelného termosetu. Zvláknování probíhá pod napětím, aby se v případě zvláknování ze smoly vytvořila orientace molekul ve směru osy vlákna. Čím je tato orientace dokonalejší, tím má vlákno vyšší modul pružnosti a pevnost. Z materiálového i energetického hlediska jsou výhodnější suroviny, které dávají karbonizaci vyšší výtěžky: Viskóзовá vlákna dávají asi 15 – 20%, akrylonitrilová až 55% a ze smol bývá výtěžek až 80% hmoty výchozích látek. Technologie výroby uhlíkových vláken je relativně komplikovaná a v dnešní době ji kvalitně zvládá ve větším měřítku pouze několik málo firem.



Obr. 4 Struktura uhlíkového vlákna [4].

Uhlíková vlákna se většinou z praktických důvodů dělí podle hodnot modulu pružnosti a pevnosti. Vlákna získaná při 900°C až 1500°C jsou pevnější, nazývají se vysokopevnostní uhlíková vlákna (označovaná HS = „high strength“). Tato vlákna jsou levnější než následující vysokomodulová vlákna. Další karbonizací HS vláken při teplotě 2000°C až 2800°C se získají vlákna grafitová, která mají menší tahovou pevnost, ale vynikají vyšším modulem pružnosti v tahu (vysokomodulová vlákna = HM = „high modulus“).

Význam uhlíkových vláken neustále stoupá. Jejich cena je však např. v porovnání se skleněnými desetinásobná až stonásobná. Vzhledem k jejich vlastnostem však lze očekávat neklesající zájem o výrobky z nich zhotovené. V současné době je kapacita evropských výrobců dlouhodobě vyprodána [3].

Tab. 1.3 Vlastnosti některých druhů vláken [3].

Vlákno	Uhlíkové	Skleněné	Ocelové
Průměr [μm]	7- 10	12- 20	13
Hustota [kg.m ⁻³]	1,6	2,5	7,87
Pevnost v tahu [GPa]	2,5- 3,5	3,5	4,2
Modul pružnosti [GPa]	250- 300	70-85	210
Teplota tání [°C]	3650	700	1400

1.4 Pryskyřice (matrice)

Prvním krokem přípravy kompozitních materiálů je určení prostředí, v němž bude výrobek pracovat (vlastnosti, oblast aplikace, druh namáhání, atd.). Poté jsou zvoleny vhodné komponenty (výztuž a matrice). Má-li účinnost výrobku přinést výhody, je třeba navrhovat (konstruovat) složení kompozitů tak, aby bylo dosaženo jejich optimálního spolupůsobení a potřebné životnosti.

V současné době se jako matrice převážně používají termosety, v malé míře i matrice termoplastické. Nejpoužívanější jsou nenasyčené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP) a fenolické pryskyřice (PR). Z celkového objemu pryskyřic jsou celosvětově 75 % nenasyčené polyestery, 20 % vinyl estery a 5 % speciální pryskyřice.

Jeden z největších problémů rozšíření termoplastů je velká viskozita taveniny při zpracování. Pohybuje se 2 až 4 krát výš než u běžných termosetů. Tím mohou vznikat nesmočené prameny vláken, bubliny, atd. Pro odstranění tohoto problému můžeme jako vstupní materiál použít termoplastem neimpregnovaná vlákna. Samotná úprava je ale finančně nákladná.

Tab. 1.4 Vlastnosti nejčastěji používaných organických matic [3].

Matrice	Hustota	Modul pružnosti v tahu	Pevnost v tahu
	[g.cm ⁻³]	[GPa]	[MPa]
Termosety	1,1 - 1,67	1,3 - 6	20 - 180
Epoxy	1,1 - 1,4	2,1 - 6	35 - 90
Polyestery	1,1 - 1,5	1,3 - 4,5	45 - 85
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50 - 60
Polyamidy	1,2 - 1,9	3 - 3,1	80 - 190

1.4.1 Nenasyčené polyesterové pryskyřice

Rozpouštědlem je nejčastěji styren. Aby reakce probíhala s technologicky přijatelnou rychlostí, je nutno vytvrzování provádět za zvýšené teploty. Teplota

vytvrzování je dána typem použitého iniciátoru. Iniciátory se od sebe liší právě teplotou, při níž je jejich rozpad maximální.

1.4.2 Vinylesterové pryskyřice

Jsou určeny pro náročnější aplikace, hodí se do chemicky náročného prostředí a pro kompozity velkého mechanického namáhání. Tyto pryskyřice se výborně osvědčily při stavbě nádrží, podzemních zásobníků, zpracování ropy či při konstrukci domácích plaveckých bazénů.

1.4.3 Epoxidové pryskyřice

Jsou rozšířené v lepidlech, lisovacích hmotách. Polymerní smrštění je malé (kolem 2 %). Jsou vhodné jak na přesné díly (malá tolerance), tak pro výrobu velkých dílců. Po vytvrzení mají dobré mechanické a elektrické vlastnosti. Disponují také dobrými elektroizolačními vlastnostmi v široké oblasti teplot, jsou velmi dobře odolné proti vodě, rozpouštědlům a kyselinám.

1.4.4 Fenolické pryskyřice

Jedná se o termosety s vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. Při vytvrzování dochází k uvolňování amoniaku, a proto se tomuto typu pryskyřice říká dvoustupňový. Pro zvýšení hustoty sítě se „dopéká“ za zvýšené teploty (170 až 180 °C) po dobu 10 až 20 hodin. Možno skladovat po relativně dlouhou dobu (1 až 3 roky při max. 25 °C a relativní vlhkost 50 %).

2 MOŽNOSTI VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ, JEJICH TRENDY A INOVACE

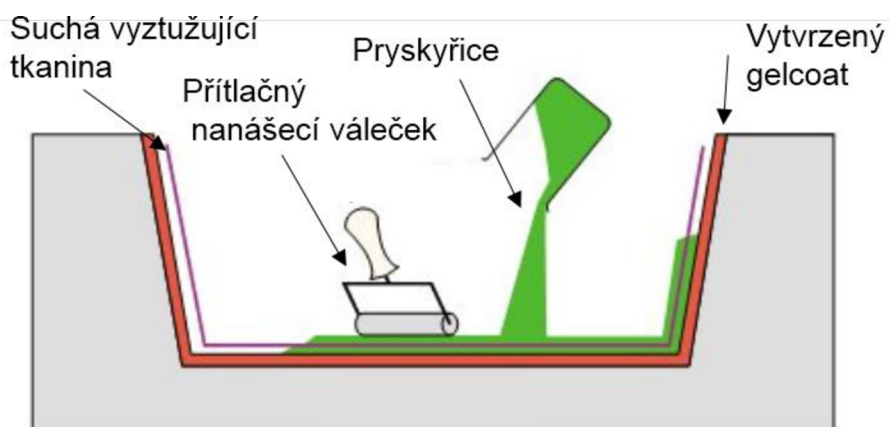
Existuje velké množství výrobních technologií. V podkapitolách jsou popsány nejrozšířenější metody.

2.1 Ruční kladení

Ruční kladení patří k nejstarším metodám výroby kompozitních materiálů. Nanášení pryskyřice i výztuže je prováděno ručně. Kvalita povrchu vyrobeného dílce je dobrá pouze z jedné strany. Tento fakt je omezující při návrhu výrobků metodou ručního kladení. Po položení výztuže a následném nasycení pryskyřicí je výrobek připravený k volnému vytvrzení.

Fáze výroby:

- povrchová úprava formy separačním činidlem,
- katalyzovaná pryskyřice,
- výztuž,
- další vrstva pryskyřice, ta je válečkem vtlačena do výztuže a přitom vytlačeny vzduchové bubliny,
- vytvrzení v klidu [3].



Obr. 5 Schéma ručního kladení [7].

Benefity ručního kladení jsou jednoduchost výroby, minimální náklady na nástroje, neomezená variabilita tvarů a velikostí.

Jedna z hlavních nevýhod je velké množství nerecyklovatelného odpadu. Jen velmi těžko jej můžeme znovu zpracovat. Další nevýhodou je dlouhý výrobní čas. Kvalita výrobku do velké míry závisí na zkušenostech pracovníků.

Nejčastější využití této metody je v lodním průmyslu.

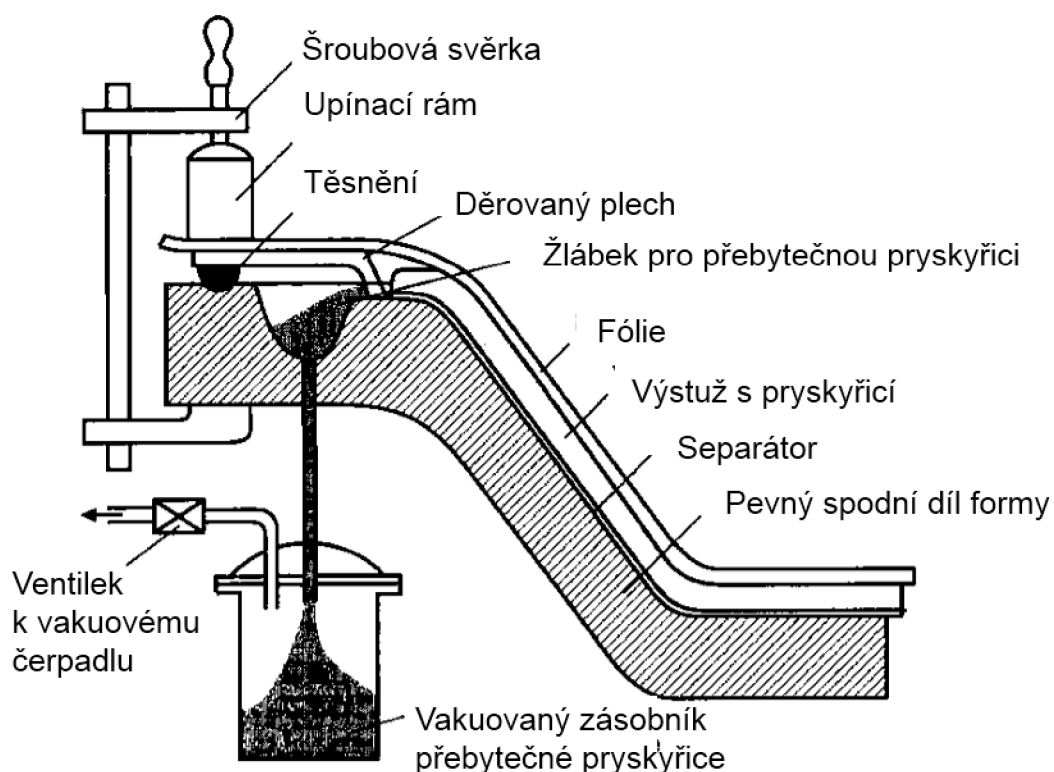
2.2 Metoda vakuového prosycování

Tato metoda je vylepšením metody ručního kladení. V poslední fázi vytvrzení je na povrch položený tenký film nepropouštějící vzduch. Forma je vakuována a tlakem

filmu dojde k vytlačení přebytečných bublin. Kroky při výrobě metodou vakuového vaku je:

- ruční nakládání,
- film je položen přes volný povrch kompozitního dílce,
- prostor formy je vakuován,
- film je ručně dotlačen na kompozit, přebytečný vzduch vytlačen,
- vytvrzení FRC,
- film je stržen a výrobek dokončen [3].

Benefitem této metody je možnost připravit materiál s minimálními bublinami vzduchu. Většina výhod ručního kladení zůstává, metoda je vynikající pro sendvičové struktury.



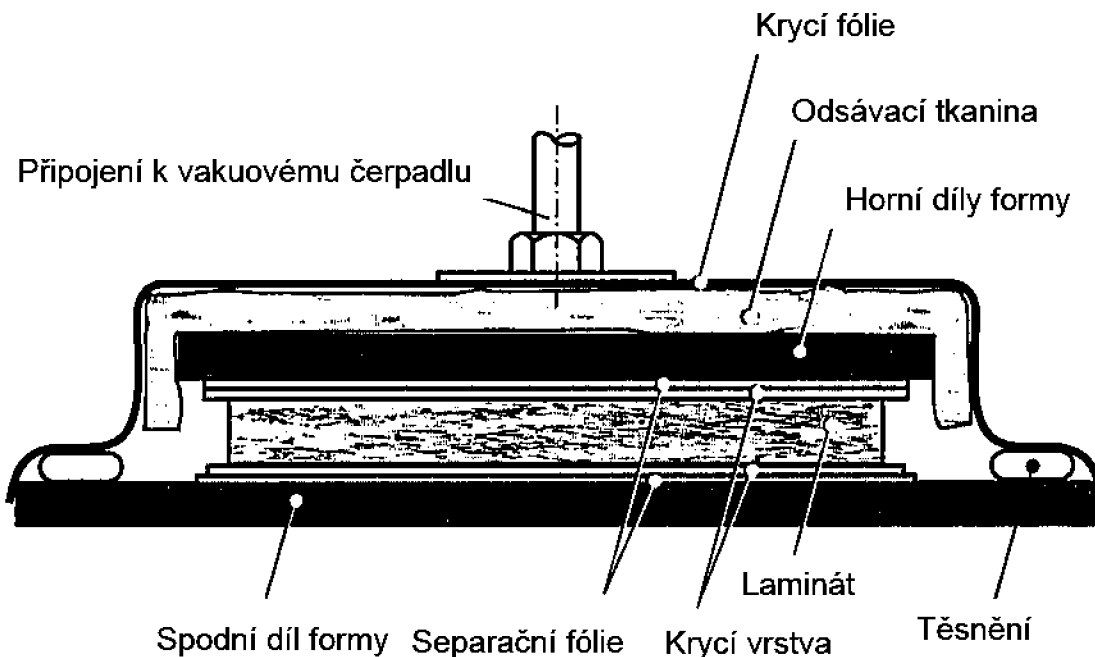
Obr. 6 Nízkotlaká (Vakuová) technologie, používající jednoduchou formu [10].

Kvalita výroby záleží na zručnosti a zkušenostech pracovníků. Výrobky zhotovené touto metodou jsou dražší, a proto se používají převážně v případech, jež vyžadují kvalitu vlastností a kde cena hraje vedlejší roli. Například to mohou být letecké součásti či závodní speciály.

2.3 Vytvrzování v autoklávu

Metoda autokláv je vylepšená technologie vakuového prosycování. Vytvrzování probíhá v uzavřené nádobě pod tlakem a teplem. Proces:

- příprava laminátu ve formě,
- přesnost takto připraveného výrobku do autoklávu,
- díky teplu a tlaku je v autokávu kompozit vytvrzen,
- výrobek je vyndán, vakuový pytel stržen a výrobek dokončen [3].



Obr. 7 Lisování v autoklávu [10]

Existuje možnost, že v jednom kroku může být vytvrzeno více součástí.

Mezi nevýhody lze počítat vysoké pořizovací náklady, metoda je velmi pracná a velikost dílů je omezena velikostí autoklávu. Metoda produkuje velké množství odpadu, formy jsou relativně drahé.

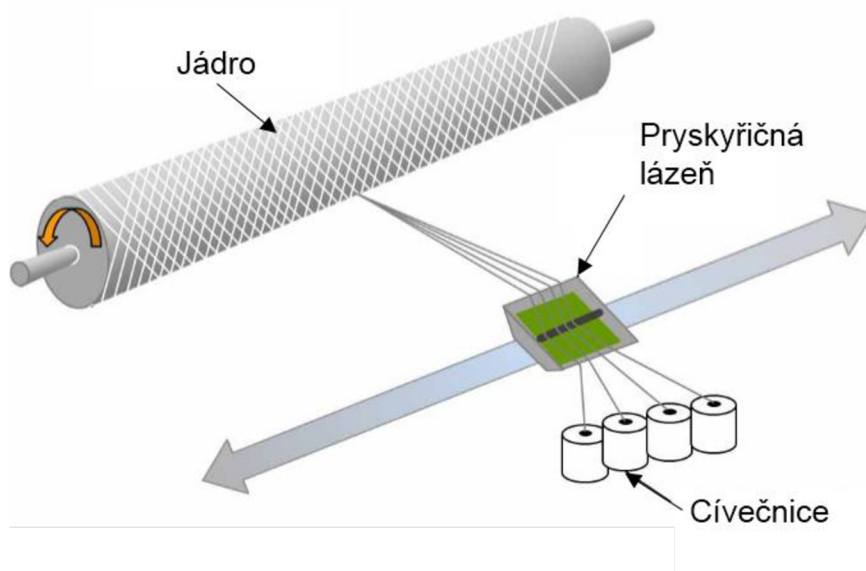
Typické uplatnění této metody je v leteckém průmyslu.

2.4 Navíjení

Technologie navíjení je založena na navíjení nepřetržitého pramene uhlíkových vláken impregnovaných pryskyřicí na otáčející se vřeteno. Díky této metodě je možné přesně uspořádat a orientovat vlákna a tím dosáhnout přesných požadovaných parametrů.

Postup technologie:

- do rotačního zařízení je upnuto jádro, které je buď vyjímatelné nebo se po skončení procesu stane součástí výrobku,
- jsou navinuty výztuže za předem naprogramovaného předpětí, složení, orientace atd.,
- kompozit se „dopéká“ i s jádrem, kde se vytvrzuje při neustálé rotaci [3].



Obr. 8 Schéma navíjecího stroje [6].

Výhodou je možnost použití nejlevnější formy výztuže, rovingu. Tento proces může být velmi snadno automatizován. Technologie se používá pro výrobu trubek, kolen a dalších velkých dutých součástí. Často se využívá pro lyžařské hůlky, rybářské pruty atd.

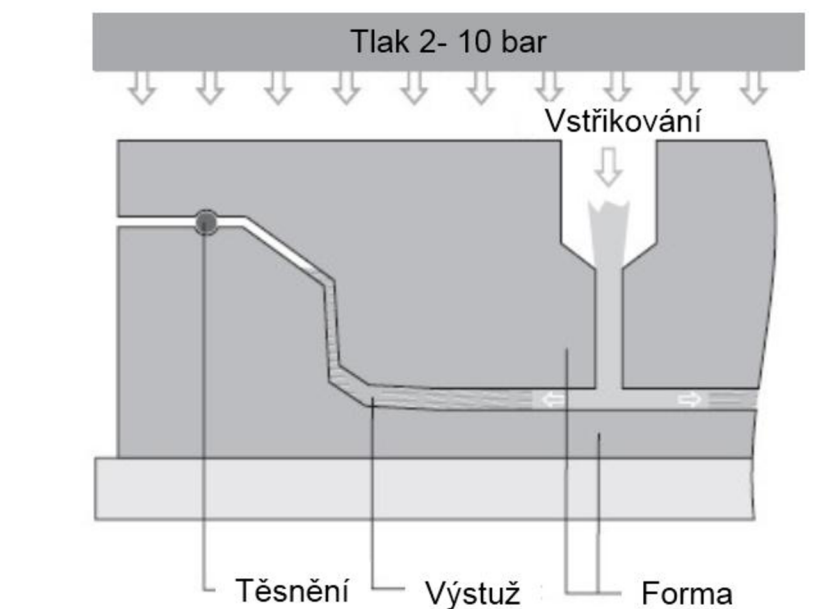
Mezi nevýhody lze zařadit velkou pořizovací cenu strojů.

2.5 RTM- metoda lisování se vstřikem matrice

Metoda pracuje s uzavřenou formou. Do dutiny formy je umístěna tkanina a následně vpuštěna pryskyřice pod tlakem. Forma má pokojovou teplotu. Dutina je případně vyhřívána na 40- 60 °C.

Postup výroby:

- obě strany formy jsou navoskovány,
- do formy je vložena suchá výztuž,
- do uzavřené formy je vstříknuta pryskyřice pod tlakem, poté pryskyřice po naplnění formy začne vytékat odtokovými otvory ven,
- forma je uzavřena po dobu vytvrzení,
- forma je otevřena a díl vytažen [3].



Obr. 9 Schématické znázornění vysokotlakého RTM [11].

Tato metoda umožňuje výrobu dílu, který má obě strany pěkné. Povrch lze barevně upravit. Protože výroba probíhá za pokojových teplot, lze použít nástroje z plastu.

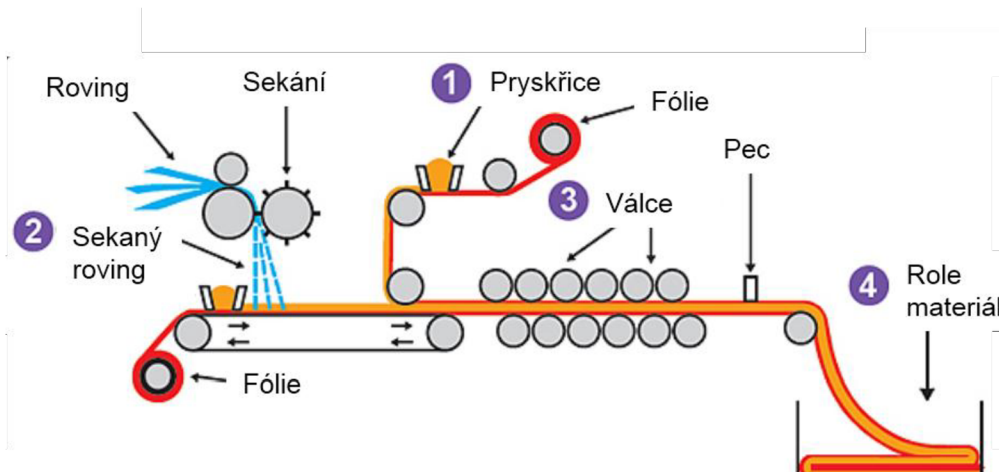
Těžké kovové formy jsou považovány za značnou nevýhodu této metody.

2.6 SMC- metoda lisování se vstřikem matrice

SMC- Sheet molding compound využívá vlastností dlouhých vláken 2 až 50 mm. Tato metoda je vhodná pro velké série [7].

Kroky výrobního postupu:

- pryskyřice, modifikátory a plniva jsou smíchány a naneseny na rohož z výztuže,
- je nanесena další vrstva a poté z obou stran jsou přiloženy fólie,
- sendvič projde válci a pryskyřice je vtačena do rohože,
- pás je protažen pecí, případně se nechá uležet, tím se zahájí reakce (hutnění materiálu),
- transport probíhá v rolích k uživateli [3].



Obr. 10 Schéma linky na výrobu technologie SMC [9].

Výhody jsou vysoká produktivita (automobilový, letecký průmysl, atd.) a možnost vyrábět materiály o různých tloušťkách. Není potřeba kvalifikovaný personál.

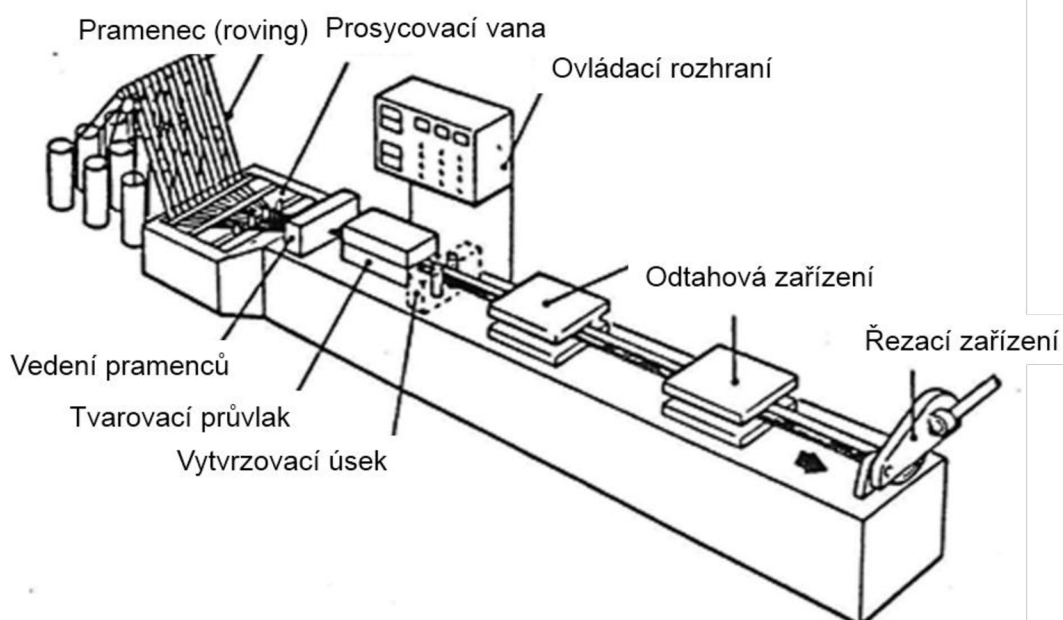
Mezi nevýhody lze zařadit vysoké ceny strojů, nástrojů a forem. Každá úprava výrobku zabere poměrně hodně času a peněz. Tato metoda je výhodná pro velké série od 20 000 kusů.

2.7 Pultruze

Tento výrobní postup je založen na tažení svazků vláken pryskyřičnou lázní, kdy dochází k prosycení výztuže. V dalším kroku je výztuž tvarována do požadovaného průřezu. Kompozit je vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě.

Kroky výrobního postupu:

- soustava svitků vláken je tažena s předepsaným napětím,
- výztuž je tažena do pryskyřičné lázně,
- vstup do prostoru, kde proběhne tvarování a vytvrzování,
- za vytvrzovací hlavou je prostor, kde se odkládá a následně řeže profil [3].



Obr. 11 Schéma linky na tažení (pultruzi) [12].

Výhodou je rychlost, dobré mechanické vlastnosti, neomezené tvary průřezu profilu a minimální nároky na lidskou práci.

Nevýhodou jsou značné investice na pořízení technologie a drahý provoz.

3 APLIKACE POZNATKŮ PRO NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY VYBRANÉ SOUČÁSTI

Třetí kapitola obsahuje přehled uplatnění, ve kterých se využívá uhlíkových kompozitních materiálů. Tato kapitola dále obsahuje detailnější náhled na technologii pultruze.

3.1 Uplatnění uhlíkových kompozitních materiálů

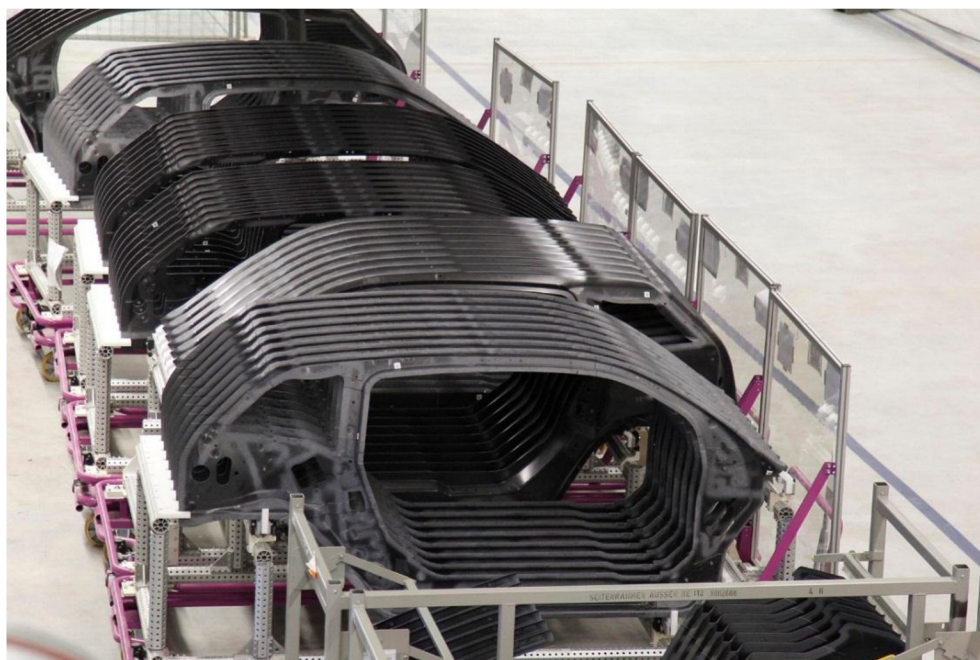
Výborné mechanické vlastnosti uhlíkových kompozitních materiálů jsou vyvážené cenou. I přes tento fakt si uhlíkové kompozitní materiály najdou zákazníky téměř ve všech průmyslových odvětvích, kde je zapotřebí vysoká pevnost, tuhost a nízká váha. Největší využití lze pozorovat u plachetnic, špičkových jízdnicích kol, motocyklů či automobilů. Moderní technologie se snaží snižovat váhu. Kompozitní materiály můžeme vidět i na obráběcích nástrojích, přenosných počítačích, strunných nástrojích či golfových holích.

3.1.1 Automobilový průmysl

Uhlíkový kompozitní materiál je značně používán u moderních luxusních vozidel, kde jsou vysoké náklady vykompenzovány bezkonkurenčními vlastnostmi materiálu. Největší uplatnění je u závodních vozidel, kde je potřeba vysoká pevnost a nízká váha.

Do nedávna materiál nebyl moc obvyklý pro sériovou výrobu z důvodu vysokých cen surovin. V poslední době několik tradičních výrobců začalo používat výrobky v každodenních silničních vozidlech.

V roce 2013 se BMW stala první firmou, která přišla na trh s velkosériovou produkcí aut, v nichž jsou používány ve velké míře uhlíková vlákna. Model i3.



Obr. 12 Ukázka sériové výroby vozů BMW i3 [13].

3.1.2 Letecký průmysl

V leteckém průmyslu se využívají uhlíkové kompozity také ve velké míře, protože jsou lehké a mají dobrý poměr maximálního napětí v tahu s váhou.

Například letadlo Airbus A350 XWB je z 52 % postaveno z kompozitních materiálů (trup a křídla) [14].



Obr. 13 Montáž komponentů na letadle Airbus A350 XWB [15].

3.1.3 Sportovní potřeby

Nízká váha a vysoká pevnost jsou hlavními parametry popularity využití uhlíkových kompozitních materiálů u sportovních potřeb. Nejvíce lze vidět tyto materiály v cyklistice, na golfových či hokejových holích nebo tenisových raketách.

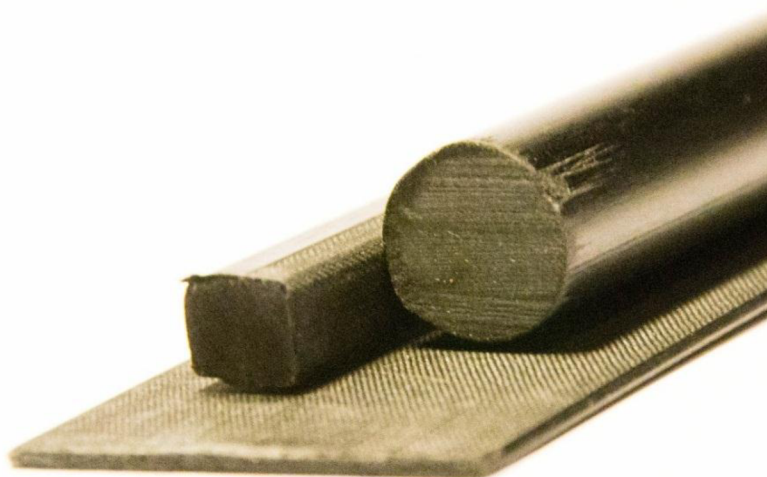


Obr. 14 Golfová hůl firmy Callaway vyrobená z „Forged composites“ [18].

3.2 Pultruze v praxi

V kapitole 2.7 byla popsána technologie pultruze velmi obecně, nyní bude postup výroby rozepsán detailněji. Jak je výše zmíněno, díky této technologii výroby kompozitních materiálů je možné vyrábět různé profilované tyče.

Společnost 5M, s.r.o., věnovala autorovi profily vytvořené pultruzí k testování na mechanické vlastnosti. Společnost Prefa Kompozity, a. s., mu poskytla čas a detailní ukázkou výroby.



Obr. 15 Ukázka profilů od společnosti 5M s.r.o. [21].

3.2.1 O společnosti Prefa Kompozity, a. s.

Společnost PREFA KOMPOZITY, a.s. vyrábí kompozitní profily a polotovary (FRC, FRP, GFK). Z nich sestavuje výrobky a konstrukce určené především jako součást a příslušenství staveb ve všech průmyslových oblastech, především ve vodním hospodářství, energetice, chemickém a dopravním průmyslu.

Využívají různých technologií: pultruze, ovíjení, lití do formy, ruční laminování či SMC.

Společnost je inovativní a velmi úzce spolupracuje s Vysokým učením technickým v Brně. Získala mnoho ocenění například v soutěži Inovace roku.



Obr. 16 Logo společnosti Prefa Kompozity a. s. [19].

3.2.2 O společnosti 5M, s.r.o.

Společnost 5M s.r.o. podniká v oboru kompozitů a sendvičů. Zabývá se vývojem a výrobou těchto materiálů i konečných výrobků. Orientují se především na speciální a náročné aplikace. Každý rok přichází na trh minimálně se dvěma novými výrobky či podstatnými inovacemi. Většina výrobků pochází z vlastního vývoje, popřípadě vychází ze spolupráce s výzkumnými ústavy nebo univerzitami.

Společnost je držitelem mnoha tuzemských i zahraničních ocenění.



Obr. 17 Logo společnosti 5M [20].

3.2.3 Technologie výroby pultruzní linky firmy Prefa Kompozity

V následující kapitole se objeví popis technologie výroby pultruzní linky firmy Prefa Kompozity, která autorovi pro účely zpracování této bakalářské práce umožnila prohlídku výrobní haly.

3.2.3.1 Zásobník výztuží

Tato sekce je jednou z nejdůležitějších součástí celé technologie. Často se jedná o „know-how“ konkrétní firmy, stejně tak tomu je v případě společnosti Prefa Kompozity. Jednoduché profily jsou vyztuženy pouze jednosměrnými svazky vláken (roving) ve směru hlavní osy. Vzájemné prostorové uspořádání rovingu v rámci profilu pak určuje charakter deformačního chování.

Zásobník výztuží se skládá z různých stojanů pro svitky. Svitky jsou ve stojanech umístěny buď vodorovně nebo vertikálně.

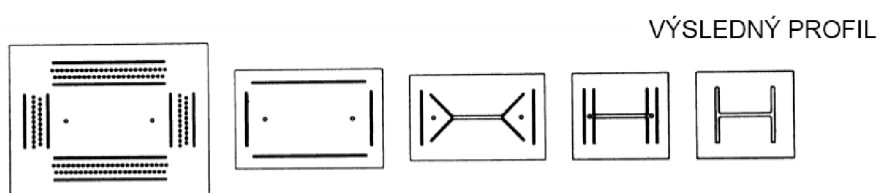


Obr. 18 Zásobník výztuží, společnosti Prefa Kompozity, a. s. [21].

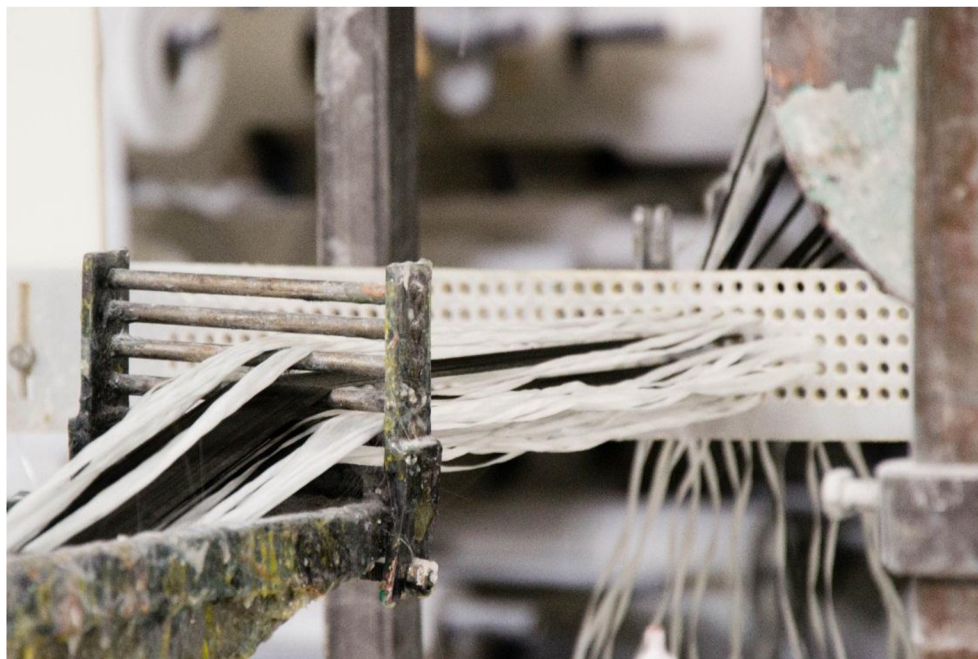


Obr. 19 Zásobník výztuží, společnosti Prefa Kompozity a. s. [21].

Naváděcí zařízení pro roving je většinou kolmé na směr tažení vláken. Většinou se jedná o desky, které by měly být navrženy tak, aby neznehodnocovaly tažené vlákno. Při znehodnocení vlákna se mohou zhoršit mechanické vlastnosti taženého profilu, hrozí i případné ucpání otvoru na naváděcích deskách porušenými vlákny. Soubor používaných naváděcích desek se obvykle liší podle typu profilu.



Obr. 20 Postup naváděcí desky při složitějším profilu [8].

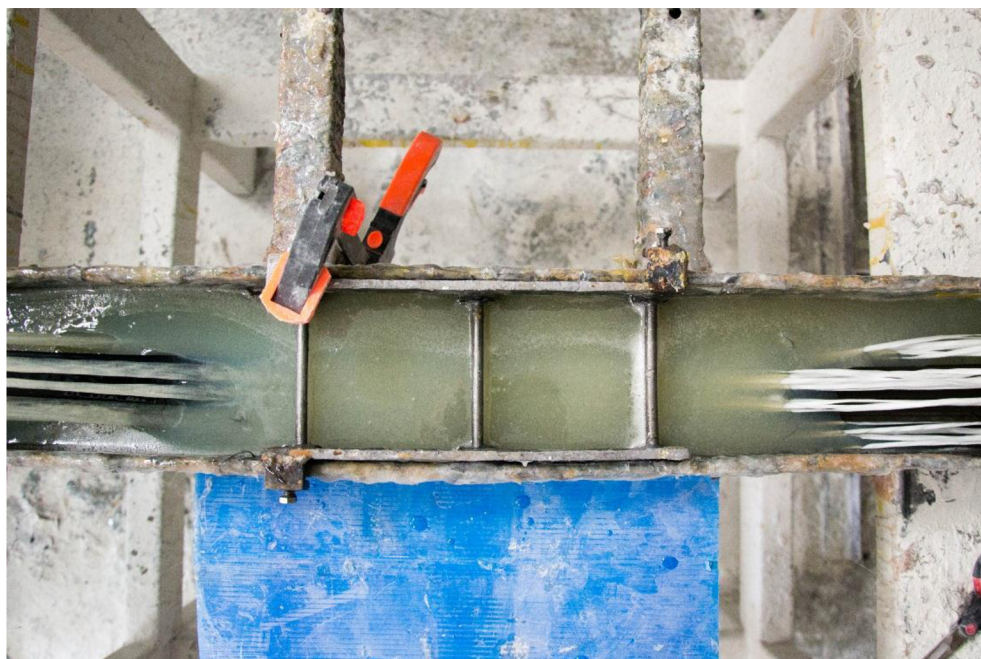


Obr. 21 Naváděcí zařízení společnosti Prefa Kompozity a. s. [21].

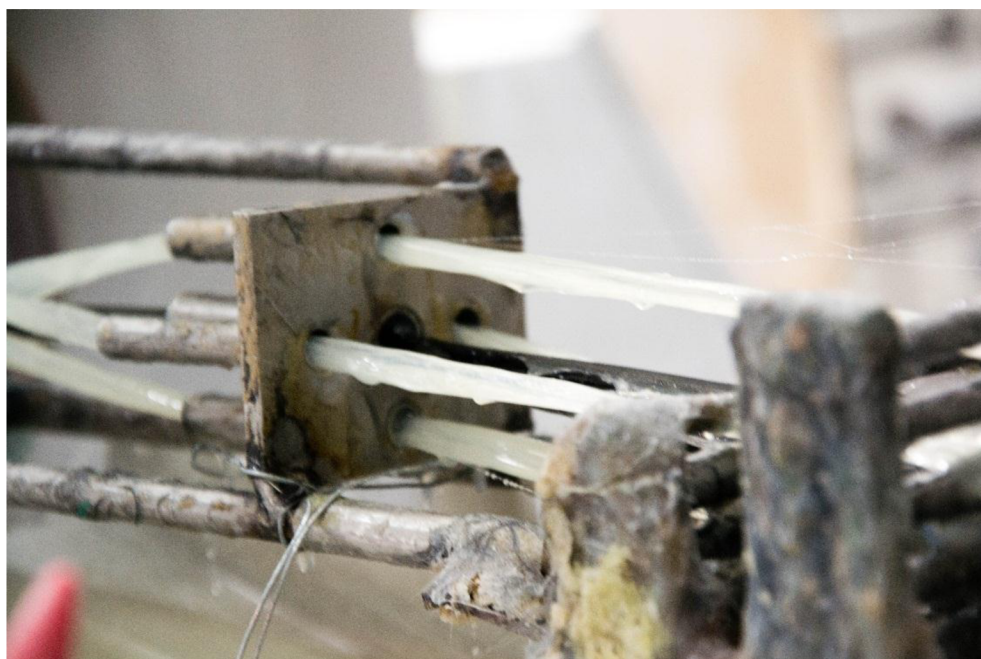
3.2.3.2 Impregnační část

Namočení výztuže v pojivu (pryskyřici) je dalším krokem výrobního postupu u pultruze. Při špatné impregnaci může dojít ke zhoršení mechanickým vlastnostem kompozitu, snížení odolnosti proti agresivnímu prostředí, případně ke zhoršení výsledného povrchu požadovaného profilu.

Většinou se vede předformovaná výztuž z naváděcí sekce do otevřené lázně obsahující pryskyřici a další aditiva (UV inhibitory, retardanty hoření, barviva, apod.). Lázeň je mnohdy vyhřívána, což vede k vyšší viskozitě pryskyřice a lepšímu průniku pryskyřice do celého objemu namáčených vláken.



Obr. 22 Smáčení vláken v polymerní lázni, společnost Prefa Kompozity a. s. [21].



Obr. 23 Naváděcí zařízení po smáčení, společnost Prefa Kompozity a. s. [21].

3.2.3.3 Tvarovací a vytvrzovací hlava

Na vytvrzování pryskyřice je celá technologie založena. Pouze omezené množství pryskyřic má tuto vlastnost. Tažný profil by měl být vytvrzen na délce 0,3 až 1,6 m

a vytvrzovací hlava by měla obsahovat 1 až 4 teplotní zóny. Konkrétní počet zón závisí na mnoha parametrech (typ pryskyřice, požadovaná průchodnost linky, délka tvarovací hlavy, apod.). Vytvrzovací hlava je většinou složena ze dvou dílů s leštěným povrchem. Cena vytvrzovací hlavy je mnohonásobně nižší než formy pro vstřikovací lisu.

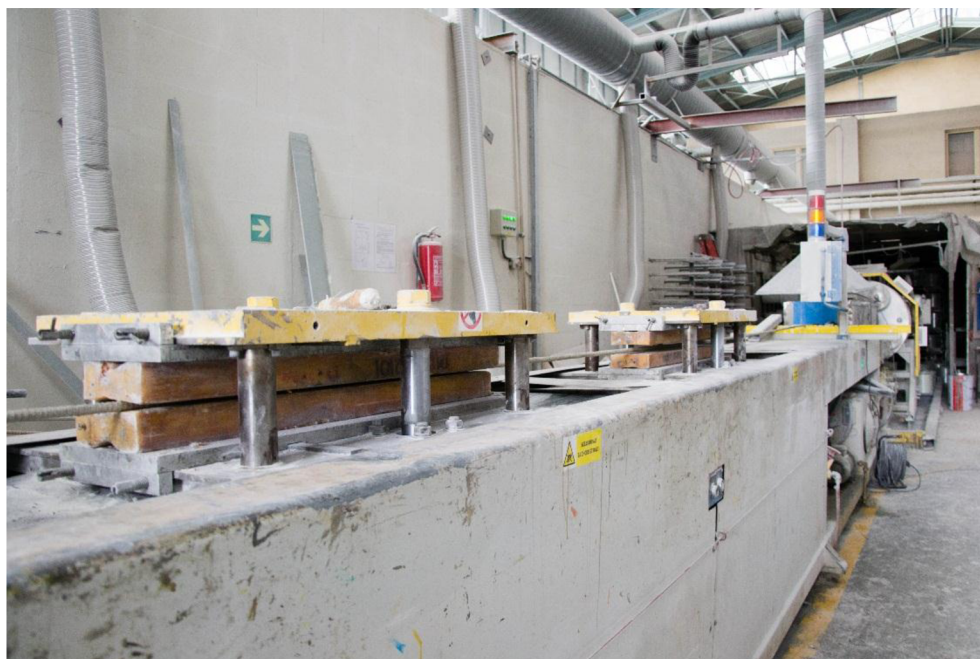


Obr. 24 Názorná ukázka vytvrzovací hlavy [22].

3.2.3.4 Tažná sekce

Celá technologie je pojmenovaná podle této sekce. Je složena ze zařízení, které kontinuálně táhne vytvrzený profil, tím zajišťuje i pohyb výztuže přes impregnační, tvarovou a vytvrzovací část. Obvykle má mechanismus 2 bloky. V době, kdy je čelist prvního bloku sevřena a táhne profil, se druhý blok vrací s otevřenou čelistí do své výchozí polohy. Když se první blok dostane do koncové polohy, jeho čelisti se otevřou. Zároveň se zavřou čelisti druhého bloku, který se začne pohybovat ze své výchozí polohy ve směru tažení, zatímco se první otevřený blok vrací do počáteční polohy.

Vzdálenost mezi oběma pásy je variabilní, stejně tak i tlak působící na tažený profil [3].



Obr. 25 Naváděcí zařízení ve společnosti Prefa Kompozity a. s. [21].

3.2.3.5 Řezná část

Závěrečná část pultruderu slouží k rozdělení taženého profilu na požadovanou délku. K řezání se obvykle používá ruční elektrická kotoučová pila s ostřím, které je pokryto diamantovým práškem. Většinou tento úsek obsahuje i odsávání, protože při řezání se uvolňují mikroskopické části vláken.

3.2.4 Testování mechanických vlastností

Uhlíkové kompozitní materiály lze testovat na mechanické vlastnosti mnoha způsoby:

- zkouška tahem rovnoběžně se směrem vláken dle ČSN EN 2561,
- zkouška tahem kolmo na směr vláken dle ČSN EN 2597,
- stanovení smykové pevnosti mezi vrstvami podle ČSN EN 2563,
- zkouška ohybem ve směru vláken dle ČSN EN 2562.

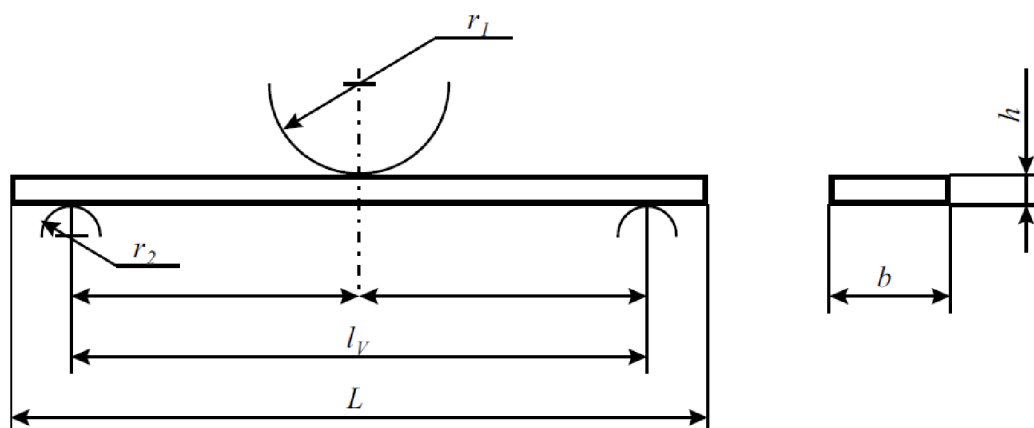
Autor této bakalářské práce se soustředí na smluvní zkoušku ohybem ve směru vláken dle ČSN EN 2562, kde provedl testy na 2 profily.

3.2.4.1 Zkouška ohybem

Tato kapitola přiblíží čtenáři normu ČSN EN 2562.

a) Teoretický rozbor měření

Zkouška ohybem spočívá v měření průhybu pod středním zatěžovacím trnem v závislosti na působícím zatížení konstantní rychlostí posuvu až do okamžiku poruchy vzoru. Poměrná deformace ve směru rovnoběžném s vlákny je vypočtena jako závislost na působícím napětí.



Obrázek 1

Obr. 26 Schéma zkoušky ohybem [23].

Působící zatížení bylo aplikováno, aby rychlost posuvu byla konstantní a to $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro oba testované vzorky.

Byla zaznamenávána síla P_R po celou dobu zatěžování a dále průhyb f ve středu vzorků.

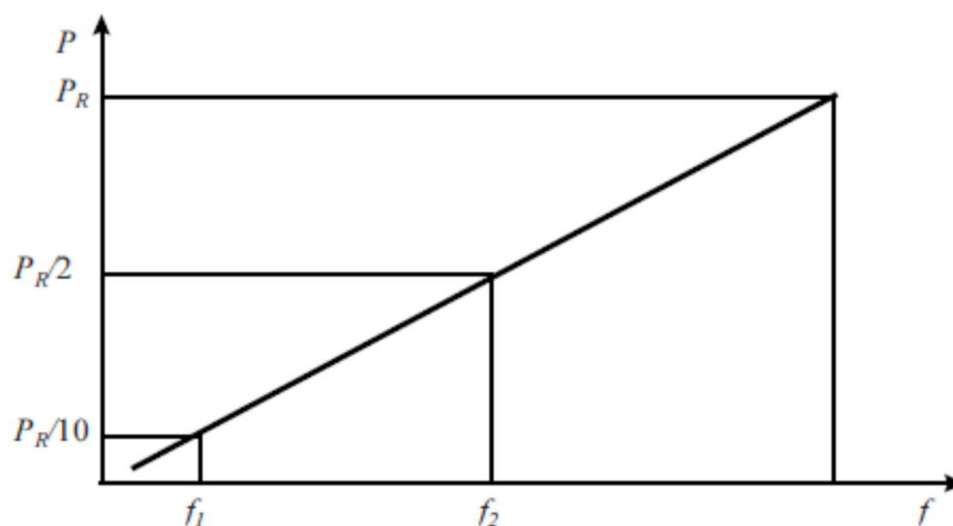
Výpočet a vyjádření výsledků:

- mez pevnosti v ohybu σ_b ,

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot P_R \cdot l_V}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3.1)$$

- modul pružnosti v ohybu E_b (MPa) mezi $P_R/10$ a $P_R/2$,

$$E_B = \frac{P_R \cdot l_V^3}{10 \cdot b \cdot h^3 - (f_2 - f_1)} \quad (3.2)$$



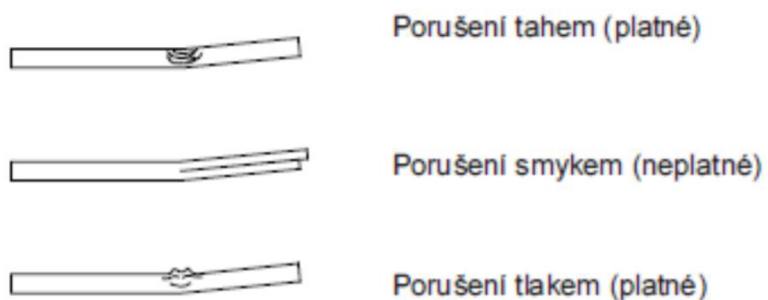
Obr. 26 Schéma pro znázornění $P_R/10$ a $P_R/2$ [23].

- deformace ohybem ϵ_1 .

$$\epsilon_1 = \frac{6 \cdot f \cdot h}{l_V^2} \quad (3.3)$$

Zkušební těleso je zkoušeno při dostatečně velkém rozpětí podpor, aby nedošlo k poruše smykem a aby bylo možno zanedbat deformace způsobené namáháním ve smyku.

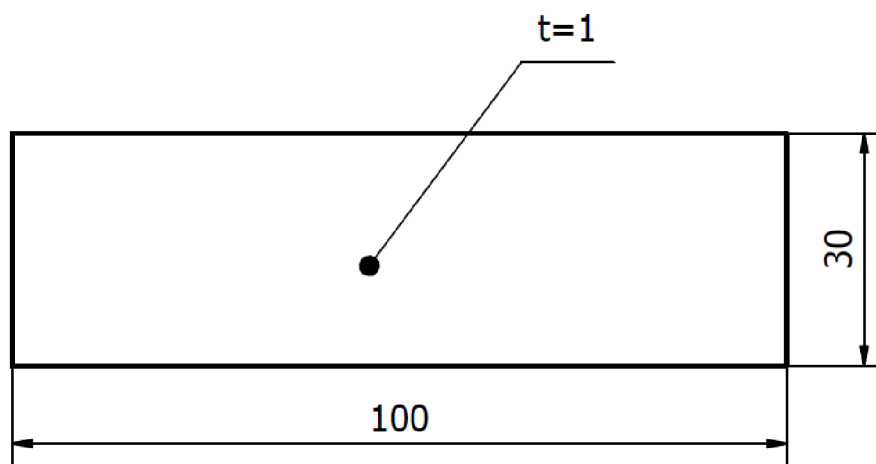
Zkouška je reprezentativní pro chování materiálu v ohybu pouze v případě, kdy dojde k poruše buď tahem a nebo tlakem (obr. 27).



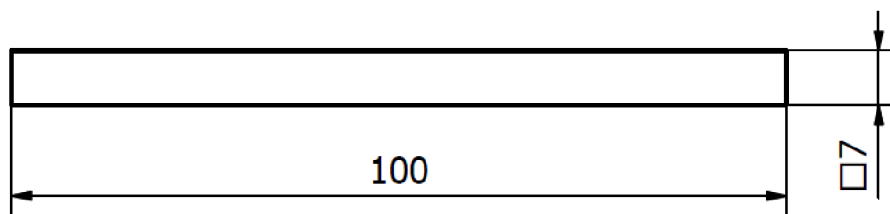
Obr. 27 Schéma možných poruch vzorků [23].

b) Aplikace normy na vzorky

Bylo testováno 6 vzorků, které měly 2 různé průřezy. Matricí je epoxidová pryskyřice, hmotnostní podíl 78 %, teplota tvarování 210 °C až 220 °C a rychlost tažení je 19 až 20 cm. min⁻¹.



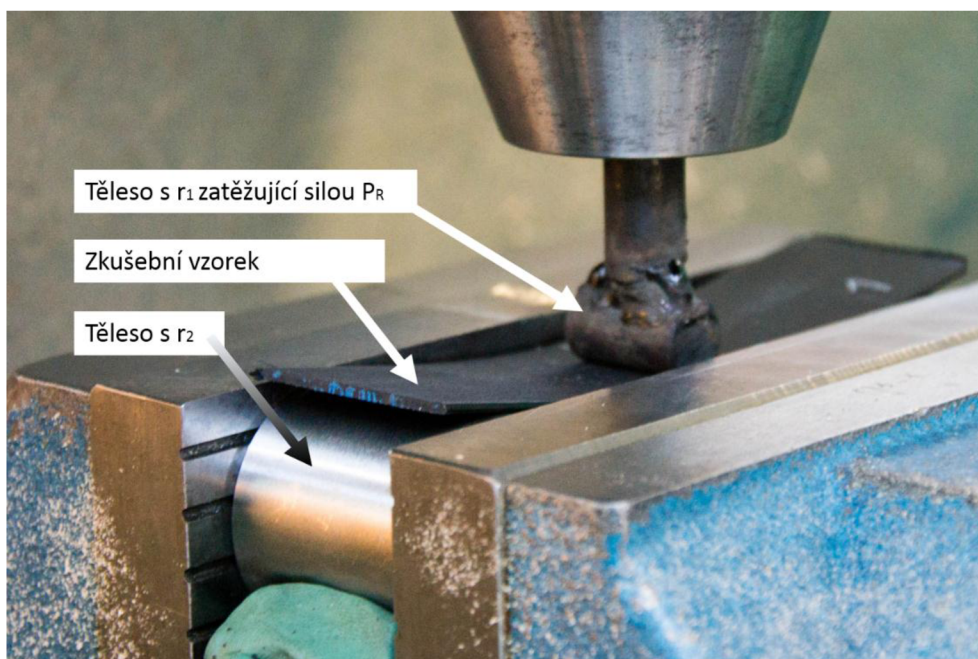
Obr. 28 Schéma vzorku A.



Obr. 29 Schéma vzorku B.

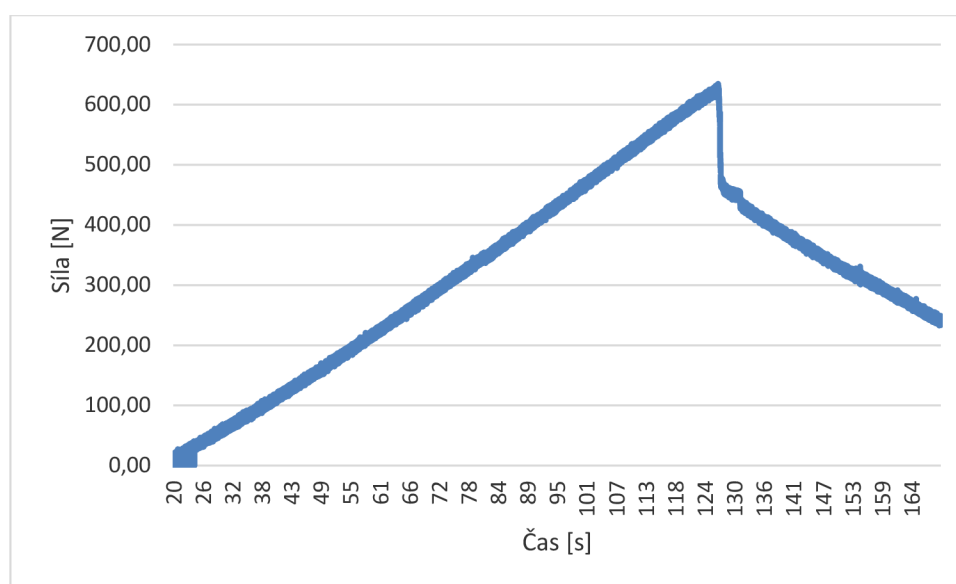
Tab. 3.1 Rozměry použitých vzorků pro testování.

Symbol	Vzorek A	Vzorek B
b	$30 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$
L	$100 \pm 0,1$	$100 \pm 0,1$
l_v	$80 \pm 0,5$	$80 \pm 0,5$
h	$1 \pm 0,2$	$7 \pm 0,2$
r_1	$6 \pm 0,1$	$6 \pm 0,1$
r_2	$15,5 \pm 0,1$	$15,5 \pm 0,1$

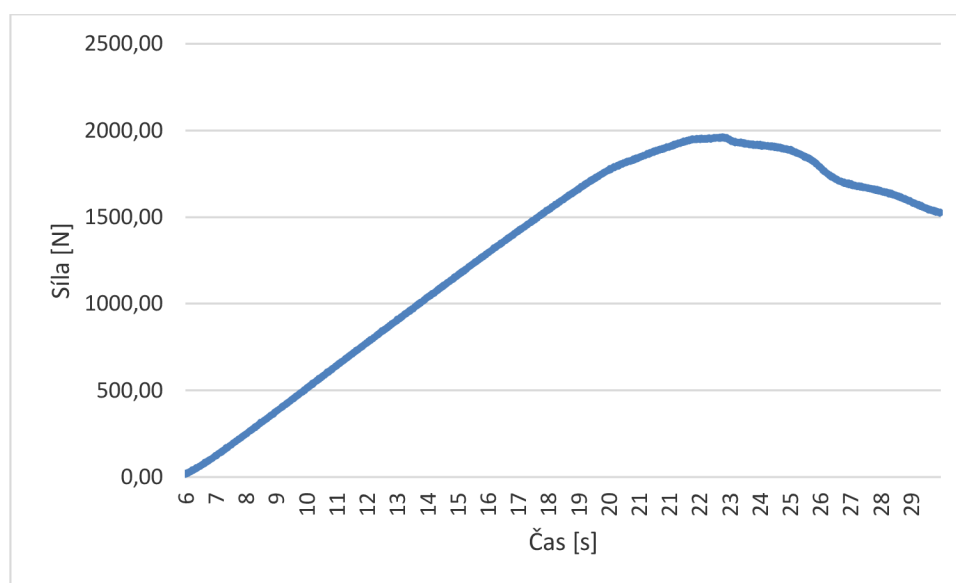


Obr. 30 Testování zkouška ohybem [21].

Pro měření zatěžující síly bylo použito dynamometru značky Kistler typu 9575B. Přístroj poskytl závislost síly na čase. A průhyb mezi podporami byl měřen číselníkovým úchylkoměrem. Při větším průhybu byl průhyb odečítán na ovládací obrazovce stroje.



Obr. 31 Dynamická analýza zatěžování vzorku A.



Obr. 32 Dynamická analýza zatěžování vzorku B.

Tab. 3.2 Naměřené a dypočítané hodnoty pro vzorek A.

P_R			624 N
f_1			1,2 mm
f_2			3,9 mm
σ_b	mez pevnosti v ohybu	dle vztahu 3.1	2496 MPa
E_b	modul pružnosti v ohybu	dle vztahu 3.2	394429 MPa
ϵ_1	deformace ohybem	dle vztahu 3.3	0,004= 0,4 %

Tab. 3.3 Naměřené a dopočítané hodnoty pro vzorek B.

P_R			1966 N
f_1			0,3 mm
f_2			0,85 mm
σ_b	mez pevnosti v ohybu	dle vztahu 3.1	687,8 MPa
E_b	modul pružnosti v ohybu	dle vztahu 3.2	76255 MPa
ϵ_1	deformace ohybem	dle vztahu 3.3	0,009= 0,9 %

4 DISKUZE

Není možné obecně určit, jaká metoda technologií uhlíkových kompozitních materiálů je nejlepší. Pro určení vhodné technologie je nutné znát základní požadované vlastnosti (tvar, použití, počet kusů, apod.).

V kapitole 2 lze vidět různé výrobní postupy, které se liší časem výroby, finanční náročností založení výroby a také servisem. Další rozdíly můžeme najít v druzích použitých vláken.

Pokud se vyrábí profily konstantního průřezu, tak jednoznačně nejrychlejší a nejlevnější je metoda pultruze. Prodejní cena jednoho metru tyče čtvercového průřezu o hraně $a=7$ mm je přibližně 250 Kč. Rychlost tažení je 0,2 m. min⁻¹. Při zkoušení profilových tyčí (kapitola 3.2.4.1) bylo výpočtem zjištěno, že mez pevnosti v ohybu daného profilu je 687 MPa. Pro srovnání, u oceli 11 600 se mez pevnosti v ohybu pohybuje v rozmezí 260 až 310 MPa. Prodejní cena tyče stejného průřezu z oceli je 25 Kč za metr. Zde je nutno také uvést, že sice pevnost v ohybu není nejdůležitější parametr, ale přesná pevnost v tahu nebyla autorem změřena.

Všeobecně popularita uhlíkových kompozitních materiálů rapidně stoupá. Začíná se s nimi experimentovat v různých odvětvích. Například na americkém trhu se objevila 3D tiskárna Markforged, která umí tisknout z uhlíkových vláken. Tato metoda by byla převratná pro domácí kutily vyžadující prototypy, které snesou i vysoké namáhání [24].

5. ZÁVĚR

Bakalářská práce pojednává o klasických a moderních výrobních technologiích uhlíkových kompozitních materiálů. Tyto materiály disponují žádoucími vlastnostmi jako nízká hmotnost, poměrně vysoká pevnost a lze je vyrábět v různých tvarových a barevných provedeních.

Práce se dále zabývá detailněji výrobní technologií pultruze ve firmě Prefa kompozity s. r. o. Největší výhodou technologie pultruze spočívá v tom, že obsahuje až 80 % vláknové výztuže (oproti ručnímu spřádání, kde se dosahuje maximálně polovičního podíl vláken). To znamená, že se ve výrobcích dosahují lepší mechanické a užité hodnoty vlastností.

Dále byly v práci testovány mechanické vlastnosti vybraných profilů společnosti 5M s. r. o. pomocí tříbodového ohybu. Na základě těchto testů bylo ověřeno, že jejich ohybová pevnost může dosáhnout až 687,8 MPa.

Uhlíkové kompozitní materiály lze považovat za velmi perspektivní materiál vůči běžným uhlíkatým ocelím.

Výsledky této bakalářské práce mohou sloužit rozvoji poznání o technologiích výroby uhlíkových kompozitních materiálů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Great Planes [online]. [vit. 2014-02-22]. Dostupné z < <http://www.greatplanes.com/accys/gpmr7600.html>>
2. Carbon fiber glass [online]. [vit. 2014-02-22]. Dostupné z < <http://www.carbonfiberglass.com/composite-resources/composites-articles/history-carbon-fiber>>
3. JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Brno, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
4. Carbon fiber glass [online]. [vit. 2014-02-22]. Dostupné z < http://web.mit.edu/3.082/www/team2_f01/carbonfiber.gif >
5. Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.. Úvod do studia materiálů. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
6. Carbon fiber glass [online]. [vit. 2014-02-28]. Dostupné z < <http://www.moldedfiberglass.com/processes/filament-winding-process> >
7. Carbon fiber guru [online]. [vit. 2014-03-1]. Dostupné z < <http://www.carbonfiberguru.com/carbon-fiber-processing-part-1-wet-hand-lay-up/>>
8. Marcel Dekker, Composites engineering handbook. New York: Marcel Dekker, 1997, viii, 1249 s. ISBN 08-247-9304-8.
9. IDI Composites International [online]. [vit. 2014-03-2]. Dostupné z < <http://www.idicomposites.com/smc-bmc.php>>
10. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
11. CHUNG, Deborah D. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 289 s. ISBN 18-523-3665-X.
12. Carbon fiber glass [online]. [vit. 2014-03-10]. Dostupné z < <http://www.carbonfiberglass.com/Composites-Manufacturing/Composites-Manufacturing-Processes.html> >
13. Máté Petrány, Jalopnik [online]. [vit. 2014-03-11]. Dostupné z < <http://jalopnik.com/the-bmw-i3-is-officially-much-greener-than-almost-every-1462999376>>
14. AIRBUS S.A.S [online]. [vit. 2014-03-11]. Dostupné z < <http://web.archive.org/web/20090327094646/http://www.eads.com/xml/content/OF0000000400004/7/19/41508197.pdf> >
15. A350xwb [online]. [vit. 2014-03-11]. Dostupné z < <http://www.a350xwb.com/advanced/fuselage/> >
16. Havel Composites [online]. [vit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf
17. [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.easycomposites.co.uk/Images/products/large/carbon-fibre-tow.jpg>
18. Golf Gear [online]. [vit. 2014-04-222] . Dostupné z <<http://www.golfgearz.com/callaway-ft-iz-driver-a-fusion-of-titanium-and-carbon-fiber/>>
19. Prefa kompozity [online]. [vit. 2014-04-20]. Dostupné z <<http://www.prefa-kompozity.cz/sites/prefa-kompozity.cz/files/stranky/katalogvyrobku2013.pdf/>>
20. 5M [online]. [vit. 2014-04-20]. Dostupné z <<http://www.5m.cz/>>
21. Petr Bouchal, osobní archiv
22. Boca Raton: CRC Press, Pultrusion for Engineers., 2000, 303 s. ISBN 08-493-0843-7
23. ČSN EN 2562
24. Matt Burns, Techcrunch [online]. [vit. 2014-04-28]. Dostupné z: <<http://techcrunch.com/2014/02/18/the-worlds-first-carbon-fiber-3d-printer-is-now-available-to-order/>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
E_B	[MPa]	modul pružnosti
L	[mm]	délka vzorku
P_R	[N]	zatěžovací síla při zkoušce ohybem
b	[mm]	šířka vzorku
f	[mm]	průhyb při zkoušce ohybem
f₁	[mm]	průhyb odpovídající působícímu zatížení P _R /10
f₂	[mm]	průhyb odpovídající působícímu zatížení P _R /2
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost

