

Obsah

Úvod.....	10
1 Teoretická část.....	11
1.1 Čedič.....	11
1.2 Výroba čedičových vláken.....	12
1.2.1 Vliv čedičových vláken na zdraví člověka.....	15
1.2.2 Vlastnosti čedičových vláken.....	16
1.2.3 Použití čedičových vláken.....	17
1.3 Kompozity.....	17
1.3.1 Požadavky na kompozity.....	18
1.3.2 Klasifikace kompozitních materiálů.....	18
1.3.3 Metody výroby kompozitu.....	22
1.3.4 Aplikace polymerních vláknových kompozitů.....	24
1.3.5 Pevnost kompozitu.....	25
2 Experimentální část.....	27
2.1 Výroba kompozitu.....	27
2.1.1 Lukosil M 130.....	29
2.2 Testování kompozitních materiálů.....	30
2.2.1 Zkouška měření v tahu.....	30
2.2.2 Zkouška – POINT BENDING pomocí DYNAMOMETRU.....	32
2.3 Rozbor chování čedičových vláken na termomechanické analýze TMA.....	35
2.4 Rozbor chování použité pryskyřice polysiloxan na termogravimetrickém analyzátoru TGA.....	36
2.5 Pracovní helma z kompozitu.....	37
2.5.1 Postup výroby helmy č. 1.....	41
2.5.2 Postup výroby helmy č. 2.....	43
2.5.3 Testování odolnosti pomocí volně padajícího břemene s ostrým hrotem.....	46
2.6 Chemická odolnost kompozitu z čedičových vláken.....	49
2.6.1 Použitá chemická činidla.....	49
2.6.2 Použité přístroje.....	50
2.6.3 Výroba vzorku pro měření chemické odolnosti.....	50
2.6.4 Popis průběhu experimentu.....	51
2.6.5 Vzorce použité pro zpracování výsledků experimentu.....	52

3	Diskuze výsledků experimentu.....	53
3.1	Výsledky experimentu měření tahu.....	53
3.2	Výsledky experimentu měření průhybu pomocí dynamometru.....	54
3.3	Výsledky experimentu testování odolnosti pomocí volně padajícího břemene s ostrým hrotem.....	57
4	Závěr.....	66
5	Seznam použité literatury.....	67
6	Seznam použitých obrázků.....	69
7	Seznam použité literatury u obrázků.....	71
8	Seznam tabulek.....	73
9	Seznam grafů.....	74

Úvod

Lidská společnost se vyvíjí a člověk si během jejího vývoje osvojil dovednost používat nejrůznější materiály jako kámen, železo, bronz, dřevo či keramiku. Epochy vývoje lidstva byly pojmenovány podle nejhojněji používaných materiálů – doba kamenná, bronzová, železná. Výroba a použití těchto materiálů zvyšovala úroveň uspokojování potřeb člověka. V současné době další pokroky v technice, medicíně, informatice i umění souvisí s vývojem nových materiálů. Názorný příklad lze uvést u sportovních potřeb, jako jsou například lyže. Základní tvar lyží se příliš nezměnil, zato jejich užité vlastnosti se přechodem od masivního dřeva přes laminované dřevo ke kompozitům a plastům změnily radikálně. Podstatně to ovlivnilo i techniku výkonnostního lyžování. Vývojem nových materiálů se lidem otevírají nové možnosti a posunují bariéry směrem vpřed.

Nejdynamičtěji se rozvíjející skupinou nových materiálů jsou polymery a kompozity na jejich bázi.

Teoretická část

Kapitola je věnována popisu čediče, výrobě čedičových vláken, vlastnostem čedičových vláken a popisu kompozitu.

1.1 Čedič

Čedič tvoří z velké části zemskou kůru. Jedná se o nejhojnější magmatickou horninu zemského povrchu. Tvoří části dna oceánů, plošinové kontinentální bazalty.[1]



Obr. 1 Čedič [1]

Magmatická hornina

Magmatická hornina – hornina, která vznikla krystalizací magmatu. Vznik struktury magmatické horniny se řídí posloupností krystalizace. Krystalizace je spojena s postupným klesáním teploty taveniny.

Magma - je převážně alumino-silikátová tavenina, která obsahuje sopečné plyny (např. voda, CO₂, chlór a fluor). Magma vzniká v oblastech zemského pláště nebo tavením hornin spodní zemské kůry. Podle místa utuhnutí magmatu rozdělujeme vyvřelé horniny na hlubinné, žilné a výlevné. [2]

Dělení magmatických hornin:

- **Hlubinné (abyssální) vyvřeliny** – magma, které lze vidět na obr. 2, se vlivem své vysoké viskozity není schopno pohybovat. Viskozita je způsobena vysokým obsahem SiO₂ a následnou kyselostí hornin. Dochází ke vzniku hlubinných těles, která jsou několik kilometrů pod zemským povrchem. Tělesa jsou nazývána

plutony, batolity či pně. Těleso může v podzemí chladnout (krystalizovat) i několik miliónů let. Dlouhá doba krystalizace se projevuje ve všesměrné hrubozrnné struktuře vzniklých hornin.

- **Žilné (hypoabyssální, podpovrchové) vyvřeliny** - žilné vyvřeliny jsou obrovskými tlaky vtlačovány do puklin, prasklin a elastických částí zemské kůry nedaleko povrchu, což zapříčiňuje rychlejší chladnutí taveniny a zjemňování struktury. Vzniklá tělesa jsou nazývána pravé a ložní žíly.
- **Výlevné (extruzivní, efuzivní) horniny** – horniny, které jsou díky nízké viskozitě dobře pohyblivé a dosáhnou rychle zemského povrchu. Zde se rozlévají v podobě lávy. Pro výlevné horniny je typické rychlé chladnutí, které je způsobeno okolním chladným prostředím (voda, vzduch).



Obr. 2 Magma [2]

1.2 Výroba čedičových vláken

Čedičové vlákno je textilní výrobek získaný z čedičové horniny. Čedičové horniny tají v rozmezí teplot $1\,500 - 1\,700\,^{\circ}\text{C}$. Při rychlém ochlazení vzniká sklovitá, přibližně amorfní struktura. Čedičová hornina vhodná pro výrobu vláken obsahuje zpravidla olivín ($2(\text{MgFe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$), který můžeme vidět na obr. 4, a nefelin ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Krystal nefelinu je znázorněn na obr. 3. K výrobě vláken se

používají kyselé čediče s obsahem nejméně 46 % oxidu křemičitého (SiO_2).



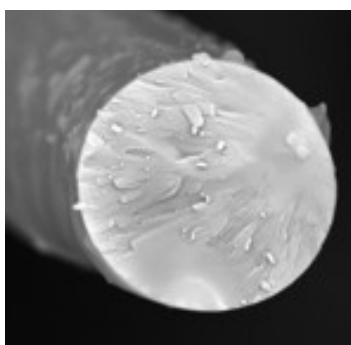
Obr. 3 Krystal nefelinu [3]



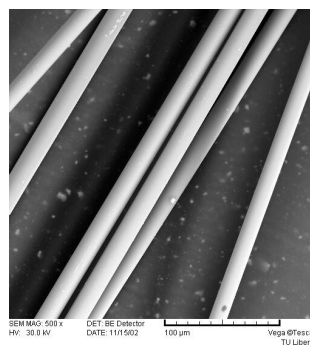
Obr. 4 Olivín [4]

Podle obsahu SiO_2 se čediče klasifikují do tří skupin:

1. **alkalické čediče** s obsahem SiO_2 do 42 %
2. **slabě kyselé čediče** s obsahem SiO_2 od 43 do 46 %
3. **kyselé čediče** s obsahem SiO_2 nad 46 %.



Obr. 5 Čedičové vlákno v lomu [5]



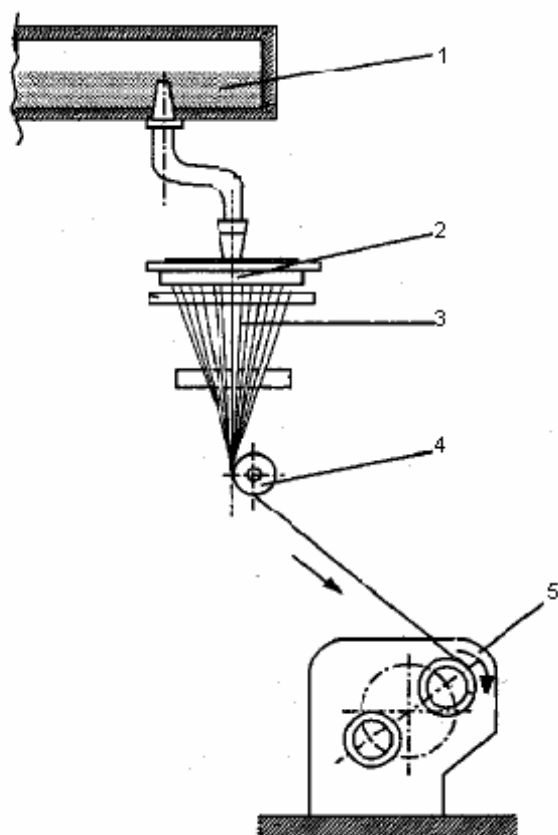
Obr. 6 Čedičové vlákno – podélný směr [6]

Výroba čedičových vláken

Poprvé bylo provedeno zvlákňování čediče na začátku 20. století. K rozvoji výroby došlo až po 2. světové válce. Vlákná jsou vyráběna tavným zvlákňováním při teplotě $1\,500 - 1\,700\,^{\circ}\text{C}$. Podle způsobu chlazení získáme výrobek jemně krystalický nebo sklovitý. Rychlým chlazením vznikne krystalická struktura, pomalým chlazením vznikne amorfni struktura. Čedič má vysokou pevnost v tlaku, dále se vyznačuje tvrdostí, izolační schopností a chemickou odolností.

Vlákná mohou být dloužena při teplotách $1\,300\,^{\circ}\text{C}$. Měrná hmotnost vláken je $2\,733\,\text{kgm}^{-3}$, teplota měknutí se pohybuje kolem $960\,^{\circ}\text{C}$. Průměr vlákna se pohybuje

kolem $9 - 12 \mu m$. Na následujících obrázcích 9, 10, 11 lze vidět, jak vypadají sekaná čedičová vlákna a tkanina z čedičových vláken.



- 1 – roztavená surovina
- 2 – trysky
- 3 – čedičová vlákna
- 4 – vedení rovingu
- 5 – navíjení ochlazeného rovingu



Obr. 8 Čedičový roving [8]

Obr. 7 Schematické znázornění výroby čedičových vláken [7]



Obr. 9 Sekaná čedičová vlákna [9]
[10]



Obr. 10 Dlouhá sekaná čedičová vlákna



Obr. 11 Tkanina z čedičových vláken [11]

1.2.1 Vliv čedičových vláken na zdraví člověka

Minimální průměr čedičových vláken je $9\ \mu\text{m}$, průměr, který se neztenčuje ani při jejich zpracování. Vlákná s těmito rozměry nemohou být vdechována a podle mezinárodního hodnocení nepatří tato čedičová vlákna mezi nebezpečná. Vlákná rozměrů menších jak $3\ \mu\text{m}$ jsou pro lidské zdraví nebezpečná, neboť jsou vdechována hluboko do plic. Při kontaktu je nutno dodržovat základní hygienické předpisy. Může dojít například k mechanickému podráždění pokožky, očí a horních cest dýchacích. Čedičové vlákno je velmi křehké a při manipulaci má tendenci uvolňovat jehličky, které se zarývají do kůže. Pracovat s čedičem se musí obezřetně. Doporučuje se pracovat v jemných rukavicích nebo ruce nakrémovat. [3]

Krystalická struktura čediče záleží na podmínkách vzniku čediče při toku lávy, liší se dle oblastí. Vlastnosti čedičových vláken jsou podobné skleněným S-vláknům:

- dobré izolační vlastnosti, tepelné, elektrické i zvukové
 - hustota $2\ 600 - 2\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$
 - menší měrná pevnost než E – sklo při teplotách $< 300\ ^\circ\text{C}$
 - pevnost $1,5\ \text{GPa}$, smykový modul kolem $21,76\ \text{GPa}$ a tažnost kolem $2\ \%$. Modul pružnosti v axiálním stlačení je $112\ \text{GPa}$
 - teplota zesklnění z termomechanických křivek je $T_g = 596\ ^\circ\text{C}$
 - odolnost v širokém teplotním intervalu od $-200\ ^\circ\text{C}$ až do poměrně vysokých teplot $700 - 800\ ^\circ\text{C}$
 - bez mechanického zatížení vydrží teploty do $1\ 250\ ^\circ\text{C}$ - tepelné izolace
 - v porovnání se sklem je odolnější vůči alkáliím a méně odolný vůči kyselinám.
- [4]

1.2.2 Vlastnosti čedičových vláken

Vlastnosti podobné skleněným S-vláknům.

Výhody:

- cena asi 60 % skleněných S-vláken
- větší chemická odolnost.

Výroba je analogická výrobě skleněných vláken.

Pro letecké aplikace – nahrazují skleněná S-vlákna.

S-vlákna používáme pro kompozity s epoxidovými matricemi.

S-sklo – větší podíl oxidu křemíku a hliníku. V porovnání s E – sklem vyšší pevnost a modul pružnosti, nižší hustota, vyšší teplotní odolnost, dobrá odolnost v prostředí kyselin, dražší než E-sklo (vyšší teplota tavení).[5]

Tab. 1 Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken

	Čedičové vlákno	Vlákno z E skloviny
Pracovní teplota pro tepelné izolace [$^{\circ}\text{C}$]	820	480
Minimální teplota použití [$^{\circ}\text{C}$]	-260	-60
Teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$]	1 450	1 400
Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]	1 050	825
Hustota [kg / m^3]	2 750	2 600
Pevnost v tahu [Mpa]	4 840	3 450
Modul pružnosti E [Gpa]	89	77
Prodloužení při přetržení [%]	3,15	4,7
Součinitel délkové teplotní roztažnosti 10^{-6} [1/K]	5,5	5
Chemická odolnost – úbytek hmotnosti za 3 hod [%] – vařící voda	0,2	0,7
Chemická odolnost – úbytek hmotnosti za 3 hod [%] – vařící NaOH	5	6
Dielektrická permeabilita při 1MHz	2,2	2,3

Pramen: <https://skripta.ft.tul.cz/database/data/2006-03-16/12-54-49.pdf>

1.2.3 Použití čedičových vláken

Použití čediče ve formě šňůr, čedičové vaty:

- zvukové izolace – čedič mimořádně dobře pohlcuje zvukové vlny. Na obrázku 12 můžeme vidět detail zvukově a tepelně izolační desky z čedičových vláken
- termoizolace – nahrazuje azbest v průmyslových aplikacích
- filtrační materiály – čedič má vysokou chemickou odolnost, je tedy vhodný jako filtrační materiál pro silné kyseliny a zásady
- ohnivzdorná šněrovadla – šněrovadla na obuvi u hasičů a záchranářů. [6]



Obr. 12 Detail zvukově a tepelně izolační desky z čedičových vláken [12]

1.3 Kompozity

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více fyzikálně a chemicky odlišných složek. Pevnější nespojitá složka se nazývá **výztuž**. Spojitá a poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá **matrice**.

Definice kompozitu:

„Jakýkoliv materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál.“[7]

Výztuž – tvrdší, tužší, pevnější a obvykle nespojitá složka.

Matrice – spojitá a obvykle poddajnější složka, zastává funkci pojiva výztuže.

Kompozitní materiály obsahují vyztužující fáze různých rozměrů:

- mikrokompozitní materiály – příčné rozměry výztuže jsou v rozmezí až $10^2 \mu m$.
- makrokompozitní materiály – velikost příčného rozměru až $10^2 mm$. Jsou používány především ve stavebnictví (železobeton).
- nanokompozitní materiály – rozměr výztuže v jednotkách v nm.

1.3.1 Požadavky na kompozity

Vytváření nových kompozitů má za účel splnění požadavků, které u klasických požadavků jsou těžko splnitelné. Jedná se zejména o tyto požadavky:

- zvýšení tuhosti
- zvýšení pevnosti
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti)
- zvýšení teplotní stability (rozšíření teplotního intervalu použitelnosti)
- zvýšení mechanického tlumení (antivibrační a antihlukové materiály)
- snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny
- modifikace elektrických vlastností (zvýšení resp. snížení elektrické vodivosti)
- snížení nasákavosti
- zmenšení teplotní roztažnosti
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti
- udržení tuhosti nebo pevnosti při vysoké teplotě
- snížení negativního dopadu na životní prostředí
- redukce hmotnosti (snížení hustoty)
- snížení ceny. [8]

1.3.2 Klasifikace kompozitních materiálů

Klasifikace kompozitu je možné podle různých hledisek:

- dle druhu základní spojité fáze (matrice)
- podle geometrického charakteru dispergované (vložené) složky
- podle typu výztuže.

Podle druhu základní spojité fáze

- polymerní – termoplastická, reaktoplastová, elastomerní
- anorganická – beton, železobeton, apod.
- kovová – kovové kompozity
- keramická – cermety – keramické kompozity vyztužené kovovými vlákny [9]

Podle geometrického charakteru dispergované složky

- partikulární – částice různého tvaru
- granulační – částice, které nemají osově rozměry příliš rozdílné – kovy vyztužené keramickými vlákny, plněné polymery (částicemi, vlákny) apod.
- fibrilární – jeden rozměr u částice převažuje

- lamelární – jeden rozměr proti ostatním dvěma je zanedbatelný.

Typy vlákných výztuží

Jednovrstvové

a) dlouhvláknové (kontinuální)

- s jednosměrným vyztužením
- s dvousměrným vyztužením

b) krátkovláknové

- s náhodnou orientací
- s přednostní orientací

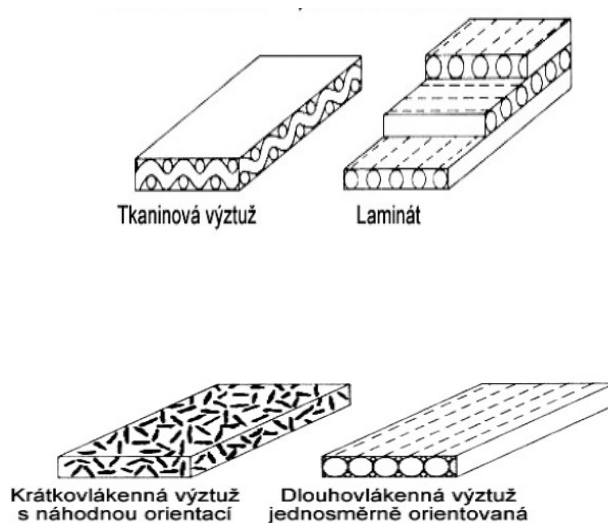
Mnohovrstvové

- lamináty
- hybridní lamináty

Lamino – vrstva vícevrstvého vláknového kompozitu.

Laminát – vícevrstvý vláknový kompozit, materiály v každé vrstvě stejné.

Hybridní laminát – jednotlivé vrstvy z různých složek. [9]



Obr. 13 Tkaninová výztuž, laminát, krátkovláknenná výztuž s náhodnou orientací, dlouhvláknenná výztuž jednosměrně orientovaná [13]

Největší pevnost a tuhost dosahují vláknové kompozity s kontinuálními vlákny.

Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě.

Vyztužující vlákna mohou být:

- skleněná
- keramická
- bórová
- čedičová
- uhlíková
- polymerní
- kovová
- další typy – proteinová, rostlinná apod.

Výztuž:

Tkanina

- pevnější a tužší lamináty

Rohož

- pro méně namáhané díly
- pro povrchové vrstvy laminátů – povrchová vrstva obsahuje větší podíl pryskyřice, povrch laminátu hladší, tkaninová výztuž je lépe chráněna před vlivem chemikálií a mechanickým poškozením.

Parametry výztuže

- tkanina s plátňovou vazbou
- materiál – nejčastěji skleněná E – vlákna
- tkaniny rovinové s prameny bez zákrutu – pro mechanicky namáhané díly.

Pryskyřice

- v kapalném stavu (rozpouštědla) – musí téct, potřebné množství se připravuje podle typu pryskyřice
- impregnace tkaniny – potřebné množství se volí podle hmotnosti výztuže s přídavkem 10 % hmotnosti
- impregnace rohoží – potřebné množství pryskyřice je přibližně trojnásobkem hmotnosti výztuže.

Používané pryskyřice

- nenasyčené polyesterové (UP)
- vinylesterové (VE)

- epoxidové pryskyřice (EP) – působí na pokožku dráždivě, mohou vyvolat ekzémy a záněty. [10]

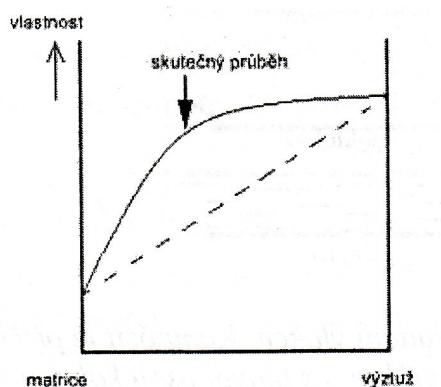
Epoxidová pryskyřice

Nejvšestrannější reaktoplasty pro konstrukční kompozity:

- dobrá houževnatost
- odolnost proti únavě a tečení
- výborná adheze k vláknům
- uspokojivá teplotní odolnost
- výtečná teplotní odolnost
- výtečná chemická odolnost
- výborné elektrické vlastnosti
- malé smrštění při vytvrzování. [11]

Synergický efekt

- kombinované působení
- Složky musí navzájem spolupracovat, alespoň jedna vlastnost kompozitu musí být lepší, než je pouhá sumace vlastností jednotlivých složek.



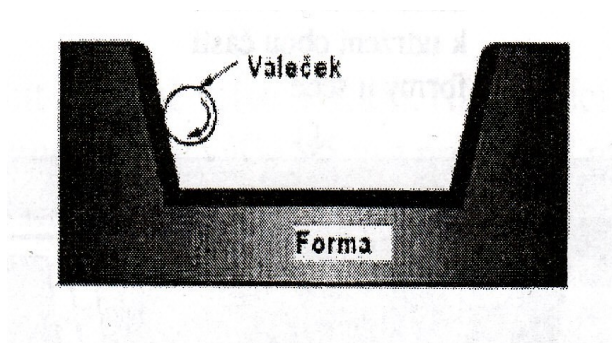
Obr. 14 Znáznornění synergického efektu v kompozitním materiálu [14]

1.3.3 Metody výroby kompozitu

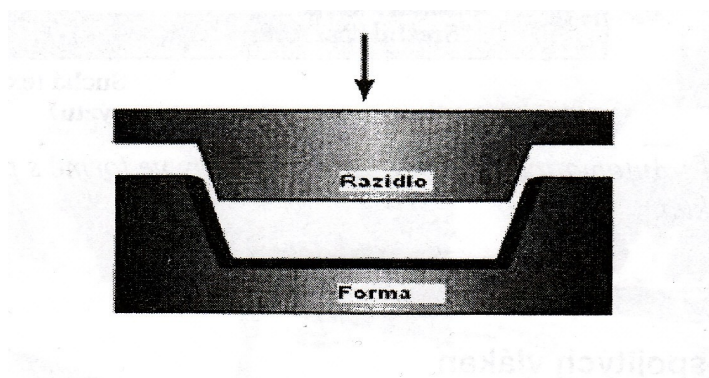
Použití tkaniny

Stále ještě nejčastější způsob výroby vláknového kompozitu s plastovou matricí spočívá v použití tkaniny z vláken. Nejčastěji se používají vlákna skleněná. Tkanina zaručuje přibližně stejnou orientaci všech vláken. Je možné použití různých

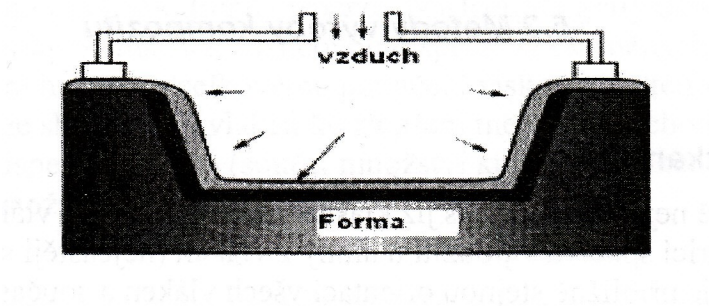
ručních nebo poloautomatických technologií. Na následujících obrázcích jsou znázorněny různé technologie.



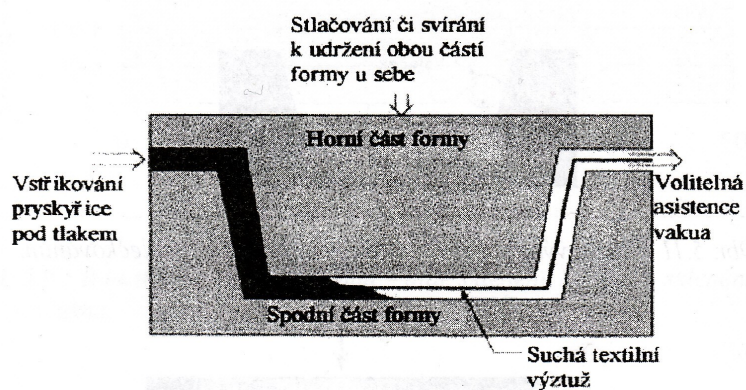
Obr. 15 Ruční výroba zalitím tkaniny ve formě a zaválečkováním [15]



Obr. 16 Poloautomatická výroba zalitím tkaniny ve formě a zalisováním [15]



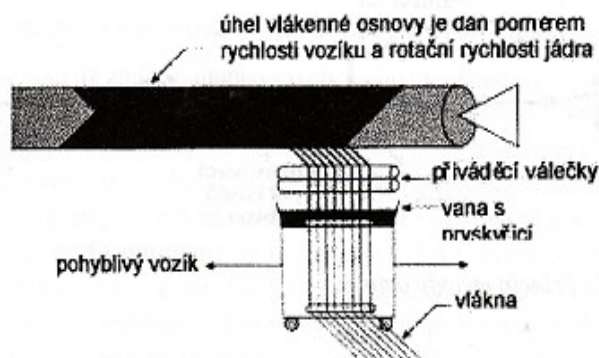
Obr. 17 Poloautomatická výroba zalitím tkaniny ve formě s použitím přetlaku [15]



Obr. 18 Automatická výroba zalitím tkaniny ve formě s použitím vakua [15]

Použití spojitých vláken

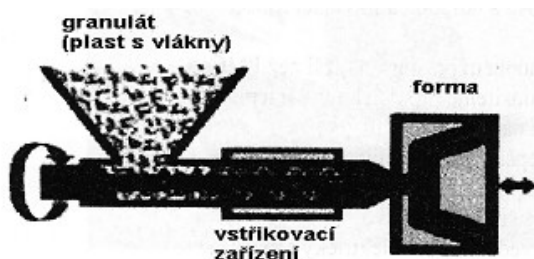
Metoda se používá zejména pro duté a rotačně symetrické součásti. Spojitá vlákna jsou navíjena na vhodnou formu a zalita polymerem.



Obr. 19 Princip výroby navíjením spojitých vláken na jádro [15]

Vstřikování a vyfukování – užití nespojitých vláken

Mnoho výrobců polymerů dodává přímo granulát polymeru s vlákny v jednotlivých granulích – ať již termoplastů, nebo i reaktoplastů. Tavenina plastu má během vstřikování poměrně vysokou viskozitu. Viskozita způsobuje, že se jednotlivá vlákna orientují ve směru toku taveniny. Je možné dosáhnout částečné orientace vláken ve výrobku. Orientaci vláken lze ovládat vhodným uspořádáním toku taveniny. [8]

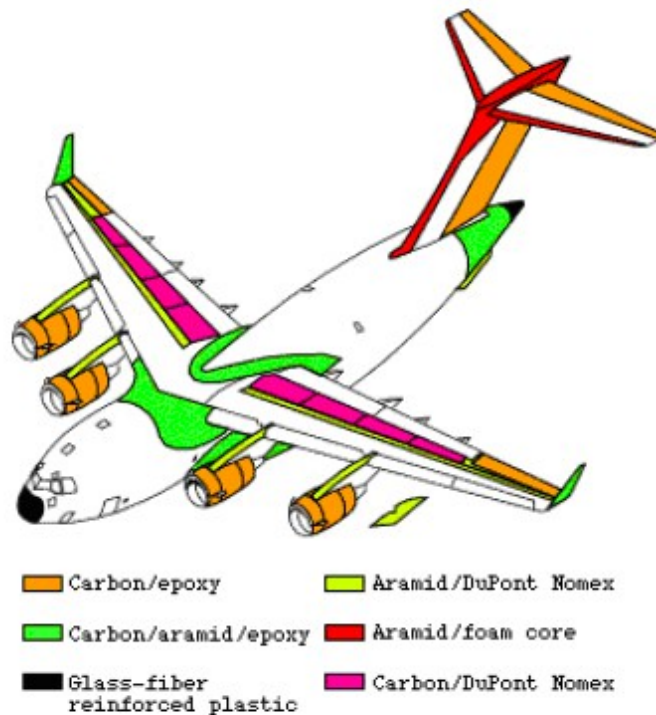


Obr. 20 Princip vstřikování kompozitu [15]

1.3.4 Aplikace polymerních vláknových kompozitů

Letectví

- křídla, trup, přistávací kola letadel, vrtule helikoptér.



Obr. 21 Využití kompozitu na letadle

Automobily

- kryty světel, nárazníky, hnací hřídele, skříň sedadel, části karosérie.

Chemie

- potrubí, tlakové nádoby, nádrže, cisterny.

Čluny

- trupy, stožáry, paluby.

Sport

- kanoe, tenisové rakety, lyže, golfové hole, rybářské pruty, plavecké bazény.

Nábytek a zařízení

- skříňe, křesla, stoly, žebříky. [12]

1.3.5 Pevnost kompozitu

Spojité vlákna

Předpoklad křehkého lomu (platnost Hookeova vztahu až do přetrhu)

Horní limita pevnosti – přímo z E určeného z Voightova průměru. Deformace ve směru vláken

$$\sigma = E * \varepsilon_f = \varepsilon_f * [v_f * E + (1 - v_f) * E_m] \quad (1)$$

Vliv orientace fáze vláken a porozity.

Dolní limita pevnosti – porušení nastane v nejslabší části tj. matici.

Experimentální část

Experimentální část je rozdělena na několik částí. První část je zaměřena na výrobu kompozitního materiálu, zde je podrobně popsána výroba vzorku. Druhá část se týká vlastního experimentu na vzorcích. Třetí část je zaměřena na výrobu pracovní helmy a jejího testování pomocí volně padajícího břemene s ostrým hrotem. Čtvrtá část je zaměřena na testování chemické odolnosti kompozitu.

2.1 Výroba kompozitu

Pro výrobu kompozitu byla použita tkanina z čedičových vláken v plátňové vazbě. Pro měření byly vytvořeny tři vzorky lišící se počtem střídajících se vrstev.

Tab. 2 Hmotnosti vzorku s nánosem a bez nánosu

Hmotnost vzorku bez nánosu	2,158 g
Hmotnost vzorku s nánosem	2,802 g
Hmotnost nánosu	0,644 g

Tab. 3 Parametry vstupního materiálu pro vlastní výrobu kompozitu

Materiál vlákenný roving	Jemnost T [tex]	Síla F [N]	Tažnost ε [%]	Průměrná pevnost σ [N/tex]
Čedič	90,8	154,9	1,97	1,71

Postup při výrobě kompozitu

Pro výrobu vzorku byla jako výztuž použita tkanina v plátňové vazbě z čedičového rovingu od firmy Kamenný Vek. Ze skupiny epoxidových pryskyřic byla pro výrobu vzorku použita methylsilikonová pryskyřice Lukosil M 130.

Výroba vzorků byla prováděna v laboratoři s využitím pomůcek:

- igelitová podložka na ochranu plochy stolu
- teflonový pečicí papír
- štětec

a také s použitím pomůcek splňující ochrannou funkci:

- respirátor
- pracovní plášť

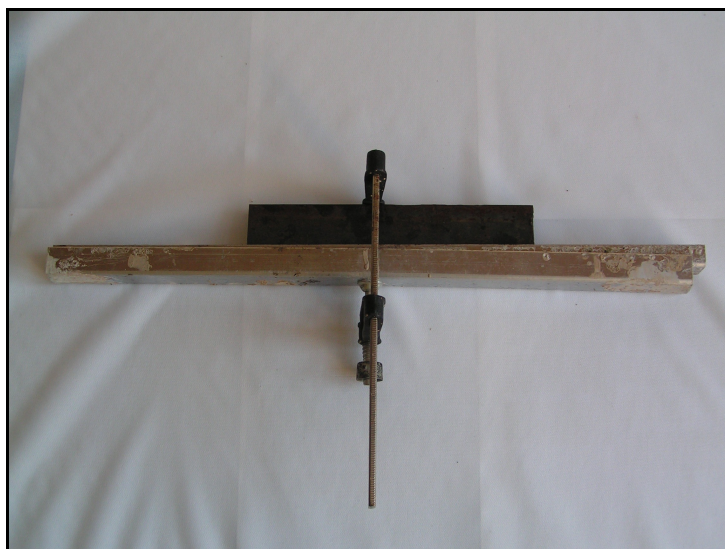
➤ ochranné rukavice.

Na tkaninu z čedičových vláken byla pomocí štětce nanесena vrstva Lukosilu M 130. Lukosil M 130 byl ponechán na tkanině na dvacet čtyři hodin, zasychal při pokojové teplotě. Druhý den byla na tkaninu nanесena druhá vrstva Lukosilu M 130. Tkanina s druhým nánosem byla umístěna na teflonový pečicí papír a vložena na šest hodin do vytvrzovací pece typu HS 122A a sušena při teplotě 200 °C. Po vyjmutí z pece byla tkanina nastříhána na proužky o šířce 25 mm a délce 300 mm **po osnově, útku a šikmo** pod úhlem 45°. Pro měření byly vytvořeny tři vzorky s počtem vrstev – šest, třináct, šestnáct.

Tab. 4 Uspořádání vrstev ve vzorcích

1. vzorek – šest vrstev	osnova – šikmo – útek – osnova – šikmo – útek
2. vzorek – třináct vrstev	osnova – šikmo – útek – osnova – šikmo – útek - osnova – šikmo – útek – osnova – šikmo – útek - osnova
3. vzorek – šestnáct vrstev	osnova – šikmo – útek – osnova – šikmo – útek - osnova – šikmo – útek – osnova – šikmo – útek - osnova – šikmo – útek - osnova

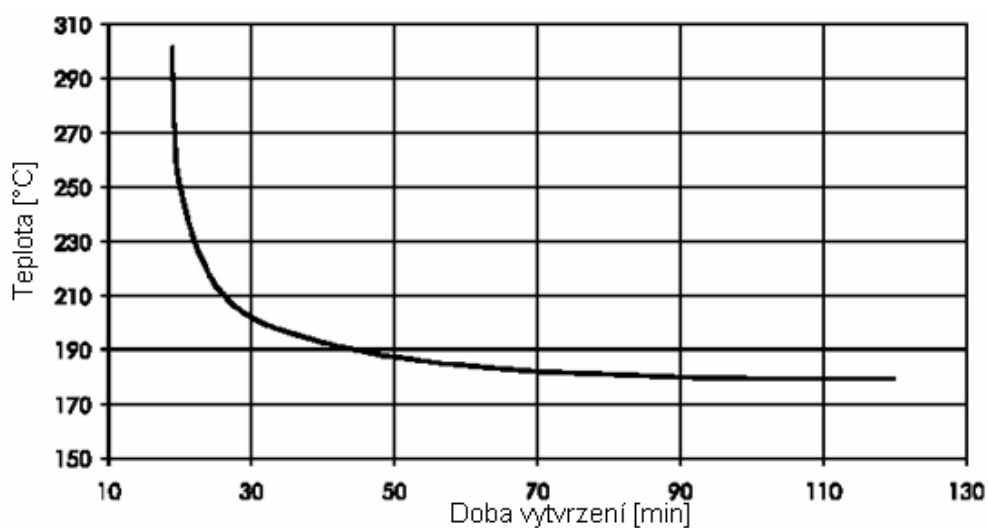
Pro vytváření vzorku je nezbytně nutný teflonový pečicí papír, který zabraňuje připékání vzorku na kovovou lištu, proto byl do lišty vložen teflonový pečicí papír pro lepší vyjmutí hotového vzorku. Jednotlivé proužky byly vloženy do lišty a opět na ně byla nanесena vrstva Lukosilu M 130. Proužky se střídají v pořadí osnova, útek a proužek střížený šikmo pod úhlem 45°. Pro co největší ztenčení vzorku byla do lišty vložena menší lišta, zatížena kovovým závažím a lišty byly k sobě sešroubovány, viz obr. 22. Tak připravený vzorek byl vložen do vytvrzovací pece, kde byl sušen při teplotě 200 °C po dobu šesti hodin. Při vytváření vzorků bylo důležité správné zacházení s pomůckami, dodržování bezpečnostních předpisů a dostatečné odvětrání místnosti.



Obr. 22 Kovová lišta se zatížením pro vytváření vzorku

2.1.1 Lukosil M 130

Lukosil M 130 - silikonový lak zasychající za pokojové teploty. Roztok silikonové pryskyřice v xylenu jako rozpouštědle. Na následujícím obrázku můžeme vidět závislost doby vytvrzení na teplotě.



Obr. 23 Graf závislosti doby vytvrzení na teplotě [16]

Lukosil M 130 při pokojové teplotě vytváří pružný, nelepivý, částečně mechanicky a chemicky odolný film. Zvýšení tvrdosti, mechanické a **chemické odolnosti** se dosáhne tepelným vytvrzením. Film se stává odolný proti působení organických rozpouštědel a stabilizuje se pro tepelné namáhání.

Tab. 5 Technické parametry LUKOSILU M 130

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Obsah netěkavých látek	[%]	50 +/-2
Měrná hmotnost	[kg / m ³]	1 000 – 1 020
Viskozita	[mPa s/20°C]	30 - 40
Doba schnutí	Hod	8

Pramen: Lučební závody Kolín

2.2 Testování kompozitních materiálů

Pro experiment byly zvoleny zkoušky:

- měření tahu na přístroji Tira Test 2300
- měření průhybu na přístroji Tira Test 2300.

Následující kapitoly jsou zaměřeny na popis jednotlivých přístrojů a zkoušek, které na nich byly prováděny.

Prvním krokem experimentu bylo nařezání vzorku na potřebné rozměry, které byly zvoleny v souladu s parametry jednotlivých přístrojů.

2.2.1 Zkouška měření v tahu

Pro měření v tahu byl použit trhací přístroj Tira Test 2300 od firmy LABORTECH, který můžeme vidět na obr. 24, přístroj je řízen počítačem. K zařízení byly připevněny samosvorné čelisti. Konce vzorku byly podloženy smirkovým papírem, aby vzorek nevykluzoval z čelistí.

Vzorky byly nejdříve pilkou nařezány na délku 100 mm. Před měřením byly do počítače vloženy vstupní parametry:

- profil vzorku plochý
- upínací délka vzorku 20 mm
- počáteční měřená výška vzorku 2 mm (vzorek č. 1)
- šířka vzorku 25 mm.

Z naměřených hodnot byly vypočítány hodnoty tahového napětí σ .

Tahové napětí σ :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

kde:

σ je tahové napětí [Pa]

F.....je síla [N]

S.....je povrch [m^2]

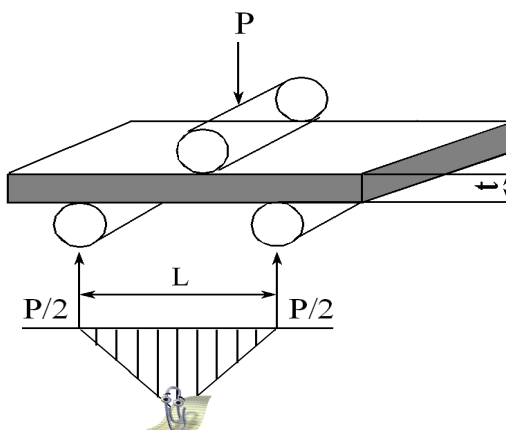


Obr. 24 Tira Test 2300 [17]

2.2.2 Zkouška – POINT BENDING pomocí DYNAMOMETRU

Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb. Ohybová zkouška umožňuje určit modul pružnosti E u materiálů, u kterých to nelze přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek. K určení průhybu byl opět použit trhací přístroj Tira Test 2300 od firmy LABORTECH. Pro zkoušku bylo k přístroji připevněno pomocné zařízení potřebné k ohybu - obr. 26, 27. K určení průhybu byla použita zkouška tříbodovým ohybem. Při tříbodové zkoušce, viz obr. 25, je zkušební vzorek podepřen jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbán trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. Dochází zde k simulovanému namáhání materiálu, tím můžeme určit, zda je materiál vhodný pro konečnou aplikaci.

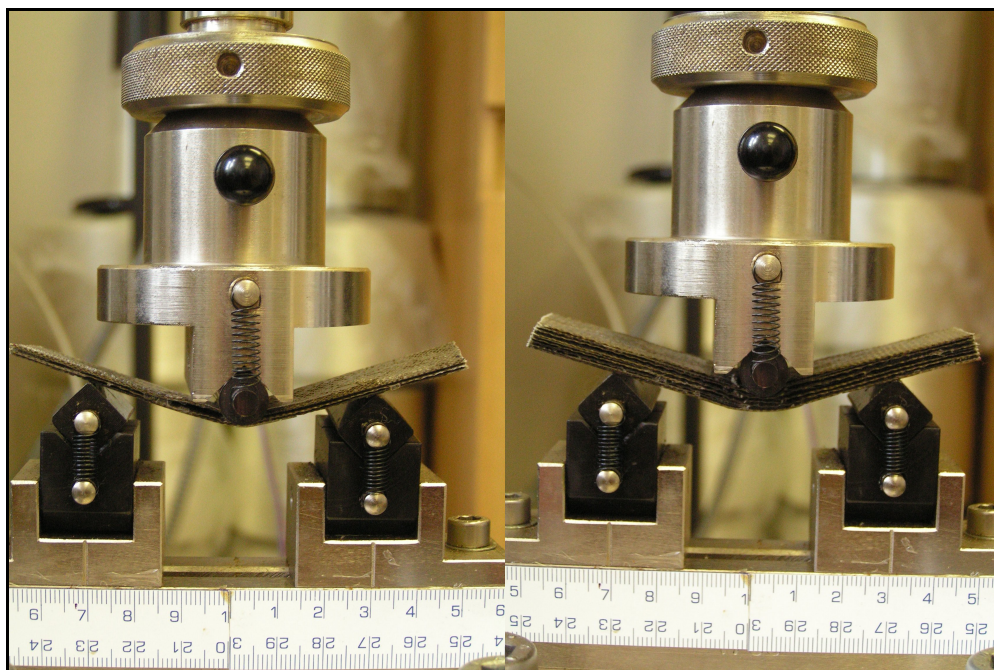
Platí čím je materiál silnější, tím je potřebná větší síla k průhybu vzorku na 10 mm.



Obr. 25 Schéma tříbodového zatěžování [18]



Obr. 26 Měření průhybu na přístroji Tira Test 2300



Obr. 27 Reálný pohled na průhyb vzorku č. 1 a vzorku č. 3 na přístroji Tira Test 2300

Výstupní hodnoty:

E – modul pružnosti v ohybu [MPa]

F_x - síla odpovídající posunu X [N]

F_m - max. dosažená síla [N]

σ - napětí v ohybu / průhyb [N/mm^2]

Tab. 6 Upínací délka vzorku, šířka vzorku, tloušťka vzorku 1, 2, 3, délka vzorku

L [mm]	b [mm]	h [mm] Vzorek č.1	h [mm] Vzorek č.2	h [mm] Vzorek č.3	h [mm] Vzorek č.4	l [mm]
50	25	2	4	5	4	100

Výpočty pro vyjádření výsledků

Pomocí maximální síly F_m a rozměrů vzorku bylo třeba přepočítat modul pružnosti v ohybu E a napětí v ohybu σ dle rovnice:

- Napětí v ohybu σ – napětí vnějšího povrchu vzorku uprostřed rozpětí podpěr, počítá se dle vztahu:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ kPa} \quad (3)$$

kde:

F [N].....je zatěžující síla.

L [mm].....je rozpětí podpěr.

b [mm].....je šířka zkoušeného vzorku.

h [mm].....je tloušťka vzorku.

- Modul pružnosti v ohybu E – vyjádřený v MPa, získáme z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, přičemž záleží na geometrii vzorku.

$$E = \frac{Fl^3}{4Xbh^3} [MPa] \quad (4)$$

kde:

X [mm]..... je průhyb.

F [N]..... zatěžující síla.

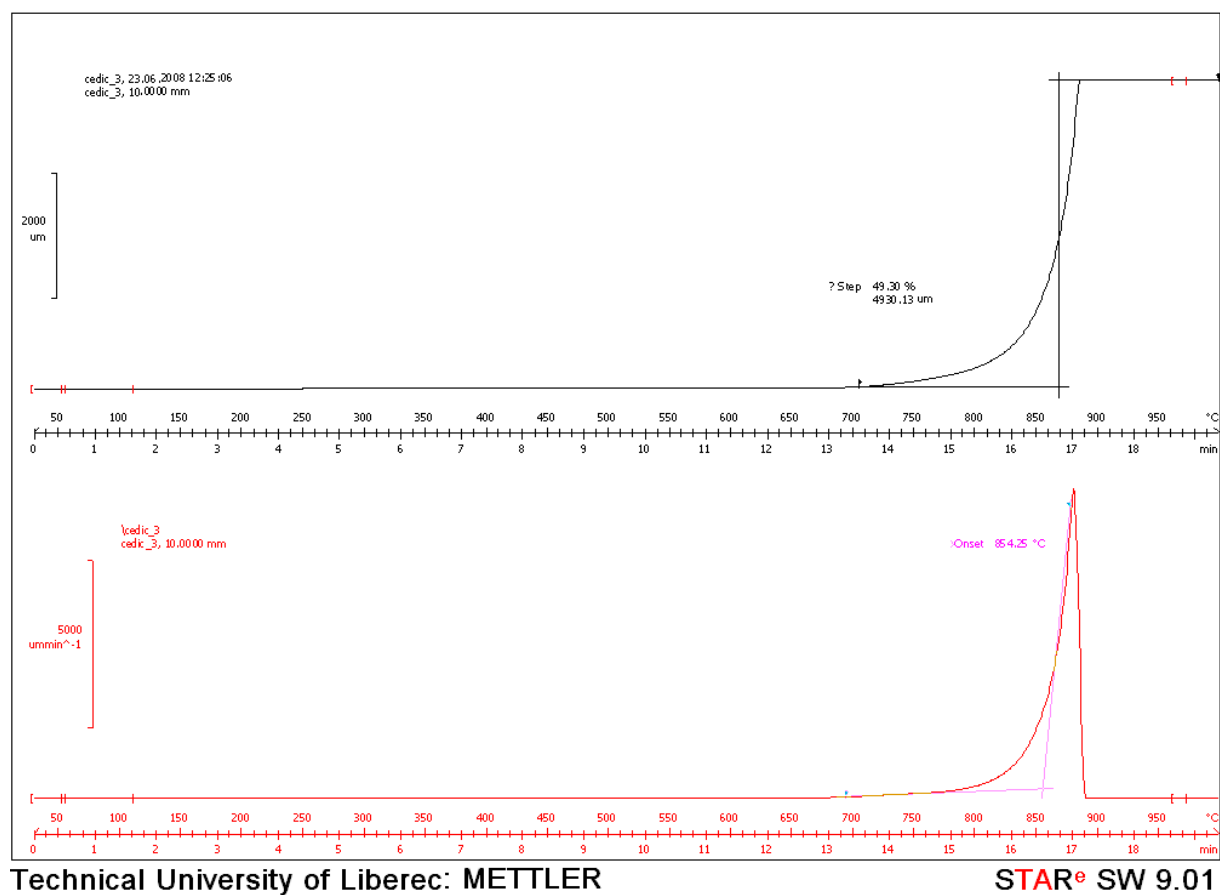
h [mm]..... je tloušťka tělesa.

b [mm]..... je šířka tělesa.

l [mm]..... je délka vzorku.

2.3 Rozbor chování čedičových vláken na termomechanické analýze

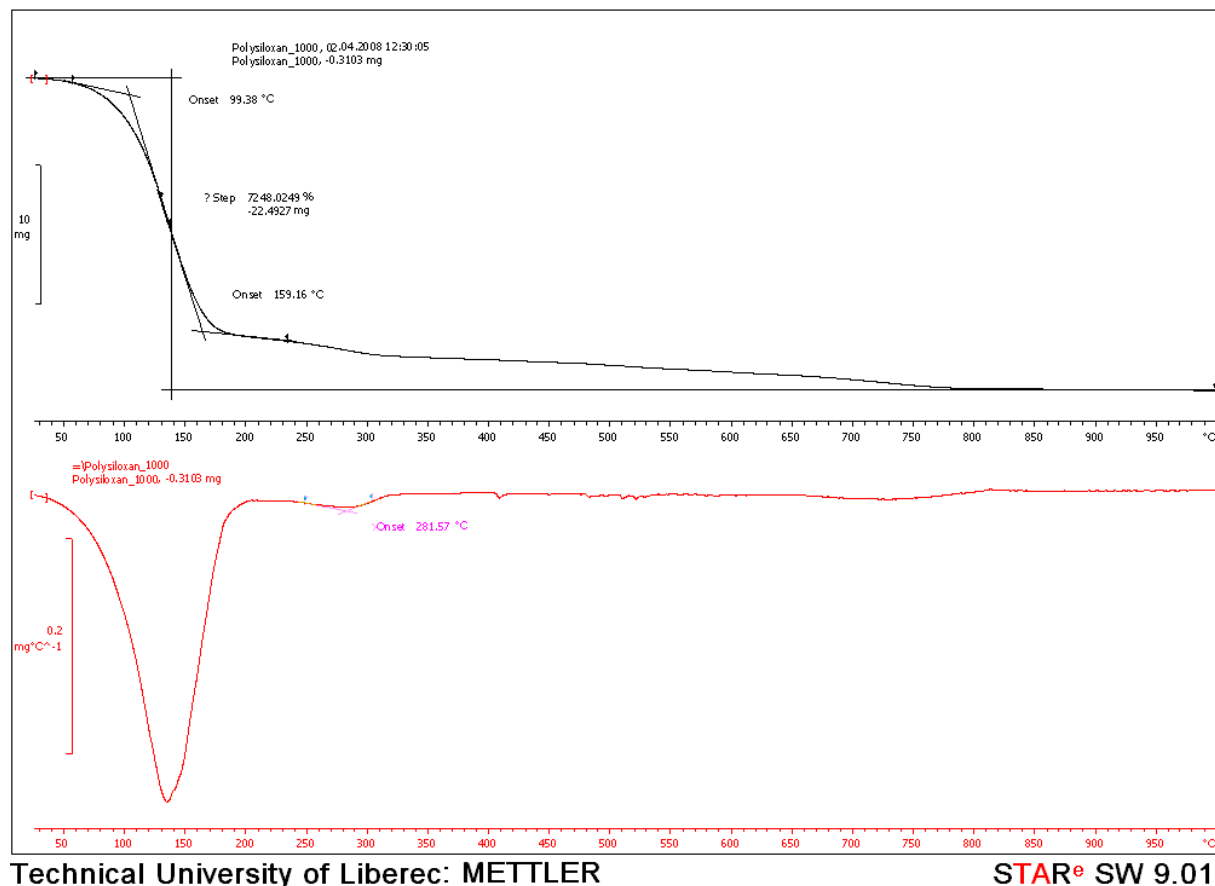
TMA



Obr. 28 TMA čedičových vláken

Na obr. 28 můžeme vidět, že čedičové vlákno začíná při 700 °C měknout. V dostupné literatuře je uvedeno, že čedič lze použít až do teploty 860 °C.

2.4 Rozbor chování použité pryskyřice polysiloxan na termogravimetrickém analyzátoru TGA



Obr. 29 TGA použité pryskyřice polysiloxan

Pomocí termogravimetrické analýzy byly zjišťovány termické vlastnosti pryskyřice v závislosti na změně hmotnosti zkoumaného vzorku.

Na obr. 29 je patrné, že při 150 °C odešlo ze vzorku 22,5 g. Při 99,38 °C začíná odcházet ředidlo – xylen. Při 159,16 °C odchází další hmotnost vzorku.

2.5 Pracovní helma z kompozitu

Pro konstrukci ochranné přilby z kompozitního materiálu byla zvolena metoda sešívání kompozitních vrstev tak, aby nedocházelo při zalisování k snížení pevnosti vlivem rozestupů nití výztuže.

Pracovní pomůcky pro výrobu helmy z kompozitu:

- igelitová podložka na ochranu plochy stolu
- teflonový pečicí papír
- štětec
- nůžky
- stříhový papír
- 100% polyesterová nit

a také s použitím pomůcek splňující ochrannou funkci:

- respirátor
- pracovní plášť
- ochranné rukavice.

Výroba stříhu

Důležitou součástí výroby helmy bylo vyhotovení stříhu. Pro vytvoření stříhu byla použita kovová vojenská ochranná helma, viz obr. 30. Podle ní byl vyhotoven stříh - obr. 31. Výroba stříhu se ukázala jako velmi zdoluhavý a složitý proces. Stříh na helmu byl nejdříve vyhotoven z bavlněné tkaniny v plátnové vazbě. Problém při vytváření stříhu se vyskytl v horní části helmy, kde bylo složité docílit, aby stříh přesně seděl. Po několika úpravách byl vytvořen stříh přesně na velikost ochranné helmy. Kovová vojenská ochranná helma sloužila i jako tvarovací a podpůrné těleso při výrobě helmy z kompozitu.

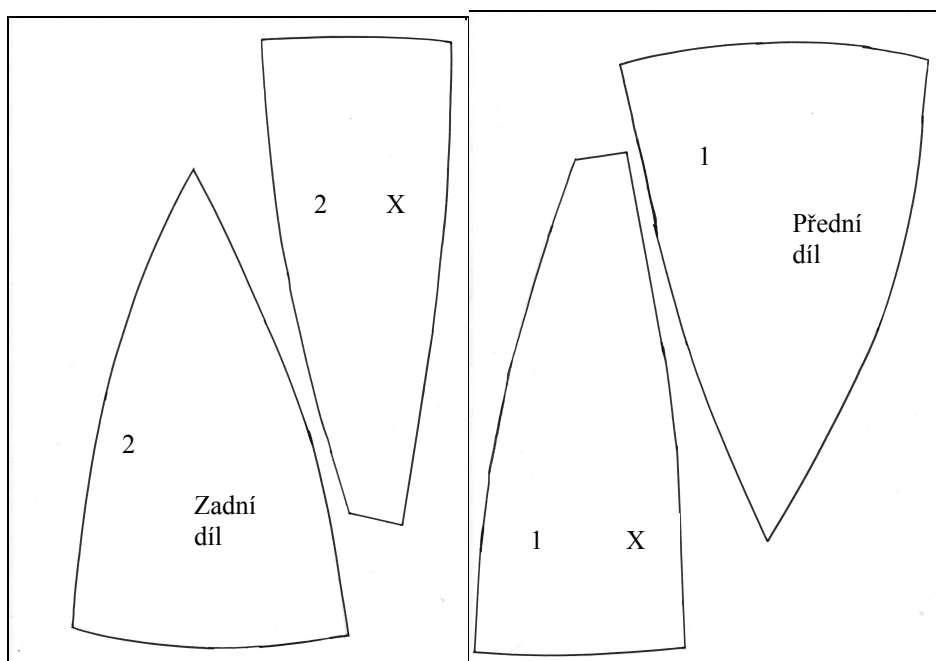
Příprava tkaniny na výrobu helmy

Tkanina z čedičových vláken byla natřena vrstvou Lukosilu M 130. Ta musela být při vysušování na 24 hodin zavěšena, protože při kontaktu s další plochou docházelo k nestejnomyernému vysušení nánosů Lukosilu M 130 a mohlo by dojít k nevratnému poškození šicího stroje. Lukosil M 130, byl tak rovnoměrně vysušen po celé ploše bez větších nerovnoměrných nánosů.

Na již vysušenou tkaninu byl položen vyhotovený stříh. Stříh na jednu celou vrstvu helmy se skládá z osmi dílů. Hotová helma se skládá celkově z šesti vrstev. Švové záložky na jednotlivých dílech jedné vrstvy helmy byly na bočních krajích přidány (0,5 cm) a na středovém spojovacím kraji 1 cm. Koncová záložka u druhé vrstvy je oproti první vrstvě o 0,2 cm větší, u třetí vrstvy o 0,4 cm, u čtvrté vrstvy o 0,6 cm atd. Na každý díl byla naznačena šíře boční záložky 1 cm. Díly byly přes sebe přeloženy v šíři 1 cm (přeplátovaný šev) a v krajích prošity na stroji klikatým stehem. Detail klikatého stehu můžeme vidět na obr. 35. Pouze spodní a horní vrstva helmy byla spojena středem, viz obr. 32, 33. Díly byly spojeny přeplátovaným švem a sešity klikatým stehem na šicím stroji. Pro lepší manipulaci při výrobě helmy nebyla druhá až pátá vrstva spojena středem, viz obr. 34, a díly se přes sebe v středové části helmy překládaly.



Obr. 30 Kovová vojenská helma



Obr. 31 Střih pro vyhotovení helmy



Obr. 32 Spodní vrstva helmy



Obr. 33 Pohled shora na spodní vrstvu



Obr. 34 Polovina druhé vrstvy helmy



Obr. 35 Detail spojení švů v horní části helmy

2.5.1 Postup výroby helmy č. 1

Zakoupená vojenská helma byla obalena teflonovým pečicím papírem, viz obr. 36, aby nedošlo k přitavení spodní vrstvy na helmu a tím k nevratnému poškození výrobku.



Obr. 36 Vojenská helma obalená teflonovým pečicím papírem

Spodní vrstva (sešitá středem) byla přiložena na helmu obalenou teflonovým pečicím papírem. Následně byla natřena vrstvou Lukosilu M 130, viz obr. 37. Druhá vrstva se skládala ze dvou polovin. První polovina druhé vrstvy byla ještě před položením na spodní vrstvu potřena vrstvou Lukosilu M 130 pro lepší tvarování. Po vytvarování vrstvy byla natřena druhá polovina druhé vrstvy a přeložena v horní části přes první polovinu. Tímto způsobem byla vytvořena třetí, čtvrtá a pátá vrstva. Horní vrstva sešitá středem (švová záložka směřující směrem do helmy) byla opět natřena vrstvou pryskyřice a přiložena na téměř již hotovou helmu, viz obr. 38.



Obr. 37 Spodní vrstva helmy natřená vrstvou Lukosilu M 130



Obr. 38 Pohled shora na vrchní vrstvu helmy

Takto připravená helma byla vložena do vytvrzovací pece při teplotě 200 °C po dobu šesti hodin. Hotová helma č. 1 je znázorněna na obr. 39.



Obr. 39 Helma č. 1

2.5.2 Postup výroby helmy č. 2

Střih je stejný jako u první helmy. Pouze se mění švová záložka koncového kraje. Koncová záložka je o 0,4 cm větší než předcházející díl. Je to z důvodu, že se na každou vrstvu nanáší odpad z krátkých čedičových vláken, viz obr. 40. Postup výroby je stejný jako u předcházející helmy, rozdíl je pouze v rovnoměrném nanášení odpadu z krátkých čedičových vláken na každou vrstvu, viz obr. 41, 42. Překládání vrstev přes sebe můžeme vidět na obr. 43, 44, 45, 46. Hotová helma č. 2 je znázorněna na obr. 47. Na obr. 48 můžeme vidět helmu č. 1 a helmu č. 2.



Obr. 40 Odpad z krátkých čedičových vláken



Obr. 41 Spodní vrstva s naneseným odpadem čedičových vláken



Obr. 42 Spodní vrstva pohled shora



Obr. 43 Přiložená první polovina druhé vrstvy



Obr. 44 Detail přechodu vrstev



Obr. 45 Přiložená pátá vrstva



Obr. 46 Pohled shora na přiloženou pátou vrstvu



Obr. 47 Helma č. 2 – vyztužená krátkými čedičovými vlákny



Obr. 48 Helma č. 1 a helma č. 2

2.5.3 Testování odolnosti pomocí volně padajícího břemene s ostrým hrotem

Buchary řadíme mezi **tvářecí stroje energetické**. Do této skupiny energetických strojů můžeme zařadit stroje, u nichž se přetvářená práce získá přeměnou kinetické energie padajícího nebo urychleného beranu. Beran působí na tvářený materiál uložený na stole (šabotě).

Buchary rozdělujeme na:

- šabotové
- protiúderové (bezšabotové).

Šabota – blok z oceli tvořící základ bucharu, v němž se upevňují spodní (pevné) části kovacíh strojů – kovadel nebo zápustek. Hmotnost šaboty je osmi až padesáti násobná ve srovnání s beranem. Energetické tj. šabotové ztráty jsou menší, čím je hmotnost šaboty větší.

Deformační práce se u bucharů získá přeměnou kinetické energie, nahromaděné v padajících částech stroje.

Podle dopadové rychlosti beranu lze rozlišit buchary pracující:

- s běžnou kovací rychlostí $v = 4 \text{ až } 8 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$
- se zvýšenou rychlostí $v = 20 \text{ až } 60 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$

Pomocí **volně padajícího beranu** lze docílit běžných kovacíh rychlostí. Větších dopadových rychlostí můžeme dosáhnout pomocí přídavné síly. Volnému pádu beranu z výšky 1 až 2 m odpovídá dopadová rychlost 4,5 m až 6 $\text{[m.s}^{-1}\text{]}$.

Padačí buchary jsou buchary pracující s volně padajícím beranem. Pohon těchto strojů je v činnosti pouze v jedné fázi pracovního cyklu (zvedání beranu), označujeme je jako jednočinné. Buchary, které pracují s urychlením beranu přídavnou silou, jsou buchary dvojčinné. Pohon je v činnosti v obou fázích pracovního cyklu (zvedání a spouštění beranu). [13]

Podle ústrojí k přenosu energie rozdělujeme buchary na:

- mechanické (pružinové, třecí – deskové, řemenové, lanové, řetězové aj.)
- hydraulické
- plynové (pneumatické, parní)
- elektromagnetické
- kombinované (např. pneumohydraulické, parovzdušné).

Podle způsobu práce rozdělujeme buchary na:

- jednočinné (neurychlované) – pohyb beranu je způsoben volným pádem
- dvojčinné (urychlované).

Energie je dána vztahem:

$$w_p = m \cdot g \cdot H \quad (5)$$

kde m – hmotnost beranu a ostatních hmot s ním spojených

g – gravitační zrychlení

H – užitečný zdvih beranu.

Pohyb beranu směrem nahoru je způsoben různými nositeli energie.

Pro **úderovou práci** platí:

$$A = \eta_0 \cdot G \cdot H \quad [\text{J}] \quad (6)$$

G – hmotnost beranu (padající části) [kg]

H – výška pádu [m]

η_0 - účinnost

$$\eta_0 = \frac{v_0^2}{v_t^2} \quad (7)$$

v_0 - skutečná měřená rychlost při dopadu beranu

v_t - teoretická rychlost volného pádu.

Úderovou práci je možno určit:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{G}{g} \cdot v_0^2 \quad (8)$$

g – tíhové zrychlení 9,81 [Nm]

Rychlost beranu roste až do okamžiku styku s materiálem. Po úderu rychlost beranu klesá až na nulu přibližně podle paraboly.

Pro **okamžitou rychlost** platí:

$$v^2 = \frac{v_0^2}{h_0 - h} \cdot (h_0 - h - x) \quad (9)$$

x – vzdálenost od místa styku beranu s materiálem

Energie před úderem:

$$E = \frac{1}{2} . m . v^2 \quad (10)$$

Podle způsobu práce se buchary rozdělují :

- jednočinné – pohyb pohyblivých částí vyvozuje hmotností padajících částí. Pohyblivé části jsou nahoru zdvíhány parou, vzduchem, kapalinou, plynem nebo elektromotorem.
- dvojčinné – pohyb i směrem dolů vzniká hmotností pohyblivých částí s energií páry, vzduchu, plynu, kapaliny, elektrické energie nebo pružiny.

Druhy bucharů:

- buchary parovzdušné
- buchary pneumatické – buchary mají vlastní kompresor, používají se převážně pro volné kování a přechování za tepla.
- buchary mechanické - buchary jsou poháněny elektromotory, ze kterých se energie přenáší pomocí mechanických přenosových mechanismů.
- buchary hydraulické
- buchary plynové

[13,14]

2.6 Chemická odolnost kompozitu z čedičových vláken

Úlohou experimentální části bylo:

- Určit změny hmotnosti kompozitu vlivem vybraných chemikálií.
- Určit časovou závislost úbytku hmotnosti kompozitu vlivem působení chemikálií.
- Sledovat poškození kompozitu působením chemikálií pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu.

Cílem experimentální části bylo zjistit, jak vybrané roztoky působí na kompozity z čedičových vláken.

2.6.1 Použitá chemická činidla

2M NaOH – hydroxid sodný

2M H_2SO_4 - kyselina sírová

2M HCl – kyselina chlorovodíková

2M NaOH – 80 g/l

2M H_2SO_4 – 98 g/l

2M HCl – 73 g/l

Do skleněné nádoby s destilovanou vodou bylo pomocí míchání pomalu přidáváno 80 g hydroxidu sodného. Nádoba byla vložena do studené vody, aby došlo k ochlazení hydroxidu sodného. Roztok byl dolit destilovanou vodou do celkového množství 1 litru. Kyselina sírová a kyselina chlorovodíková byla vytvořena stejným způsobem.

2.6.2 Použité přístroje

Vytvrzovací pec pro sušení vzorku

Elektronické digitální váhy Sartorius

Rastrovací elektronový mikroskop VEGA TS 5130

Elektronické digitální váhy Sartorius

Váhy jsou využívány pro měření hmotnosti vláken, tkanin, pletenin.

Technické údaje:

Rozsah : 0 - 250 g

Citlivost: $\pm 0,001$ g

Rastrovací elektronový mikroskop VEGA TS 5130

Počítačem řízený rastrovací mikroskop. Používá se k pozorování povrchů při velkém zvětšení a s velkou hloubkou ostrosti.

Technické údaje:

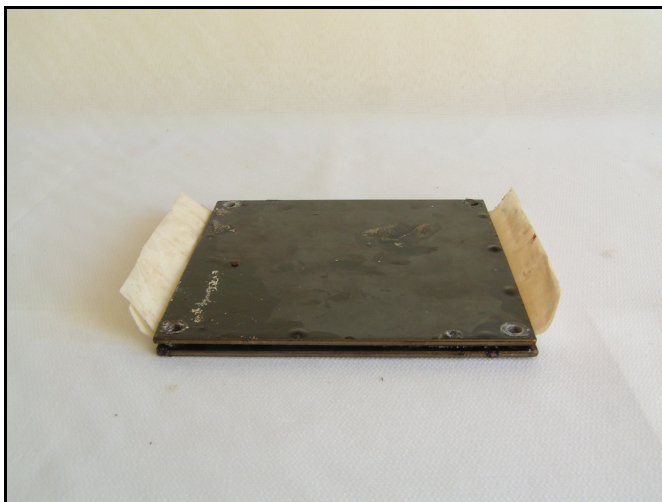
Rozlišení: 3,5 nm

Zvětšení: 20 - 100 000 x

2.6.3 Výroba vzorku pro měření chemické odolnosti

Příprava vzorku pro měření chemické odolnosti byla prováděna obdobným způsobem jako u vzorků pro měření tahu a ohybu. Čedičová tkanina byla natřena vrstvou Lukosilu M 130, který se nechal na tkanině působit do druhého dne. Následně byla

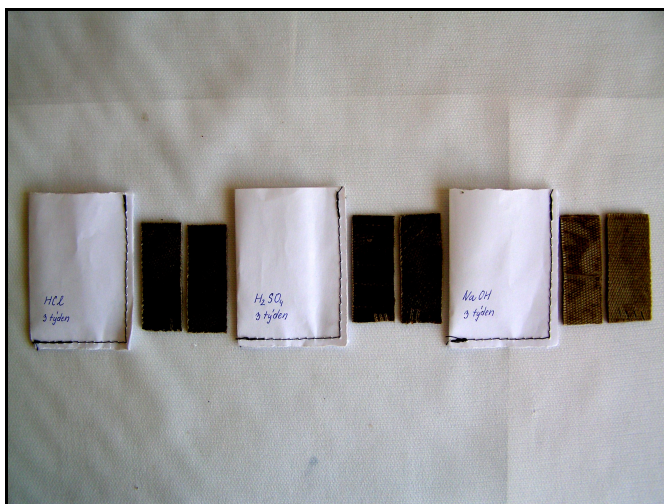
nanesena druhá vrstva Lukosilu M 130 a tkanina byla vložena do vytvrzovací pece, kde byla sušena při teplotě 200 °C po dobu šesti hodin. Z tkaniny byly vystříženy čtverce o velikosti 100 x 100 mm střížené po osnově a útku. Vzorky byly tentokrát vytvářeny pomocí kovových lišt ve tvaru čtverců, viz obr. 49. Mezi lišty byl vložen teflonový pečicí papír, aby se hotový vzorek nepoškodil. Na lištu byly postupně přikládány čtverce střížené po osnově a útku a každá vrstva byla natřena Lukosilem M 130. Vzorek je vytvořen ze šesti vrstev, které se střídají střížené po osnově a útku. Lišta s připraveným vzorkem pro sušení byla vložena do vytvrzovací pece. Sušení probíhalo při teplotě 200 °C po dobu šesti hodin. Poté byl hotový vzorek nařezán pilkou na konečné vzorky o velikosti 20 x 50 mm.



Obr. 49 Kovová lišta na výrobu kompozitů

2.6.4 Popis průběhu experimentu

Vzorky byly testovány po dobu šesti týdnů. Testované vzorky byly vytahovány z roztoků po 7, 14, 21, 28 a 42 dnech. Vzorky vytažené z roztoku byly důkladně opláchnuty vodou a sušeny ve vytvrzovací peci při teplotě 110 °C po dobu 20 minut. Na obr. 51 můžeme vidět vzorky testované ve třetím týdnu. Opět byly vzorky zváženy a vloženy do pece na dalších 10 minut. Po vysušení následovalo poslední vážení vzorků. Sušení a vážení probíhalo do doby, než se váha vzorků ustálila.



Obr. 50 Vzorky testované ve třetím týdnu

2.6.5 Vzorce použité pro zpracování výsledků experimentu

Stanovení váhového úbytku

Zbytková hmotnost je definována vztahem:

$$R_Z = \frac{M_K}{M_P} * 100 \text{ [%]} \quad (11)$$

M_K - hmotnost materiálu po působení činidla

M_P - počáteční hmotnost materiálu

Průměrná relativní rychlost degradace definována vztahem:

$$K_P = \frac{M_P - M_K}{t_P * M_P} = \frac{100 - R_Z}{t_P} \text{ [% * } hod^{-1} \text{]} \quad (12)$$

t_P - doba působení [hod]

Působení daného činidla je agresivnější, čím je relativní rychlost degradace větší.

$$R_Z = R_A + \xi(100 - R_A) \cdot \exp\left[-K \cdot t\right] \quad (13)$$

R_∞ - zbytková hmotnost v rovnováze [%]

K – rychlostní konstanta degradace

Diskuze výsledků experimentu

3.1 Výsledky experimentu měření tahu

Měření bylo provedeno pouze na vzorku č. 1 (vzorek skládající se z šesti vrstev), u zbývajících silnějších vzorků i po několika pokusech nebylo možno provést měření. Vzorky prokluzovaly z čelistí. Byl proveden pokus, kdy na konce vzorku byl přilepen smirkový papír o velikosti 20 mm x 25 mm, přesto vzorky neustále prokluzovaly z čelistí.

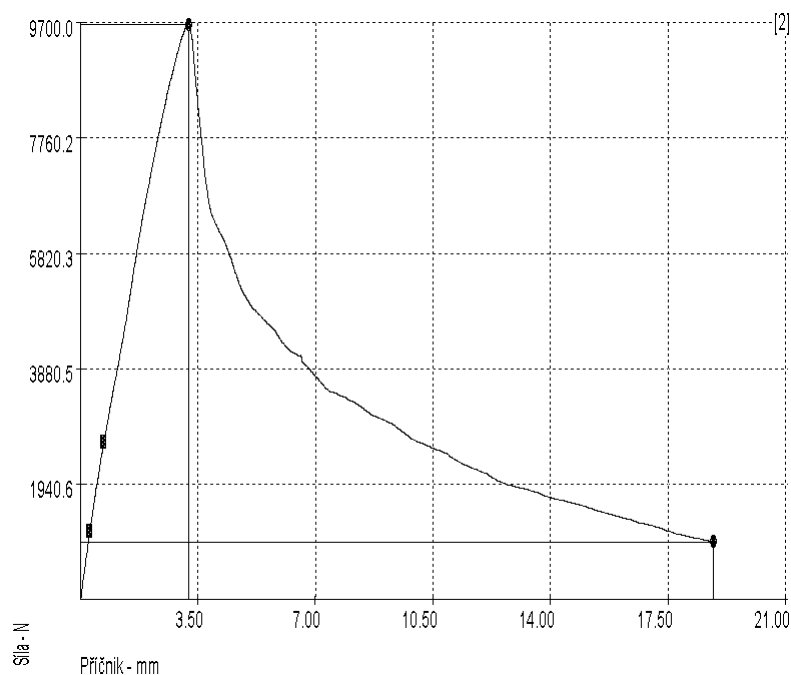
V následující tabulce jsou zaznamenány hodnoty měření tahu na vzorku č. 1. Grafy zaznamenávající průběh zkoušky jsou umístěny v příloze 1.

Tab. 7 Výsledky měření tahu vzorek č. 1

Zkouška	Amax	Fmax	W	Fb	E	Amax
	mm	N	J	N	MPa	%
1	2,54	6594,94	13,88	688,14	1056,14	12,72
2	2,27	6362,85	44,92	638,39	1254,79	11,33
3	3,22	9660,44	62,48	966,81	1448,84	16,1
4	3,14	8102,48	42,77	812,29	1058,05	15,69

Tab. 8 Výsledky měření tahu vzorek č. 1

Zkouška	Ab	t	v
	%	sec	mm/min
1	28,01	29,26	11,49
2	99,85	104,18	11,5
3	94,01	98,68	11,43
4	68,54	71,98	11,43



Obr. 51 Graf znázorňující průběh zkoušky na vzorku č. 1

3.2 Výsledky experimentu měření průhybu pomocí dynamometru

Výsledné požadované hodnoty F_x a σ nebyly naměřeny. Chyba může být ve špatném seřízení stroje. V následující tabulce můžeme vidět hodnoty modulu pružnosti

Tab. 9 Průhyb – vzorek č. 1

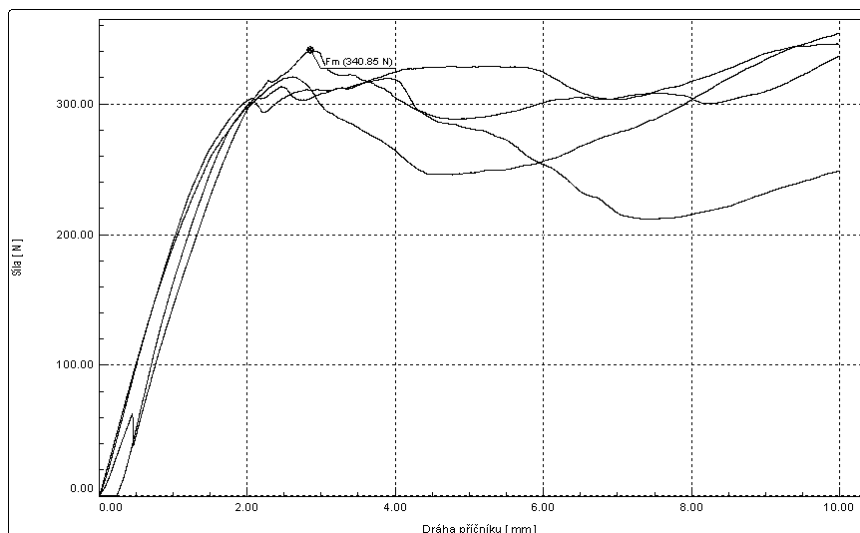
Vzorek č. 1	E [MPa]	Fm [N]
Počet zkoušek	4	4
Průměrná hodnota zkoušek	4 083,62	89,31
Směrodatná odchylka zkoušek	893,3	14,45
Variační koeficient zkoušek	21,88	16,18
Minimální hodnota zkoušek	3 168,08	73,47
Maximální hodnota zkoušek	4 988,37	106,84

Tab. 10 Průhyb-vzorek č. 2

Vzorek č. 2	E [N / mm^2]	Fm [N]
Počet zkoušek	5	5
Průměrná hodnota zkoušek	823,21	427,94
Směrodatná odchylka zkoušek	148,71	77,69
Variační koeficient zkoušek	18,06	18,15
Minimální hodnota zkoušek	667,37	346,01
Maximální hodnota zkoušek	1 019,5	530,4

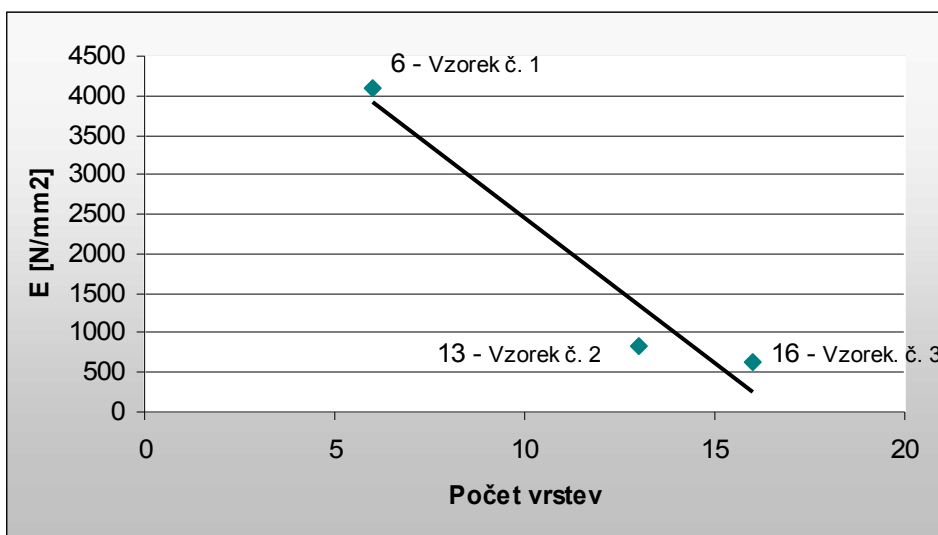
Tab. 11 Průhyb – vzorek č. 3

Vzorek č. 3	E [N/mm^2]	Fm [N]
Počet zkoušek	8	8
Průměrná hodnota zkoušek	635,21	682,16
Směrodatná odchylka zkoušek	163,87	96,75
Variační koeficient zkoušek	25,8	14,18
Minimální hodnota zkoušek	363,44	545,3
Maximální hodnota zkoušek	851,5	865,73



Obr. 52 Graf znázorňující průběh zkoušky na vzorku č. 2

Graf 1 Průměrné hodnoty modulu pružnosti E v ohybu



Součástí diplomové práce je výroba pracovní helmy z kompozitu s čedičovou vlákennou výztuží. Pro porovnání byly vytvořeny dvě helmy skládající se z šesti vrstev tkaniny. Helmy jsou stříhově stejné, rozdíl u helmy č. 2 po natření vrstvy Lukosilem M 130 je na vrstvu nanesen odpad z krátkých čedičových vláken. Postup výroby je opakován u všech vnitřních vrstev. Z tohoto důvodu byly dodatečně

vytvořeny další vzorky pro měření ohybu. Výroba vzorků je stejná, jak je uvedeno v kapitole 2.1, rozdíl je v nanesení odpadu z krátkých čedičových vláken mezi vrstvy. Při výrobě muselo být nanášeno dostatečné množství Lukosilu M 130. Při výrobě vzorků docházelo k rozlepování jednotlivých vrstev a tím k znehodnocení vzorků, proto musela být dána velká pozornost při nanášení Lukosilu M 130.

Pro měření byl zhotoven vzorek o šesti vrstvách s přidáním odpadu z krátkých čedičových vláken, dále jen **vzorek č. 4**.

Tab. 12 Průhyb - vzorek s odpadem z krátkých čedičových vláken

Vzorek č. 4	E [N / mm²]	Fm [N]
Počet zkoušek	5	5
Průměrná hodnota zkoušek	647,14	202,38
Směrodatná odchylka zkoušek	321,31	76,58
Variační koeficient zkoušek	49,65	37,84
Minimální hodnota zkoušek	259,38	128,3
Maximální hodnota zkoušek	992,78	292,56

Ukázky grafů jsou uvedeny v příloze č. 1 diplomové práce.

Tab. 13 Výsledky napětí v ohybu a modulu pružnosti v ohybu

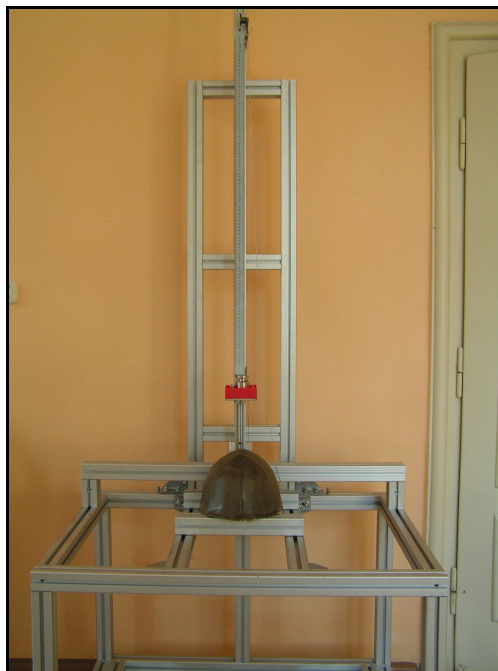
Číslo vzorku	σ [kPa]	E [MPa]
	Napětí v ohybu	Modul pružnosti v ohybu
Vzorek č. 1	80,13	13 355
Vzorek č. 2	99,45	8 287,5
Vzorek č. 3	103,89	6 925,84

Tab. 14 Porovnání výsledku napětí v ohybu a modulu pružnosti v ohybu u vzorku č. 1 a vzorku č. 4

Číslo vzorku	σ [kPa]	E [MPa]
	Napětí v ohybu	Modul pružnosti v ohybu
Vzorek č. 1	80,13	13355
Vzorek č. 4	54,86	4571,25

3.3 Výsledky experimentu testování odolnosti pomocí volně padajícího břemene s ostrým hrotem

Testování helmy bylo prováděno na testovacím zařízení s volně padajícím břemenem, viz obr. 53. Výška pádu ostrého hrotu byla nastavena na 1 m. Zatěžující závaží bylo 1 kg těžké. Na každé helmě byly provedeny 4 měření. První náraz byl nastaven do zadního středového švu, druhý pokus do bočního přeplátovaného švu, třetí náraz byl nastaven do zadního dílu a poslední náraz do předního dílu. Na ostrém hrotu byla po každém nárazu tužkou zaznamenána hloubka vpichu a poté pomocí pravítka naměřena hloubka každého vpichu.



Obr. 53 Testovací zařízení s volně padajícím břemenem

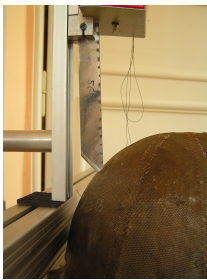
V následujících tabulkách jsou zaznamenány hodnoty hloubky průrazu ostrého hrotu helmou.

Tab. 15 Hloubka vpichu – helma č. 1

Středový šev Hloubka vpichu [mm]	Přeplátovaný šev Hloubka vpichu [mm]	Přední díl Hloubka vpichu [mm]	Zadní díl Hloubka vpichu [mm]
--	--	--------------------------------------	-------------------------------------

			
42	25	27	42

Tab. 16 Hloubka vpichu – helma č. 2 - vyztužená odpadem z krátkých čedičových vláken

Středový šev Hloubka vpichu [mm]	Přeplátovaný šev Hloubka vpichu [mm]	Přední díl Hloubka vpichu [mm]	Zadní díl Hloubka vpichu [mm]
			
11	9	10	5

Hloubka vpichu do středového švu u helmy vyztužené odpadem z krátkých čedičových vláken (dále jen helma č. 2) je téměř 4krát menší než u helmy č. 1. Hloubka vpichu do přeplátovaného švu a do volné plochy předního dílu je u helmy č. 2 téměř 3krát menší než u helmy č. 1. Vpich do volné plochy zadního dílu je u helmy č. 2 osmkrát menší než u helmy č. 1. Pomocí testovacího zařízení s volně padajícím břemenem bylo zjištěno, že helma č. 2 je několikanásobně odolnější než helma č. 1.

3.4 Výsledky experimentu testování chemické odolnosti kompozitu

Připravené kompozitní vzorky byly podrobeny působení tří činidel:

- 2M NaOH – hydroxid sodný

- 2M H_2SO_4 - kyselina sírová
- 2M HCl – kyselina chlorovodíková

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty veličin R_Z a K_P , které byly vypočteny dle vztahů (11, 12).

Pomocí programu QC Expert byly vytvořeny grafy, kroužky v grafech znázorňují úbytek hmotnosti v daném čase.

Po působení činidel dochází k rozrušení struktury kompozitu. Pro názornost byly vytvořeny snímky z elektronického rastrovacího mikroskopu. Ukázky snímků jsou uvedeny v příloze 4.

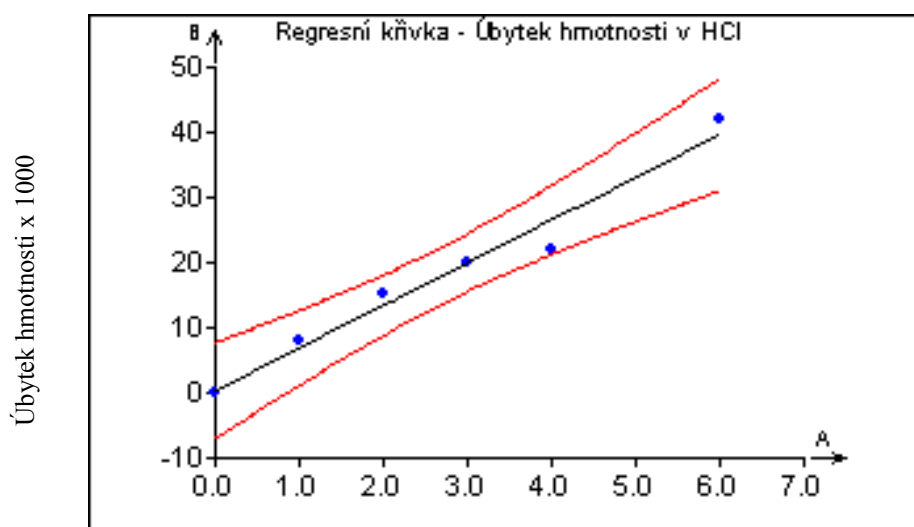
Výsledky působení v HCl

Tab. 17 Změny hmotnosti po působení 2M HCl

Kompozit	R_Z [%] (168 hodin)	R_Z [%] (336 hodin)	R_Z [%] (504 hodin)	R_Z [%] (672 hodin)	R_Z [%] (1008 hodin)
Vzorek č. 1	99,569	99,184	99,042	98,899	97,752
Vzorek č. 2	99,559	99,359	98,986	98,982	97,981

Tab. 18 Hodnoty K_P po působení 2M HCl

Kompozit	K_P [%·hod ⁻¹] (168 hodin)	K_P [%·hod ⁻¹] (336 hodin)	K_P [%·hod ⁻¹] (504 hodin)	K_P [%·hod ⁻¹] (672 hodin)	K_P [%·hod ⁻¹] (1008 hodin)
Vzorek č. 1	0,00257	0,00243	0,00190	0,001638	0,00223
Vzorek č. 2	0,00263	0,00191	0,00201	0,00151	0,00200



Obr. 54 Zbytková hmotnost kompozitu po působení v HCl

$$\text{Model: } y = 6,54 x + 0,386$$

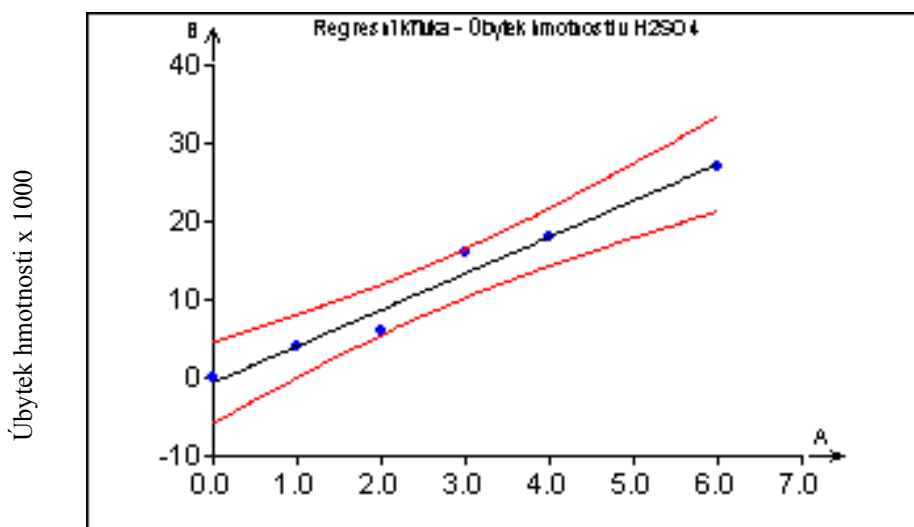
Výsledky působení v 2M H_2SO_4

Tab. 19 Změny hmotnosti po působení 2M H_2SO_4

Kompozit	R _Z [%] (168 hodin)	R _Z [%] (336 hodin)	R _Z [%] (504 hodin)	R _Z [%] (672 hodin)	R _Z [%] (1008 hodin)
Vzorek č.1	99,779	99,681	99,352	99,216	99,084
Vzorek č.2	99,862	99,784	99,125	98,970	98,330

Tab. 20 Hodnoty K_P po působení 2M H_2SO_4

Kompozit	K _P [%·hod ⁻¹] (168 hodin)	K _P [%·hod ⁻¹] (336 hodin)	K _P [%·hod ⁻¹] (504 hodin)	K _P [%·hod ⁻¹] (672 hodin)	K _P [%·hod ⁻¹] (1008 hodin)
Vzorek č.1	0,00132	0,00095	0,00129	0,00117	0,00091
Vzorek č.2	0,00082	0,00064	0,00174	0,00153	0,00166



Obr. 55 Zbytková hmotnost kompozitu po působení v H_2SO_4

$$\text{Model: } y = 4,65 x - 0,586$$

Doba v týdnech

Výsledky působení v 2M NaOH

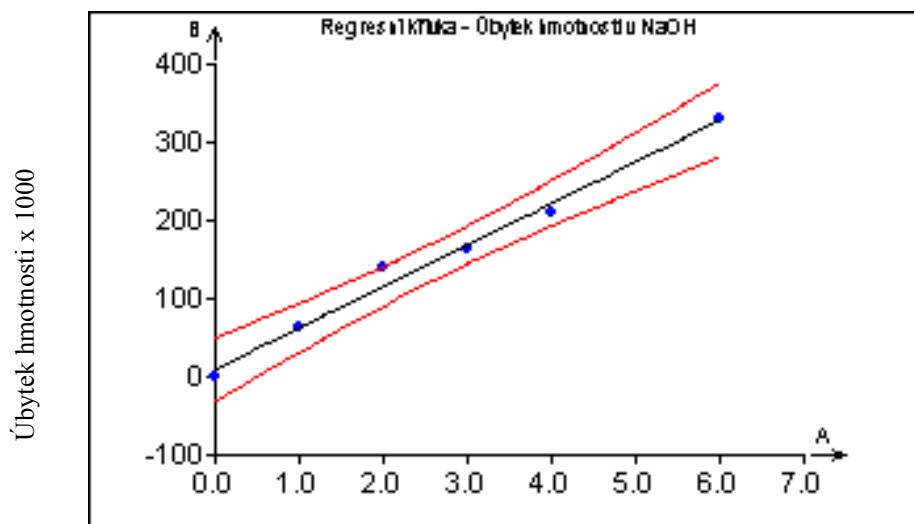
Tab. 21 Změny hmotnosti po působení 2M NaOH

Kompozit	R _Z [%] (168 hodin)	R _Z [%] (336 hodin)	R _Z [%] (504 hodin)	R _Z [%] (672 hodin)	R _Z [%] (1008 hodin)
Vzorek č. 1	97,221	93,152	92,519	90,983	85,768

Vzorek č. 2	96,643	92,854	92,401	90,328	82,169
-------------	--------	--------	--------	--------	--------

Tab. 22 Hodnoty K_p po působení 2M NaOH

Kompozit	K_p [%·hod ⁻¹] (168 hodin)	K_p [%·hod ⁻¹] (336 hodin)	K_p [%·hod ⁻¹] (504 hodin)	K_p [%·hod ⁻¹] (672 hodin)	K_p [%·hod ⁻¹] (1008 hodin)
Vzorek č. 1	0,01654	0,02038	0,01484	0,01342	0,01412
Vzorek č. 2	0,01998	0,02127	0,01508	0,01439	0,01769



Obr. 56 Zbytková hmotnost kompozitu po působení v NaOH

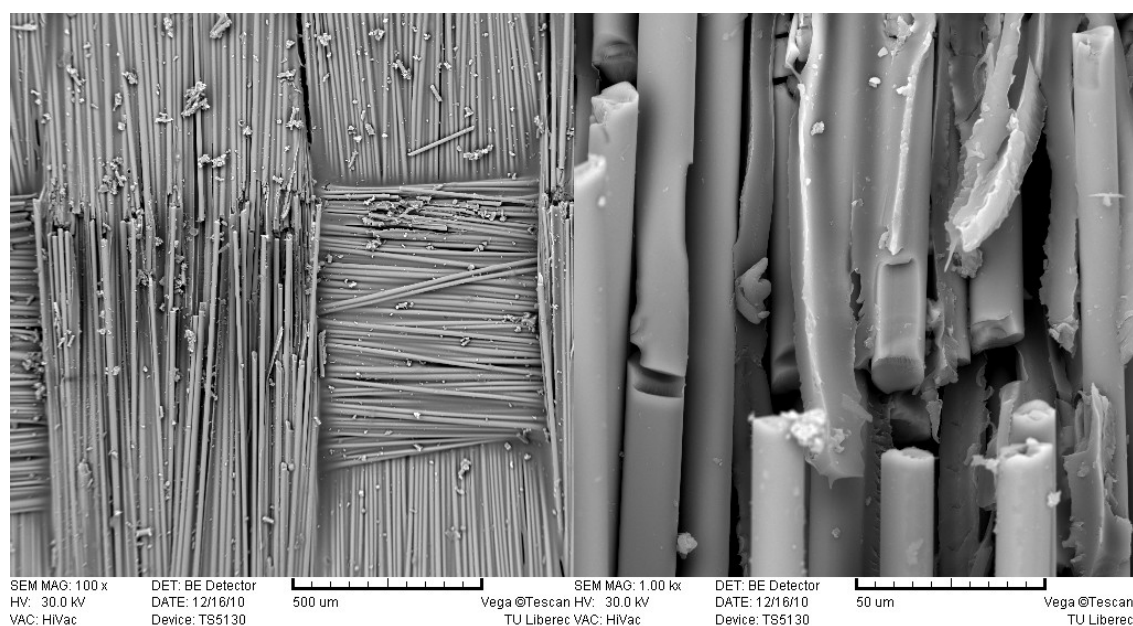
$$\text{Model: } y = 53.13 x + 9.66$$

Doba v týdnech

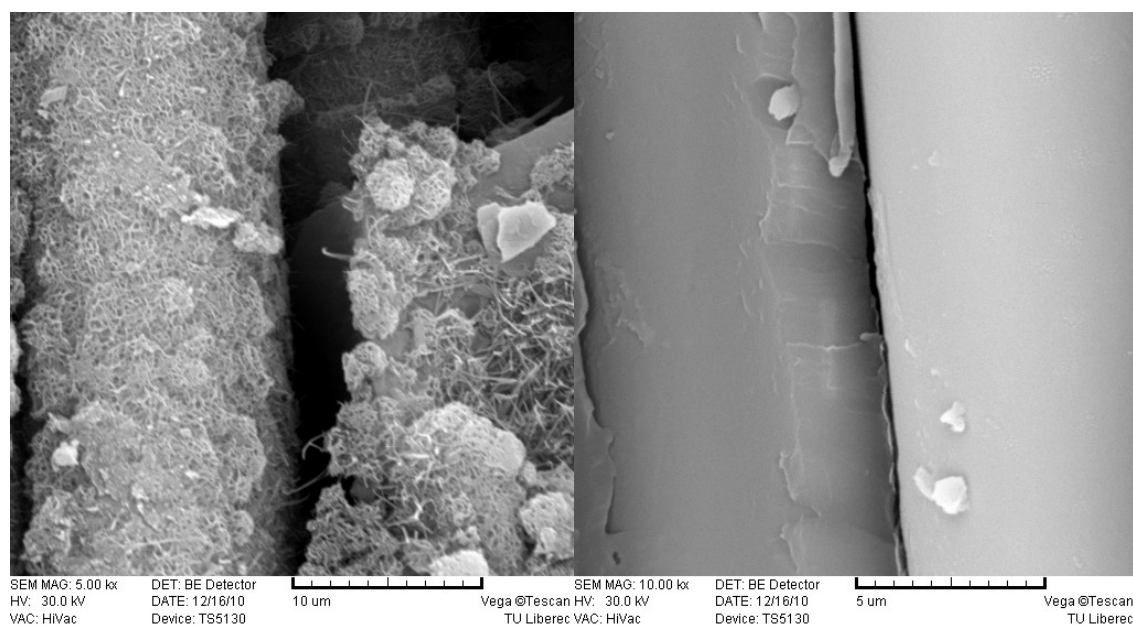
Jak je z tab. 17, 19, 21 patrné, největší hmotnostní úbytek mají kompozity po působení v NaOH. Hmotnostní úbytek kompozitu je po šesti týdnech až 17 % z původní váhy. Podobné úbytky mají kompozity po působení v HCl a H_2SO_4 .

Obrázková dokumentace vyluhovaných kompozitů po 1 008 hodinách

Kompozit po 1008 hodinovém působení v HCl

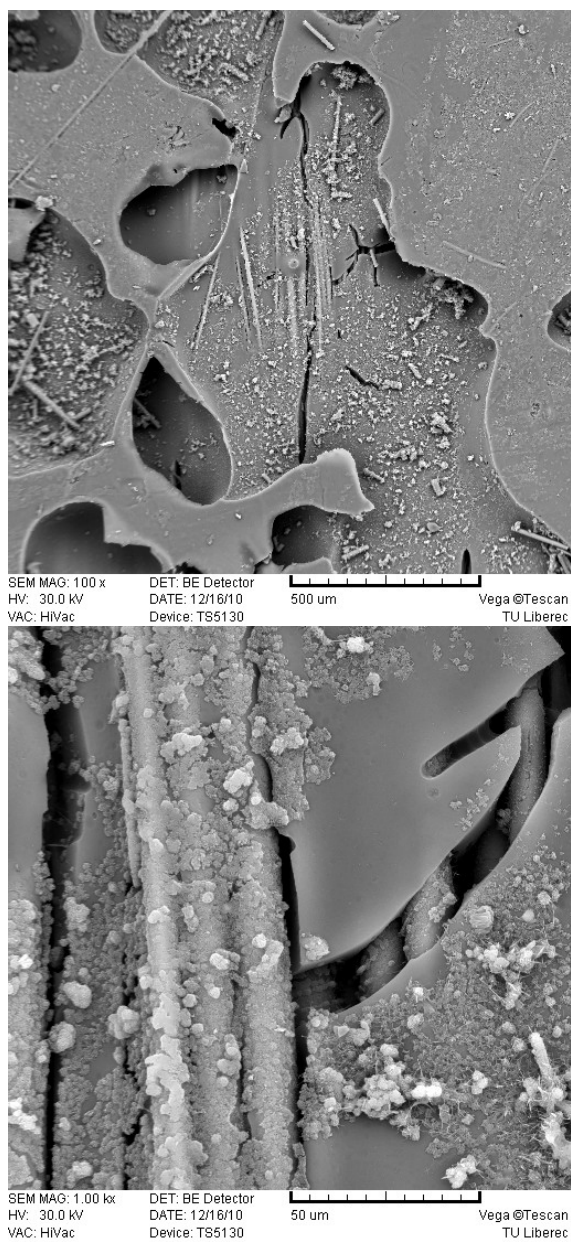


Obr. 57 Kompozit po 1008 hodinovém působení HCl

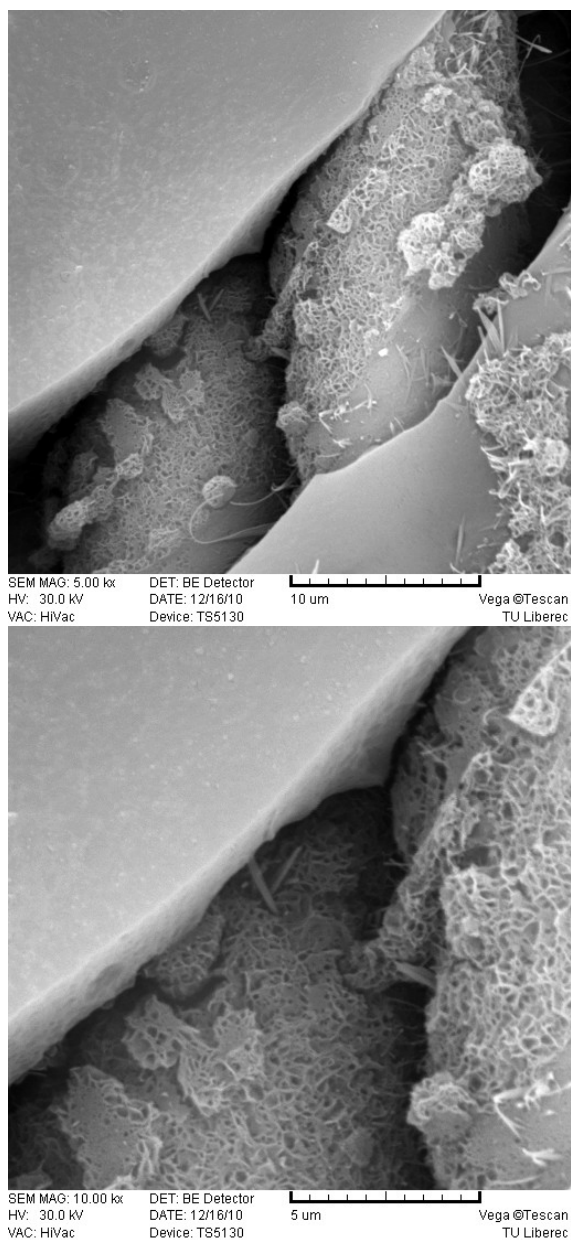


Obr. 58 Kompozit po 1008 hodinovém působení HCl

Kompozit po 1008 hodinovém působení v NaOH

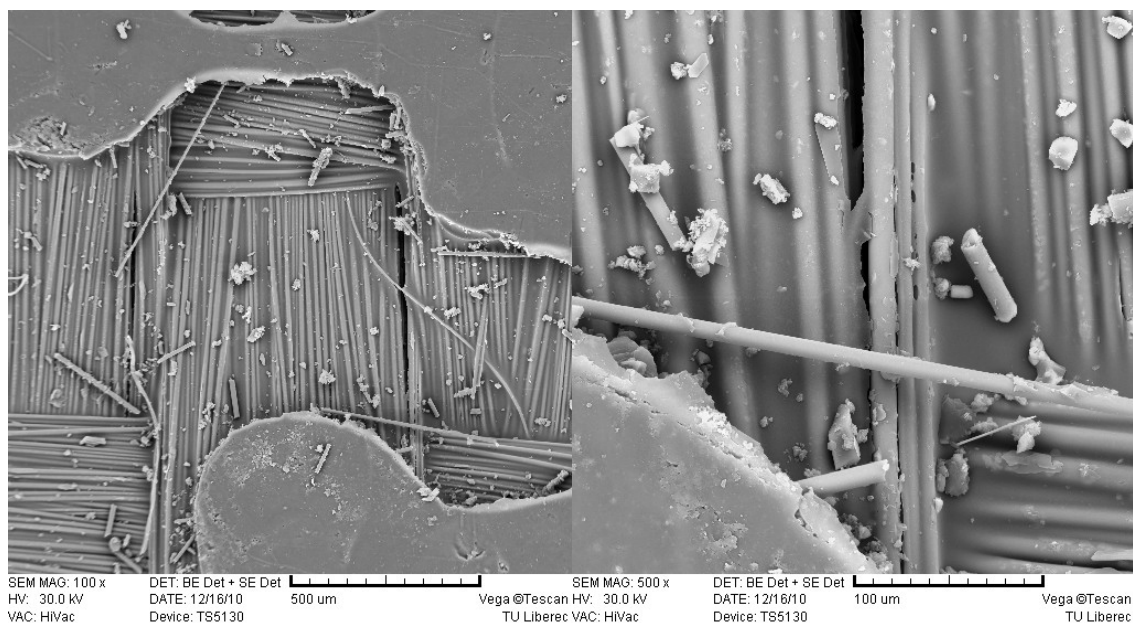


Obr. 59 Kompozit po 1008 hodinovém působení NaOH

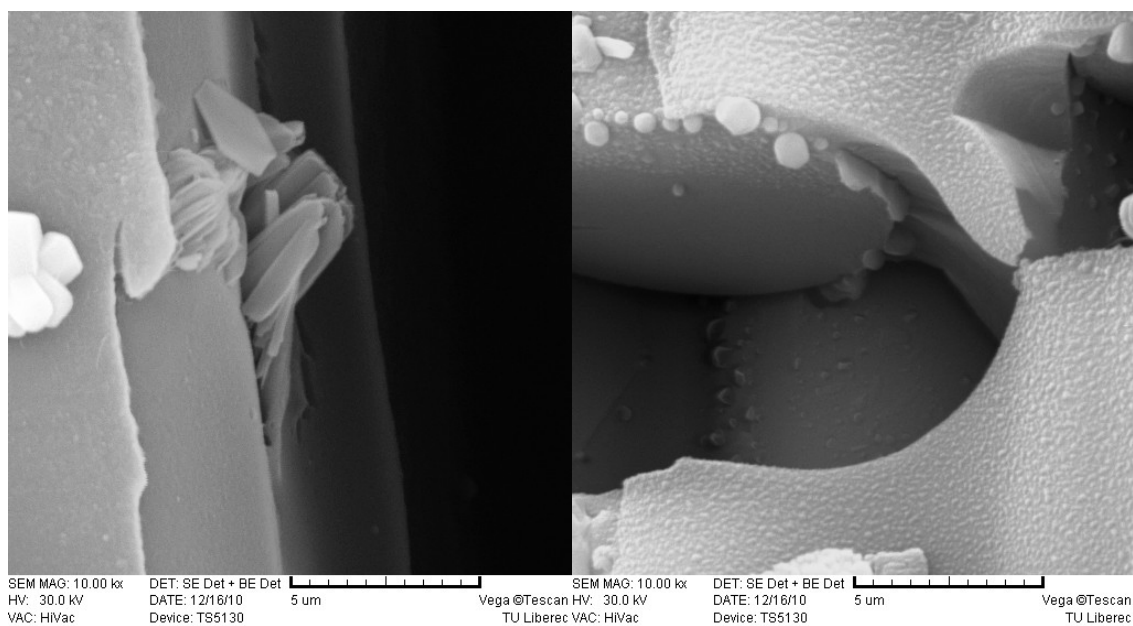


Obr. 60 Kompozit po 1008 hodinovém působení NaOH

Kompozit po 1008 hodinovém působení v H_2SO_4



Obr. 61 Kompozit po 1008 hodinovém působení H_2SO_4



Obr. 62 Kompozit po 1008 hodinovém působení H_2SO_4

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit kompozity s čedičovou vláknennou výztuží. Vyrobené kompozity byly testovány na tah a průhyb. Byl zjišťován hmotnostní úbytek vzorku po působení činidel NaOH, HCl, H_2SO_4 . Následně byly z kompozitu vyrobeny dvě helmy, které byly testovány na stroji s volně padajícím břemenem s ostrým hrotem. Zkouškou pomocí dynamometru bylo zjištěno:

- a) Pevnost v tahu nelze na kompozitech měřit z důvodu prokluzování z čelistí.
- b) Pevnost v průhybu dává signifikantní výsledky modulu ohybu E [MPa].
- c) Při vyztužení kompozitu krátkými (odpadovými) čedičovými vlákny byly zjištěny stejné výsledky jako u vzorku se 16 vrstvami výztuže.

Výroba pracovní helmy z kompozitu se ukázala jako velmi zdoluhavý proces. Nejdříve musel být vyřešen problém, jaké podpurné těleso se použije pro vytvarování helmy. Pro tento účel byla zakoupena kovová vojenská helma, podle které byl vyhotoven stříh. Na výrobu helmy nebylo použito žádného stlačování, byla použita **metoda sešívání** jednotlivých dílů. Následně byly obě helmy testovány na stroji s volně padajícím břemenem s ostrým hrotem. Zkouškou bylo zjištěno, že helma vyztužená odpadem z krátkých čedičových vláken je několikanásobně odolnější než helma č. 1. Na výrobu helmy byl použit jako sešivací materiál polyesterové nitě. V příštím experimentu by bylo vhodné pro výrobu použít kevlarové nitě, které mají vyšší tepelnou odolnost. Helma by mohla být použita jako ochranná pomůcka na stavbách, slévárnách nebo v místech, kde je nebezpečí úrazu od pohybujících se předmětů.

Experimentem hmotnostního úbytku bylo zjištěno, že největší hmotnostní úbytek mají kompozity po působení v NaOH.

Seznam použité literatury

- [1] Společnost Fortel Design s.r.o. [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://www.kameny.eu/o-kamenech/cedic.html>
- [2] Atlas hornin [online] [cit. 20-11-2009]
Dostupný z: http://atlas.horniny.sci.muni.cz/magmaticke/magmatity_obecne.html
- [3] Společnost Basaltex a.s. [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://www.basaltex.cz/>
- [4] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 22-11-2009]
Dostupný z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20091104/06_Prednaska.pdf
- [5] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 22-11-2009]
Dostupný z: <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-54-49.pdf>
- [6] Odetka a.s. [online] [cit. 5-12-2009]
Dostupný z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_basalt.aspx
- [7] Bareš R.A., Kompozitní materiály, SNTL, Praha 1988
- [8] Paďourek K., Kompozitní materiály – druhy a jejich užití, Liberec 2007
- [9] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 10-12-2009]
Dostupný z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20091005/01_Prednaska.pdf
- [10] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 10-12-2009]
Dostupný z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20100111/11_Prednaska.pdf
- [11] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 10-12-2009]
Dostupný z: <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-55-35.pdf>
- [12] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 11-12-2009]
Dostupný z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20091005/01_Prednaska.pdf
- [13] Poznámky k přednáškám ČVUT Praha [online] [cit. 13-6-2010]
Dostupný z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Tvareci_stroje.pdf
- [14] Ústav strojírenské technologie [online] [cit. 13-6-2010]
Dostupný z:
http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/vyrobni_stroje_a_zarizeni__novotny.pdf
- [15] Lučební závody Kolín [online] [16-2-2010]

Dostupný z: <http://lucbni.hink.cz/data/data/Lukosil/Prospekty/Lukosil>

- [16] Militký J., Přednášky, Textilní vlákna, Speciální vlákna, TU Liberec 2005

Seznam použitých obrázků

- Obr. 1 Čedič
- Obr. 2 Magma
- Obr. 3 Krystal nefelinu
- Obr. 4 Olivín
- Obr. 5 Čedičové vlákno v lomu
- Obr. 6 Čedičové vlákno – podélný směr
- Obr. 7 Schematické znázornění výroby čedičových vláken
- Obr. 8 Čedičový roving
- Obr. 9 Sekaná čedičová vlákna
- Obr. 10 Dlouhá sekaná čedičová vlákna
- Obr. 11 Tkanina z čedičových vláken
- Obr. 12 Detail zvukově a tepelně izolační desky z čedičových vláken
- Obr. 13 Tkaninová výztuž, laminát, krátkovláknenná výztuž s náhodnou orientací, dlouhovláknenná výztuž jednosměrně orientovaná
- Obr. 14 Znázornění synergického efektu v kompozitním materiálu
- Obr. 15 Ruční výroba zalitím tkaniny ve formě a zaválečkováním
- Obr. 16 Poloautomatická výroba zalitím tkaniny ve formě a zalisováním
- Obr. 17 Poloautomatická výroba zalitím tkaniny ve formě s použitím přetlaku
- Obr. 18 Automatická výroba zalitím tkaniny ve formě s použitím vakua
- Obr. 19 Princip výroby navíjením spojitých vláken na jádro
- Obr. 20 Princip vstřikování kompozitu
- Obr. 21 Využití kompozitu na letadle
- Obr. 22 Kovová lišta se zatížením pro vytváření vzorku
- Obr. 23 Graf závislost doby vytvrzení na teplotě
- Obr. 24 Tira Test 2300
- Obr. 25 Schéma třibodového zatěžování
- Obr. 26 Měření průhybu na přístroji Tira Test 2300
- Obr. 27 Reálný pohled na průhyb vzorku č. 1 a vzorku č. 3 na přístroji Tira Test 2300
- Obr. 28 TMA čedičových vláken
- Obr. 29 TGA použité pryskyřice polysiloxan*
- Obr. 30 Kovová vojenská helma

Obr. 31 Střih pro vyhotovení helmy
Obr. 32 Spodní vrstva helmy
Obr. 33 Pohled shora na spodní vrstvu
Obr. 34 Polovina druhé vrstvy helmy
Obr. 35 Detail spojení švů v horní části helmy
Obr. 36 Vojenská helma obalená teflonovým pečicím papírem
Obr. 37 Spodní vrstva helmy natřená vrstvou Lukosilu M 130
Obr. 38 Pohled shora na vrchní vrstvu helmy
Obr. 39 Helma č. 1
Obr. 40 Odpad z krátkých čedičových vláken
Obr. 41 Spodní vrstva s naneseným odpadem z čedičových vláken
Obr. 42 Spodní vrstva pohled shora
Obr. 43 Přiložená první polovina druhé vrstvy
Obr. 44 Detail přechodu vrstev
Obr. 45 Přiložená pátá vrstva
Obr. 46 Pohled shora na přiloženou pátou vrstvu
Obr. 47 Helma č. 2 – vyztužená krátkými čedičovými vlákny
Obr. 48 Helma č. 1 a helma č. 2
Obr. 49 Kovová lišta na výrobu kompozitů
Obr. 50 Vzorky testované ve třetím týdnu
Obr. 51 Graf znázorňující průběh zkoušky na vzorku č. 1
Obr. 52 Graf znázorňující průběh zkoušky na vzorku č. 2
Obr. 53 Testovací zařízení s volně padajícím břemenem
Obr. 54 Zbytková hmotnost kompozitu po působení v HCl
Obr. 55 Zbytková hmotnost kompozitu po působení v H_2SO_4
Obr. 56 Zbytková hmotnost kompozitu po působení v NaOH
Obr. 57 Kompozit po 1008 hodinovém působení HCl
Obr. 58 Kompozit po 1008 hodinovém působení HCl
Obr. 59 Kompozit po 1008 hodinovém působení NaOH
Obr. 60 Kompozit po 1008 hodinovém působení NaOH
Obr. 61 Kompozit po 1008 hodinovém působení H_2SO_4
Obr. 62 Kompozit po 1008 hodinovém působení H_2SO_4

Seznam použité literatury u obrázků

- [1] Navajo, Otevřená encyklopedie [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://cedic.navajo.cz/>
- [2] <http://elblogdeescarcha.blogspot.com/>
- [3] Institut geologického inženýrství [online] [cit. 20-11-2009]
Dostupný z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/rudy/nefel%C3%ADn.html>
- [4] Navajo, Otevřená encyklopedie [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://pyroxen.navajo.cz/>
- [5] Odetka a.s. [online] [cit. 5-12-2009]
Dostupný z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_basalt.aspx
- [6] Technická univerzita v Liberci [online] [cit. 6-12-2009]
Dostupný z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/?q=cs/cedic>
- [7] Sedmíková L., Kompozitní materiály s čedičovou vláknennou výztuží, Diplomová práce TU Liberec, 2008
- [8] Společnost Basaltex a.s. [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://www.basaltex.cz/cedic/ukazky/ukazky.htm>
- [9] Společnost Basaltex a.s. [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://www.basaltex.cz/cedic/ukazky/13.jpg>
- [10] Společnost Basaltex a.s. [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://www.basaltex.cz/cedic/ukazky/ukazky.htm>
- [11] Společnost Basaltex a.s. [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: <http://www.basaltex.cz/cedic/ukazky/12.jpg>
- [12] Institut geologického inženýrství [online] [cit. 22-11-2009]
Dostupný z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/tavene_horniny.html
- [13] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 10-11-2009]
Dostupný z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20091007/02_Prednaska.pdf
- [14] Bareš R.A., Kompozitní materiály, SNTL , Praha 1988
- [15] Skriptum TU Liberec [online] [cit. 20-2-2010]
Dostupný z: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20091005/01_Prednaska.pdf
- [16] Lučební závody Kolín [online] [16-2-2010]
Dostupný z: <http://lucetni.hink.cz/data/data/Lukosil/Prospekty/Lukosil.pdf>
- [17] Technická univerzita v Liberci [online] [cit. 10-11-2009]

Dostupný z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/kovy/kovy.htm>

- [18] Vysoké učení technické v Brně [online] [cit. 25-2-2010]

Dostupný z: <http://www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha9.doc>

Seznam tabulek

- Tab. 1 Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken
- Tab. 2 Hmotnosti vzorku s nánosem a bez nánosu
- Tab. 3 Parametry vstupního materiálu pro vlastní výrobu kompozitu
- Tab. 4 Uspořádání vrstev ve vzorcích
- Tab. 5 Technické parametry LUKOSILU M 130
- Tab. 6 Upínací délka vzorku, šířka vzorku, tloušťka vzorku 1, 2, 3, délka vzorku
- Tab. 7 Výsledky měření tahu vzorek č. 1
- Tab. 8 Výsledky měření tahu vzorek č. 1
- Tab. 9 Průhyb – vzorek č. 1
- Tab. 10 Průhyb-vzorek č. 2
- Tab. 11 Průhyb – vzorek č. 3
- Tab. 12 Průhyb - vzorek s odpadem z krátkých čedičových vláken
- Tab. 13 Výsledky napětí v ohybu a modulu pružnosti v ohybu
- Tab. 14 Porovnání výsledku napětí v ohybu a modulu pružnosti v ohybu u vzorku č. 1 a vzorku č. 2
- Tab. 15 Hloubka vpichu – helma č. 1
- Tab. 16 Hloubka vpichu – helma č. 2 - vyztužená odpadem z krátkých čedičových vláken
- Tab. 17 Změny hmotnosti po působení 2M HCl
- Tab. 18 Hodnoty K_p po působení 2M HCl
- Tab. 19 Změny hmotnosti po působení 2M H₂SO₄
- Tab. 20 Hodnoty K_p po působení 2M H₂SO₄
- Tab. 21 Změny hmotnosti po působení 2M NaOH
- Tab. 22 Hodnoty K_p po působení 2M NaOH

Seznam grafů

Graf 1 Průměrné hodnoty modulu pružnosti E v ohybu