

Recyklace polymerních kompozitů

Bc. Patrik Duchoň

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Patrik Duchoň
Osobní číslo:	T19495
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Studijní obor:	Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Recyklace polymérních kompozitů

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku recyklace kompozitních materiálů.
2. Aktuální stav a trendy v recyklaci. Uplatnění recyklovaných vláken v inženýrských aplikacích.
3. Experimentální recyklace pro danou kompozitní aplikaci.
4. Experimentální výroba kompozitních vzorků s recyklovanými vlákny.
5. Experimentální vyhodnotte mechanické vlastnosti.
6. Závěr a diskuse dosažených výsledků.

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

Seznam doporučené literatury:

- BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.
- ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8.
- ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.
- EHRENSTEIN G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Praha, SCIENTIA v Praze, 351s, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
- LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konštrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
- STRONG, A., B.: Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Application, Society of Manufacturing Engineers, 1989.
- SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.

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

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

L.S.

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

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá recyklací polymerních kompozitů, jejími způsoby a možném zpětném využití recyklátu. První, tedy teoretická část, je zaměřena na úvod do problematiky samotné recyklace. Jsou zde popsány možné způsoby i moderní trendy v recyklaci kompozitních polymerů.

Druhá, tedy praktická část, se zabývá recyklací kompozitních desek, jejich výrobou a srovnáním mechanických vlastností vybraných kompozitních systémů vůči nerecyklovaným ekvivalentům, pomocí mechanických zkoušek.

Klíčová slova: uhlíkový kompozit, hybridní kompozit, recyklace, polymer, pyrolýza, SEM, mechanické zkoušky

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the Recycling of polymer composites its methods and possible reuse of recycled materials. The theoretical part of the thesis is focused on the introduction to the issue of recycling itself. Possible methods and modern trends in the recycling of composite polymers are described here.

In the practical part the deals with the recycling of composite boards, their production and comparison of mechanical properties of selected composite systems against non-recycled equivalents using mechanical tests.

Keywords: carbon composite, hybrid composite, recycling, polymer, pyrolysis, SEM, mechanical tests

Touto cestou bych v první řadě rád poděkoval své vedoucí diplomové práce, paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za její trpělivý přístup, cenné rady, odborné připomínky, poskytnutý čas a zejména velmi příjemnou spolupráci při tvoření mé diplomové práce. Dále patří mé velké díky společnosti MSV Studénka s.r.o. a především panu Ing. Filipu Mlčůchovi, za jeho spolupráci a užitečné informace při provádění tepelné recyklace. Také bych rád poděkoval panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při provádění mechanických zkoušek a firmě FORM s.r.o. za pomoc při nařezání zkušebních tělísek.

V neposlední řadě patří mé obrovské díky rodině, především pak mým rodičům a přítelkyni, kteří mi byli oporou nejen během mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁL	12
1.2 KOMPOZITNÍ POLYMERY	12
1.3 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH POLYMERŮ.....	12
1.4 SPOJENÍ MATRICE A VYZTUŽUJÍCÍHO VLÁKNA	13
1.5 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH POLYMERŮ	13
2 RECYKALCE POLYMERNÍHO ODPADU	15
2.1 OBJEM POLYMERNÍHO ODPADU	15
2.2 DRUHY POLYMERNÍHO ODPADU	16
2.2.1 Technologický odpad	16
2.2.2 Průmyslový odpad.....	16
2.2.3 Uživatelský odpad.....	16
2.3 POLYMERNÍ ODPAD V ČESKÉ REPUBLICE.....	17
3 NAKLÁDÁNÍ S KOMPOZITNÍM ODPADEM BEZ RECYKLACE	18
3.1 SKLÁDKOVÁNÍ	18
3.2 SPALOVÁNÍ ODPADU	19
4 RECYKLACE POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	20
4.1 PROCESY RECYKLACE	22
4.2 MECHANICKÁ RECYKLACE.....	23
4.3 TEPELNÁ RECYKLACE.....	25
4.3.1 Pyrolýzní recyklace	25
4.3.2 Fluidní lože.....	33
4.3.3 Pyrolýza pomocí mikrovlnného záření	34
4.4 CHEMICKÁ RECYKLACE.....	34
4.4.1 Solvolýza při nízké teplotě.....	35
4.4.2 Solvolýza v podkritických a superkritických tekutinách	35
4.4.3 Elektrochemická recyklace	36
5 VYUŽITÍ RECYKLOVANÝCH KOMPOZITŮ	40
5.1 SOUČASNÍ NEJVĚTŠÍ VÝROBCI KOMPOZITNÍHO RECYKLÁTU	40
5.2 FINANČNÍ ZHODNOCENÍ RECYKLOVANÝCH VLÁKEN.....	41
5.3 APLIKACE RECYKLOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN.....	42
5.3.1 Automobilový průmysl	42
5.3.2 Železniční průmysl.....	45
5.3.3 Recyklovaná uhlíková vlákna pro výrobu forem a trup lodí.....	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	47

6	ZADÁNÍ A STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	48
7	VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU	49
7.1	PŘÍPRAVA FORMY	49
7.2	PŘÍPRAVA UHLÍKOVÉ A HYBRIDNÍ TKANINY	50
7.3	PŘÍPRAVA MATRICE.....	52
7.4	PROCES RUČNÍ LAMINACE – VÝROBA DESEK	53
8	PROCES RECYKALCE KOMPOZITNÍCH DESEK.....	56
8.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ NA RECYKLACI.....	57
8.1.1	Rozřezání vzorků	57
8.2	ZVOLENÉ PROCESNÍ PARAMETRY RECYKLACE.....	58
8.3	VÝSLEDKY RECYKLACE	60
8.3.1	Uhlíkové kompozitní desky	61
8.3.2	Hybridní kompozitní desky.....	62
8.4	OPĚTOVNÉ ZALISOVÁNÍ DESEK PO RECYKLACI A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	64
9	MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	65
9.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA DLE ČSN EN ISO 527-4	65
9.1.1	Tahová zkouška pro uhlíkový kompozit z panenských vláken.....	66
9.1.2	Tahová zkouška pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C.....	68
9.1.3	Tahová zkouška pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C.....	70
9.1.4	Tahová zkouška pro hybridní kompozit z panenských vláken	72
9.1.5	Tahová zkouška pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 45 minut.....	74
9.1.6	Tahová zkouška pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 90 minut.....	76
9.1.7	Porovnání hodnot tahové zkoušky pro jednotlivé kompozitní systémy.....	77
9.2.1	Zkouška rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z panenských vláken	82
9.2.2	Zkouška rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C.....	82
9.2.3	Zkouška rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C.....	83
9.2.4	Zkouška rázem v ohybu pro hybridní kompozit z panenských vláken.....	84
9.2.5	Zkouška rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže na této teplotě 45 min.....	84
9.2.6	Zkouška rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže na této teplotě 90 min.....	85
9.2.7	Porovnání hodnot zkoušky rázem v ohybu pro jednotlivé kompozitní systémy.....	86
10	STRUKTURNÍ ANALÝZA POMOCÍ SEM.....	90
10.1	ANALÝZA UHLÍKOVÉ TKANINY RECYKLOVANÉ PŘI 450°C	90

10.2	ANALÝZA UHLÍKOVÉ TKANINY RECYKLOVANÉ PŘI 550°C	91
10.3	ANALÝZA HYBRIDNÍ TKANINA RECYKLOVANÉ PŘI 370°C S DOBOU VÝDRŽE 45 MINUT	92
10.4	ANALÝZA HYBRIDNÍ TKANINA RECYKLOVANÉ PŘI 370°C S DOBOU VÝDRŽE 90 MINUT	93
ZÁVĚR		94
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		96
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		101
SEZNAM OBRÁZKŮ		102
SEZNAM TABULEK.....		105
SEZNAM PŘÍLOH.....		106

ÚVOD

Recyklace je v dnešní době stále diskutovanější téma. Znovuvyužití již jednou uplatněných materiálů se dostává stále více do popředí a jeho význam je neoddiskutovatelný. Mnoho užitečných materiálů končí v dnešní době na skládkách, čímž přichází o potenciál znovuzpracování a ušetření jak finančních tak přírodních zdrojů. V návaznosti na tento fakt byla vypracována tato diplomová práce zabývající se studiem možné recyklace kompozitních polymerů.

Teoretická část je věnována zejména problematice možného recyklačního postupu pro kompozitní materiály. Srovnává jednotlivé trendy v recyklačních postupech dnešní doby a uvádí největší zpracovatele kompozitního recyklátu. Na závěr jsou zde popsány jednotlivé příklady využití recyklovaných vláken, zaměřených především na uhlíkové kompozity - CFRP. Jejich recyklace je ekonomicky atraktivní pro vysokou pořizovací cenu panenských uhlíkových vláken a energetické náročnosti jejich výroby. Největším odběratelem takto recyklovaných uhlíkových vláken je automobilový průmysl, který je legislativně nucen co nejvíce omezit používání panenských surovin pro výrobu automobilů.

Praktická část se zaměřuje na laboratorní provedení recyklace pomocí pyrolýzního reaktoru u dvou typů kompozitních polymerů. Jsou zde popsány procesní podmínky pro provedení recyklace, která byla realizována ve spolupráci s firmou MSV Studénka s.r.o. Výsledné produkty recyklace byly následně porovnány se svými nerecyklovanými ekvivalenty, díky tahové zkoušce dle ČSN EN ISO 527-4 a zkoušce rázové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1. Tyto zkoušky byly po provedení experimentu porovnány pomocí box-plot diagramů. Výstup práce je navíc podpořen snímkami ze skenovacího elektronového mikroskopu, mapující strukturu tkanin po proběhlé recyklaci.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Kompozitní materiál

Kompozity jsou materiály složené ze dvou nebo více samostatných substancí, kombinující jejich rozdílné vlastnosti za vzniku nového produktu, mající požadovaný charakter. Jedná se tedy o takové produkty, u kterých spojením více složek dostaneme nový produkt s lepšími mechanickými, fyzikálními popřípadě jinými potřebnými vlastnostmi. [1]

1.2 Kompozitní polymery

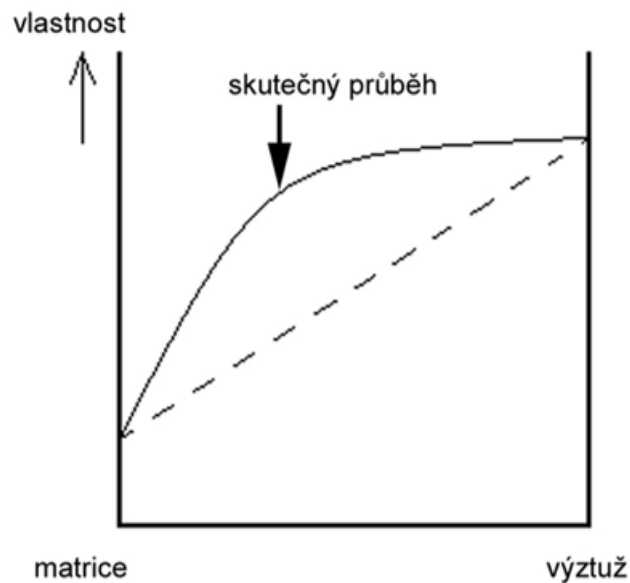
Kompozitní polymery jsou ve většině případů složeny ze dvou základních částí, vyztužujícího vlákna (nejčastěji skla, uhlíku nebo aramidu), udávající základní mechanické vlastnosti kompozitního polymeru a matrice, neboli pojiva (termosetu nebo termoplastu), mající funkci spojitou a ochranou. Jejich pevnost a tuhost je v nejvyšší míře závislá na druhu použitých vláken a jejich orientace. Nejčastěji se můžeme setkat s uspořádáním vrstevnatých uložených plochých vrstev výztuže a pojiva, která je vzájemně spojuje. Takto spojené kompozitní materiály se nazývají lamináty a jejich předností je schopnost přenášet deformace jednotlivých vrstev na vrstvu sousední. [1]

1.3 Vlastnosti kompozitních polymerů

Výsledné vlastnosti, které jsou po kompozitním materiálu vyžadovány lze docílit správným použitím jednotlivých komponentních materiálů. Nesmírně důležitá je vzájemná interakce mezi matricí a vyztužujícím vláknem a také jejich vzájemná orientace.

Hlavní výhodou kompozitních materiálů je jejich nižší hmotnost oproti běžným konstrukčním materiálům, což se odráží nejen v lepší technické použitelnosti těchto kompozitů, ale i v ekonomickém hledisku výroby. Mezi další výhody patří zejména korozní odolnost, vysoká rozměrová stálost a nízká tepelná vodivost.

Jednou z nejdůležitějších vlastností kompozitních materiálů je tzv. synergický efekt, který je pro kompozitní materiály tolik typický. Spojením výztuže a matrice nedosáhneme jen prostého součtu jejich vlastností, ale mnohdy i lepších výsledků. Tento efekt se pak nazývá synergismus Obr. 1. [1]



Obr. 1: Synergický efekt [2]

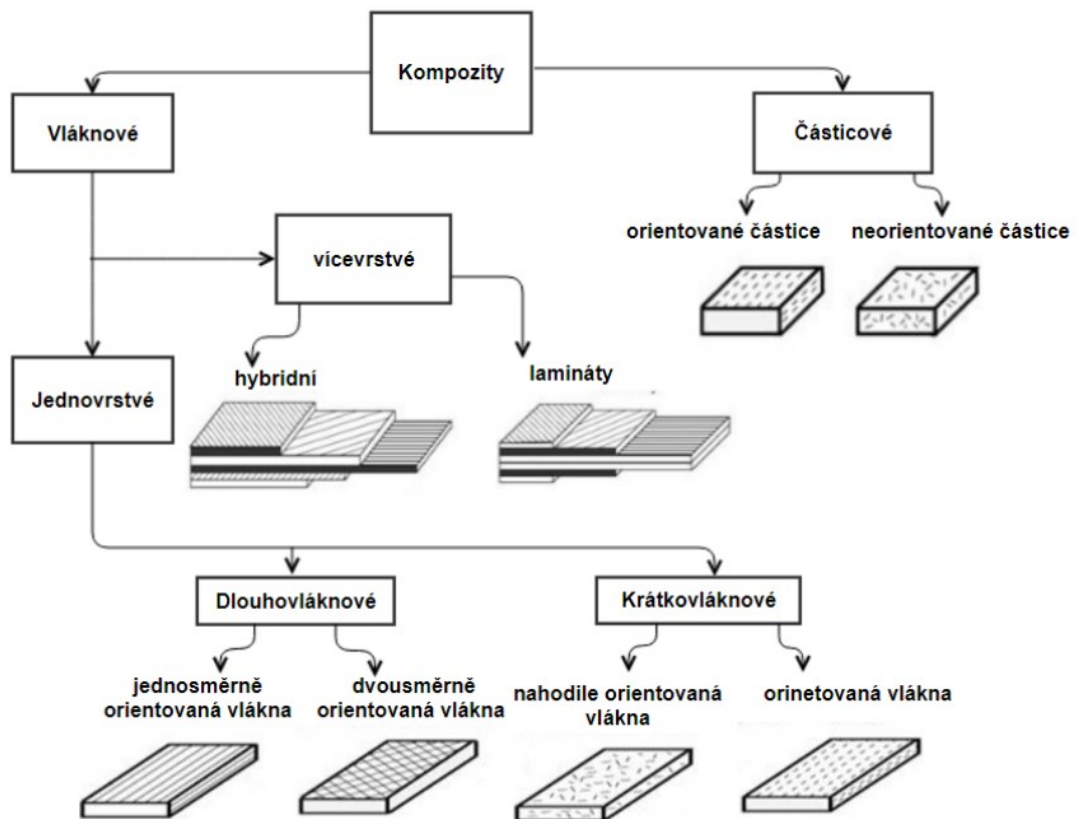
1.4 Spojení matrice a vyztužujícího vlákna

Důležité je, pro polymerní kompozity, zejména poměr matrice a vyztužujícího vlákna. Vlákná musí být dokonale prosycena pojivem (matricí), přičemž musí být mezi nimi zabezpečena co nejlepší adheze, tedy schopnosti jednotlivých materiálů k sobě dokonale přilnout. Obecně lze dosáhnout lepších mechanických vlastností použitím menšího množství pojiva, nicméně se nesmí stát, že by docházelo k nízké nebo žádné nasycenosti vláken. V nejdokonalejších technologiích výroby kompozitů lze dosáhnout až 80% zastoupení vyztužujících vláken. [2]

1.5 Rozdělení kompozitních polymerů

Základním stavebním prvkem všech polymerních materiálů je vlákno. Vlákno může být v kompozitním materiálu buďto konečné (sekané) nebo nekonečně dlouhé, v závislosti na požadovaných vlastnostech výsledného materiálu. Základní druhy vyztužujících vláken jsou vlákna aramidová, skelná nebo uhlíková s průměrem od 3,5 až 24 μm . Matrice pro tyto výztuže pak jsou nejčastěji z termosetu nebo termoplastu.

Podle způsobu výroby se dále dá docílit různé orientace vláken podle potřeby. Nezřídka se tak můžeme setkat s orientací vláken ve směru namáhání. Výsledkem je poté anizotropní materiál mající různé mechanické vlastnosti v různých směrech namáhání. [2]



Obr. 2: Rozdělení kompozitů dle výztuže [3]

Na Obr. 2 si je možné všimnout možné rozdělení kompozitů dle typů výztuže.

1.6 Použití kompozitních polymerů

Použití polymerních kompozitů je velice rozmanité. Nejvíce je zastoupeno použití kompozitních polymerů vyztuženými dlouhými nebo sekanými vlákny, a to především v automobilovém průmyslu, který se řadí mezi největší odběratele a spotřebitele. Dále má velké zastoupení použití kompozitních polymerů ve stavebním průmyslu, zejména jako vyztužující materiál. Nemalé je také zastoupení v leteckém průmyslu a astronautice, který každým rokem stoupá. [1]

2 RECYKALCE POLYMERNÍHO ODPADU

Recyklace neboli znovuvyužití materiálu je stále více diskutované téma. Vyčerpatelnost přírodních zdrojů a nakládání s odpadem nás nutí nad zamyšlením, jak co nejefektivněji využít odpadu, kterého lidstvo vyprodukuje každý den desítky ne-li stovky tun.

Základní důvod recyklace materiálu tkví v jeho znovuvyužití pro energetický nebo materiálový obsah. Nejčastější se tedy provádí recyklace takových materiálů, které byly vyrobeny energeticky náročným způsobem nebo jedná-li se o materiály z drahých a obtížně dostupných surovin. Základní podmínkou recyklace je dostatečně vysoký rozdíl mezi energetickým vkladem do primární výroby a jeho recyklací, respektive určující hledisko je, kdy se nám recyklace ještě ekonomicky vyplatí.

Jednoduše lze říci, že se vyplatí recyklovat všechny druhy kovů, v čele s hliníkem. Složitější otázka nastává při recyklaci polymerních materiálů. U polymerních materiálů není tak vysoký rozdíl mezi prvovýrobou a recyklací. Proto je důležité posuzovat případ od případu jakým způsobem, a jestli vůbec, je možné tyto polymery znovu zpracovávat, aby ekonomický výsledek a energetická bilance vyšla pozitivně ve prospěch právě recyklace. [10, 21]

2.1 Objem polymerního odpadu

Plasty a zvláště plastové obaly se pro spotřební trh stávají stále dominantnější. Jejich komerční použití se za posledních 50 let zvýšilo z 15 na 355 milionů tun ročně. Ačkoliv se plastové materiály používají ve všech možných odvětvích, jejich nejširší zastoupení se nachází právě v obalových materiálech. Jako obalové materiály jsou totiž plasty výborná volba hlavně díky své nízké ceně a hmotnosti. Díky plastovým obalům dokážeme uchovat materiál, a to hlavně potraviny, déle čerstvé a vzhledem ke své nízké hmotnosti má také příznivý dopad na nižší spotřebu paliva při přepravě. [4]

Navzdory těmto výhodám jsou obalové materiály z plastu obrovský problém, jelikož velké procento těchto obalů se po krátkodobém prvním použití znovu nevyužije. Celosvětově je zhruba 40% takovýchto obalových materiálů odváženo na skládky a 32% uniká jakémukoliv sběru a následnému ekologickému zpracování, což vede k znečištění planety především v oceánech a volné přírodě. [4]

2.2 Druhy polymerního odpadu

Polymerní odpad, který je produkován lze rozdělit do několika kategorií podle toho kde, a jakým způsobem byl vytvořen. Jedná se o:

- Technologický odpad
- Průmyslový odpad
- Uživatelský odpad

2.2.1 Technologický odpad

Technologický odpad je vytvářen ve zpracovatelských závodech jako přebytky nebo odřezky produkovaných výrobků. Takovýto odpad není znečištěn, a je proto možnost jej rovnou znovu použít. Přidává se buďto přímo k primárnímu materiálu nebo jsou z něj vyráběny stejné výrobky ovšem v nižší kvalitativní třídě. V tomto případě jde vždy o nejjednodušší, primární recyklaci. [5]

2.2.2 Průmyslový odpad

Při recyklaci průmyslového odpadu je situace poněkud složitější. Takovýto materiál se většinou skládá z více druhů polymerů. Jejich čištění a následná separace je ekonomicky i technicky náročnější, a je tedy třeba uvážit, zda je takovýto proces rentabilní. [5,21]

Jako příklad je možno uvést znovuzpracování výseků pro části přístrojů či díly vedení vzduchu přístrojových desek automobilů. Deska se většinou skládá z nosné kostry z polypropylenového kompozitu, na kterou je nanesena vrstva polypropylenové pěny pro změkčení. V posledním kroku je celá deska překryta plastovou fólií. Recyklace takovéto desky je technologicky velice složitá a je tedy na hraně ekonomické smysluplnosti. Výrobci tohoto druhu odpadu však mají zákonem nařízeno, technologicky tento zbytek zrecyklovat nebo použít jiné ekologicky přijatelné řešení i za předpokladu zvýšených nákladů. [5,21]

2.2.3 Uživatelský odpad

Uživatelský odpad vzniká dobrovolným vytřížením plastů z komunálního odpadu již u obyvatelstva. Tento druh odpadu tvoří zejména použité plastové obaly a plastové výrobky s krátkou životností. Materiálově se tento odpad skládá zejména z komoditních plastů (HDPE, LDPE, PP, PET, PS) s převažujícím podílem polyolefinů.

S ohledem na obrovské množství vyprodukovaného uživatelského odpadu, je jeho znovu zhodnocení celospolečenský problém. Avšak jeho recyklace je z hlediska technologie obrovský problém. [5, 21]

2.3 Polymerní odpad v České republice

O sběr polymerního odpadu se v České republice stará společnost EKO-KOM, a.s. Pro sběr polymerního odpadu slouží žluté kontejnery označené nápisem plast. Do kontejnerů na plasty patří fólie, sáčky, plastové tašky, sešlápnuté PET láhve, obaly od pracích, čistících a kosmetických přípravků, kelímky od jogurtů, mléčných výrobků, balící fólie od spotřebního zboží, obaly od CD disků a další výrobky z plastů.

Dle výročního shrnutí za rok 2019 společnost EKO-KOM a.s., utřžili 3 507 197 tun obalů, z něhož bylo 22% plastových obalů, což dělá 771 583 tun vytřžizeného plastového odpadu v ČR. Z toho 69%, tedy 552 392 tun, se podařilo zrecyklovat. [22]



Obr. 3: Polymerní odpad po vytřžizení, před expedicí pro další zpracování [30]

3 NAKLÁDÁNÍ S KOMPOZITNÍM ODPADEM BEZ RECYKLACE

V dnešní době je již vymyšleno, a do praxe se dostalo několik způsobů, jak s polymerním kompozitním odpadem systematicky nakládat. Tyto způsoby však neřeší stránku recyklace a nejsou tak do budoucna použitelné.

3.1 Skládování

Skládování je bezesporu nejlevnějším a nejsnadnějším způsobem jak obecně nakládat nejen s kompozity, ale i s odpady v širším spektru. Tyto výhody společně s rychlostí zpracování takového odpadu jej řadí mezi nejrozšířenější možnosti nakládání s tímto materiálem.



Obr. 4: Skládka polymerního odpadu z uhlíkových vláken [26]

Navzdory těmto výhodám je zde ovšem větší množství nevýhod. Vedle momentální ztráty možného recyklovatelného materiálu musíme přičíst také velkou ekologickou zátěž pro budoucí generace. V okolí míst, kde se nachází skládka, dochází ke zvýšenému výskytu poletujících odpadků a šíření zápachu. Spolu s vysokou pravděpodobností možného znečištění půdy a podzemních vod se skládkování řadí mezi nejhorší možné způsoby jak nakládat s odpadem, pomineme-li jeho odvoz do volné přírody. [10]

Novější trendy v legislativě mají tendenci ke zvyšování efektivity recyklace a tudíž snížení počtu, nebo přinejmenším potlačení zvětšování, již stávajících skládek. EU proto navrhla změnu směrnice o ukládání odpadu, při kterém by mělo dojít k omezení skládkování komunálního odpadu jen na 10% již do roku 2030. [5,6]

3.2 Spalování odpadu

Důvodem využití spalování odpadu je zredukování jeho objemu. Při procesu spalování je totiž původní odpad přeměněn na popel a škváru, který zaujímají daleko menší prostor než je tomu u původního odpadu. Dalším důvodem, proč je přistupováno ke spalování odpadu, je jeho energetický obsah, který je možno využít například pro vytápění.

Jasnou nevýhodou při spalovacím procesu je vznik škodlivých látek, které při tomto nakládání s odpadem unikají do ovzduší. Po spálení může také dojít k vytvoření nebezpečného odpadu, zejména těžkých kovů, které budou životní prostředí ohrožovat více, než tomu bylo u původního nespáleného odpadu. V neposlední řadě se rovněž nadobro zbavíme odpadu, který mohl v budoucnu najít lepší a ekologičtější využití. [6,7]

4 RECYKLACE POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ

Použití kompozitních materiálů nachází stále větší uplatnění. Díky své nízké hmotnosti a vysoké odolnosti jsou stále žádanějším materiálem a jejich uplatnění se rozšiřuje do stále více sektorů výroby. Tento fakt má za následek narůstající objem odpadů, vyplývající ze zvětšené poptávky a tudíž i z výroby těchto kompozitů. Proto je stále enormnější snaha o správnou a ekonomicky udržitelnou recyklaci. [10]

Kompozity jsou houževnaté a nehomogenní což výrazně komplikuje jakoukoliv jejich recyklaci. Nejrozšířenějším způsobem znovuzpracování kompozitů je recyklace kompozitů vyztuženými uhlíkovými vlákny (CFRP). Jejich recyklace je ekonomicky atraktivní díky vysoké pořizovací ceně panenských uhlíkových vláken a energetické náročnosti výroby.

Horší situace nastává s recyklací reaktoplastů vyztuženými skelným vláknem (GFRP). Tento kompozit po recyklaci vykazuje zhoršené materiálové vlastnosti. Tento fakt spolu s velmi nízkou pořizovací cenou panenských skelných vláken vede k tomu, že jediná dosavadní komerční cesta jak zužítkovat použitý GFRP materiál je jeho spalování spolu s palivem v cementářských pecích, kde se využije alespoň jeho energetická hodnota. [8,10]



Obr. 5: GFRP materiál před spálením v cementářských pecích [35]

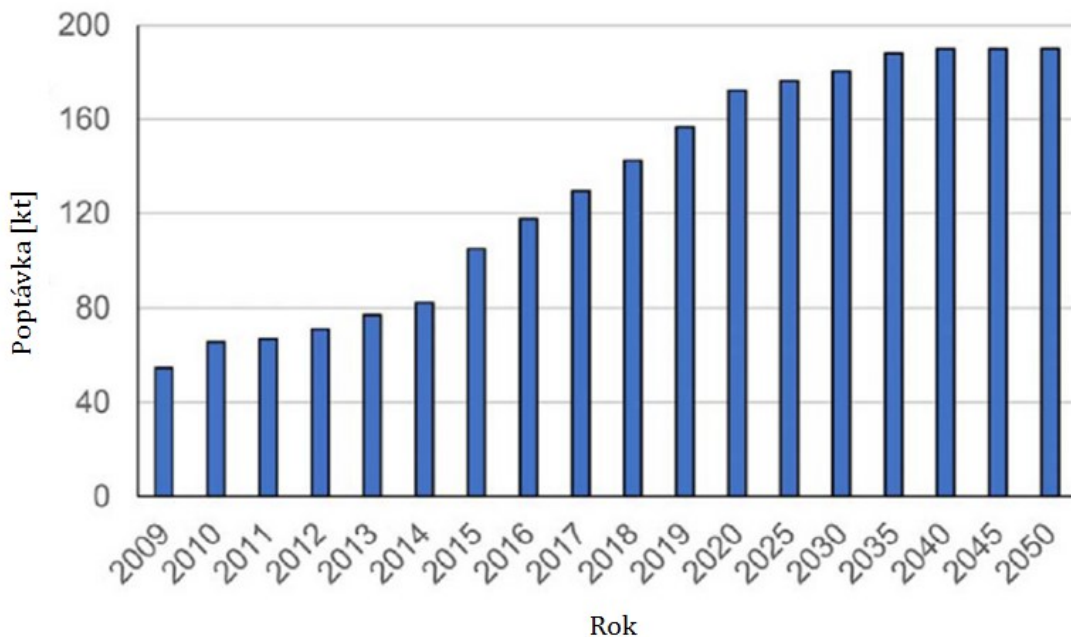
Pro správné recyklování hovoří i fakt, že pokud porovnáme energetický výdej na produkci panenského vlákna uhlíkového kompozitu, dostaneme se na hodnoty mezi 183 – 286 MJ, což je přibližně čtrnáctkrát vyšší hodnota, než při výrobě oceli. Nehledě na to, že při výrobě uhlíkových kompozitů dochází ke tvorbě asi desetinásobného množství skleníkových plynů oproti výrobě oceli. [8,10,19]



Obr. 6: Recyklovaná uhlíková vlákna pomocí pyrolýzy [7]

Odhaduje se, že do roku 2025 bude třeba zlikvidovat až 170 000 tun použitých polymerních kompozitů, zejména pak kompozitů s uhlíkovým vláknem. Snahou výrobců, a zvláště legislativy jednotlivých vlád, je určovat trend co nejlepšího znovuzpracování jednotlivých složek takovýchto kompozitů. [9]

Aplikace polymerních materiálů zasahuje téměř do všech odvětví počínaje leteckým a automobilním přes stavebnictví až po kosmický průmysl.



Obr. 7: Graf dosavadní a predikované poptávky po kompozitních polymerech CFRP [11]

4.1 Procesy recyklace

Jak již bylo napsáno výše, důvody k recyklaci jsou opodstatněné. Otázkou je správná recyklace jednotlivých druhů kompozitních polymerů. Obecně dochází k recyklaci zejména dvou typů kompozitních polymerů a to uhlíkových - CFRP a sklených – GFRP. Přednostně pro tyto druhy kompozitních polymerů byly vyvinuty způsoby pro opětovné využití. Způsoby takovéto recyklace jde rozdělit do tří kategorií dle hlavního mechanismu rozkladu kompozitního materiálu. [6,7]

- Mechanická recyklace
- Tepelná recyklace
- Chemická recyklace

4.2 Mechanická recyklace

Jako vhodný způsob recyklace, se dá považovat mechanické redukování velikosti materiálu. Smysl této úpravy tkví ve zredukování odpadu na takové kousky, které je možno dále využít, a to jako výplň nebo výztuž do nových materiálů, či druhotnou surovinu. Pro mechanickou redukcí materiálu je použito široké spektrum technologií, od prostého řezání (diamantové a tvrdo-kovové kotouče) až po mletí (zejména v kladívkových mlýnech), drcení, lisování apod.

Jako další možný způsob využití pomletého materiálu je jeho využití jako zdroje energie, jelikož jsou bohaté na organické sloučeniny. Mechanickou recyklací je využíván zejména rozemletý materiál z GFRP kompozitů. Mechanické mletí uhlíkových kompozitů – CFRP je používáno především pro zmenšení odpadu při pyrolýze. [6]

Mechanickou recyklací se také zabývala studie zkoumající vliv rozemletí a znovupoužití kompozitu vyrobeného z PA66 s obsahem 35,7% vyztužujících krátkých skelných vláken. Jako recyklační materiál byl použit díl chladiče z automobilu určeného k likvidaci. Tento díl byl nejdříve rozřezán a poté granulován tak, aby se mohl znovu zpracovat. Pomocí vstříkovacího stroje byly z granulátu vyrobeny zkušební tělíska, ve tvaru psích kostí na to, aby se materiál mohl podrobit tahové a ohybové zkoušce. Jako referenční materiál byl zvolen Radilon A, jelikož materiál, ze kterého se vyráběly původní části chladiče automobilu, bohužel již dnes neexistuje. Materiál Radilon A se ovšem liší pouze obsahem skelných vláken a to o 0,5%, proto byl k vytvoření pokusu vhodný.

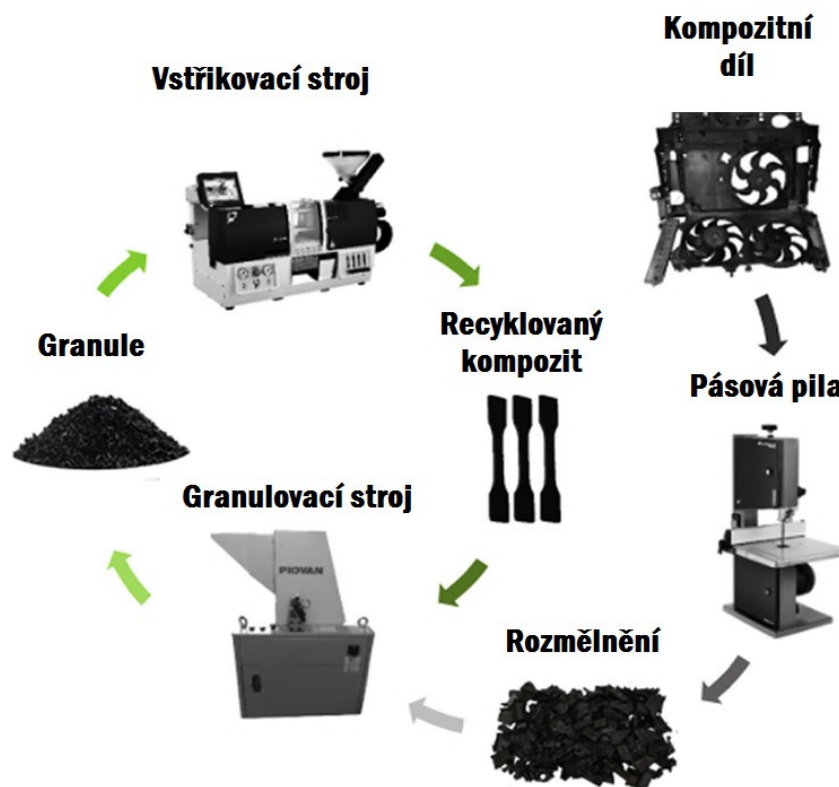
Některé takto vstříknuté zkušební tělíska byly jednou, respektive dvakrát, granulovány a vstříknuty pro ověření mechanických vlastností po více recyklačních cyklech. Ilustrační schéma výroby zkušebních tělísek je zobrazeno na Obr. 8.

Materiál byl podroben tahové zkoušce dle ISO 527 s rychlostí prodlužování 1 mm/min. Výsledky zkoušky jsou znázorněny v Tab. 2. a ukázaly, že přirozené stárnutí spolu s opětovnou recyklací materiálu vede jak ke snížení modulu pružnosti i pevnosti v tahu. [14]

Tab. 1: Výsledek tahové zkoušky dle ISO 527 recyklovaného kompozitního materiálu [14]

Vzorek	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Deformace [%]
Recyklovaný	7,8±0,3	120±2,3	3,0±0,3
Dvakrát recyklovaný	7,4±0,3	113,5±0,2	3,4±0,1
Tříkrát recyklovaný	6,7±0,2	100,8±1,3	4,2±0,3
Referenční	10,2±0,5	170,5±5,2	2,6±0,1
PA 66	2,05	55	7

Tab. 2: Výsledek tahové zkoušky dle ISO 527 recyklovaného kompozitního materiálu [14]



Obr. 8: Ilustrační schéma výroby zkušebních tělísek mechanické recyklace [14]

Tab. 3: Výsledek ohybové zkoušky dle ISO 178 recyklovaného kompozitního materiálu [14]

Vzorek	Modul pružnosti v ohybu [GPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Deformace [%]
Recyklovaný	6,83±0,13	187,7±2,4	3,7±0,3
Dvakrát recyklovaný	6,42±0,04	186,5±1,4	4,7±0,2
Třikrát recyklovaný	5,87±0,06	171,3±2,5	5,2±0,4
Referenční	9,03±0,33	263,9±8,9	3,7±0,1

Výsledek ohybové zkoušky jsou znázorněny v Tab. 3. Zhoršení mechanických vlastností takto recyklovaného materiálu je způsobeno různou délkovou distribucí takto sekaného vlákna, které omezeným způsobem přenáší zatížení mezi maticí a výztuží. Z výsledků ovšem vyplývá, že i když materiál projde až třemi po sobě jdoucími recyklačními cykly, stále je jeho modul pružnosti téměř trojnásobný a pevnost v tahu téměř dvojnásobná oproti nevyztuženému PA 66. Proto je takový materiál vyhovující pro recyklaci a lze je v automobilovém průmyslu znovu použít pro výrobu konektorů, spojovacích prvků, rámečky světlometů nebo sací hadice k turbodmychadlům. Takovéto studie jsou důležité především pro automobilový průmysl, jelikož podle směrnic EU jsou automobilový výrobci povinni znovu použít nejméně 95% hmotnosti vozidla při dosažení konce životnosti. [14]

4.3 Tepelná recyklace

4.3.1 Pyrolýzní recyklace

Pyrolýza vzniká tehdy, je-li materiál temperován bez přístupu vzduchu nebo při značném snížení jeho přístupu. V materiálu dochází k tepelné reakci, která vede k jeho rozkladu. Nežádoucí a nebezpečné látky jsou zde přeměněny na látky snadněji upravitelné, bezpečné nebo alespoň lépe filtrovatelné. Produkty vznikající při pyrolýze jsou většinou pyrolýzní plyny, oleje, tuhé zbytky zpracovaného materiálu (vlákna, prach) a uhlíkové zbytky z procesu.

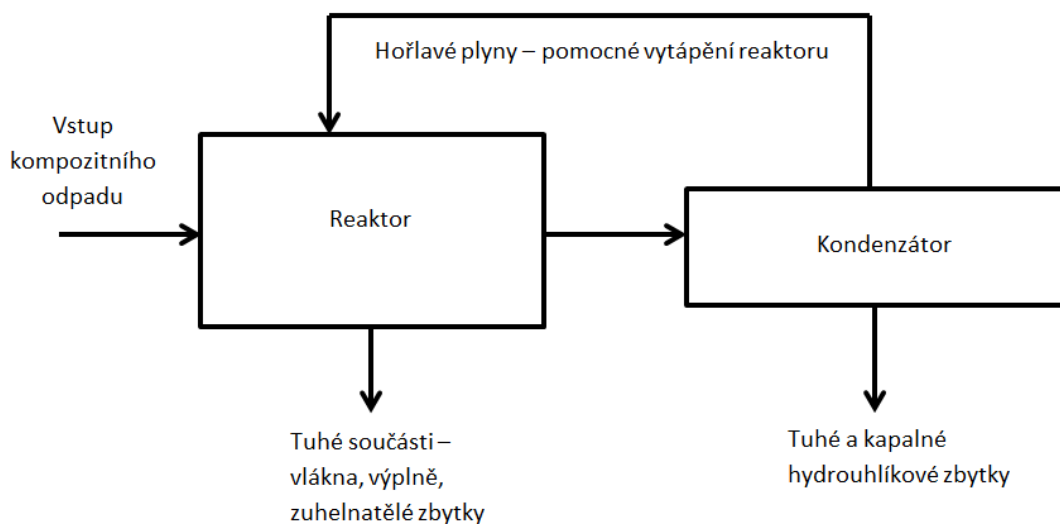
Při pyrolýze dochází obvykle ke dvěma fázím. Při první fázi této pyrolýzy je základní požadavek kladen na separaci a získání hlavních produktů, které se snažíme z kompozitního odpadu získat. Jedná se tak zejména o vlákna z použitého kompozitu,

přičemž nejčastěji se takto získávají vlákna uhlíková. Tato fáze se nazývá vlastní pyrolýza. Druhá fáze tkví ve využití druhořadých produktů získaných při pyrolýze. Při separaci dochází k uvolnění pyrolýzních olejů a plynů, a ty je možné dále zužitkovat jako energetický zdroj právě při pyrolýze. Výhřevnost těchto plynů je přibližně 35 MJ/kg. [19]

Pyrolýzní proces je o mnoho šetrnější k životnímu prostředí, než je tomu u klasického spalování. Díky tomu, že jsou těžké kovy soustředěny v tuhém zbytku, nevzniká tak velké množství toxických oxidačních zplodin, které by mohly uniknout do ovzduší.

Proces pyrolýzy je doprovázen více ději. Při počátečním zahřívání a teplotě mezi 200-500 °C dochází k odštěpení bočních řetězců u makromolekulární struktury. Tento proces odštěpení má za následek přeměnu makromolekulárních struktur na kapalné a plynné organické produkty a pevný uhlík. Tento proces můžeme nazvat jako tzv. suchou destilaci. Při vyšších teplotách poté dochází ke štěpení produktů, vzniklých při suché destilaci a z pevné a kapalné fáze se dále oddělují stabilní plyny, například vodík, oxid uhličitý nebo oxid uhelnatý.

Nejčastěji probíhá proces pyrolýzy mezi 450 – 600°C v závislosti na druhu spalované pryskyřice. Obecně se volí nižší teploty pro polyesterové pryskyřice a vyšší teploty pro epoxidy nebo vysoce výkonné termoplasty. [8,10]



Obr. 9: Schéma pyrolýzy kompozitního odpadu – CFRP [8]

Výsledné mechanické vlastnosti vláken po proběhlé pyrolýze jsou závislé na podmínkách procesu, zejména pak na teplotě. Obecně dojde ke snížené pevnosti v tahu u uhlíkových

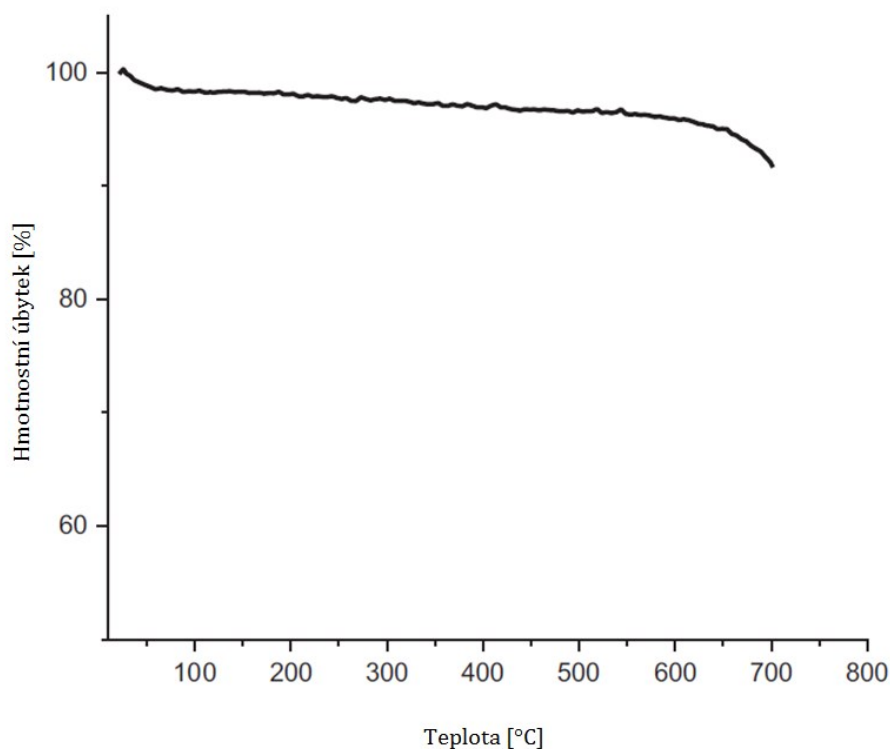
vláken mezi 4-85% a u skelných vláken mezi 52-64%. Proto je jasné, že při správně nastaveném procesu nedochází k extrémnímu poničení uhlíkových vláken a je tedy pro tyto materiály vhodná. Jako horní hranice pro spalování uhlíkových kompozitů – CFRP se uvádí hranice mezi 500-550°C. Při této teplotě nedochází k velkému degradování mechanických vlastností.

Pyrolýza skelných vláken není pro komerční užití příliš vhodná, jelikož po pyrolýze prokazují skelná vlákna větší poničení oproti vláknům uhlíkovým. Snižuje se jejich zpracovatelnost a zejména síla. Jako alternativou po pyrolýze skleněných vláken je jejich rozemletí a použití jako výplňový materiál například v automobilovém průmyslu. Tato možná zpracovatelská cesta je ovšem nepravděpodobná z důvodu nízké ceny panenských vláken GFRP a tedy ekonomické nerentabilnosti celého procesu. [6,7,8]

V roce 2020 byla vydána studie, zkoumající chování kompozitního materiálu z uhlíkových vláken HTS40 E13 3k zalitých v epoxidové pryskyřici vyrobené ze směsi Araldite LY 5052 a Aradur 5052 při pyrolýzním procesu. V případě vláken HTS40 E13 3k se jedná o materiál s vysokou houževnatostí, s mezí pevnosti v tahu okolo 4000 MPa a modulem pružnosti v tahu rovnající se 240 GPa. Proces spočíval v zahřátí materiálu z pokojové teploty 25 °C na teploty 300°C, 450°C, 550°C a 700°C při rychlosti ohřevu 10°C/min a udržování při nejvyšší teplotě po dobu 1 a 2 hodin. Materiál byl vytápěn za přítomnosti inertní ochranné atmosféry (Argonové) s průtokem plynu 1,2 l/min. Pro srovnání byl také zvolený kompozit spalován v muflové peci se vzdušnou atmosférou.

Experiment se zaměřoval na analyzování povrchových defektů recyklovaného uhlíkového vlákna oproti panenským vláknům metodou SEM, EDS, a také byl zkoumán hmotnostní úbytek během zahřívání.

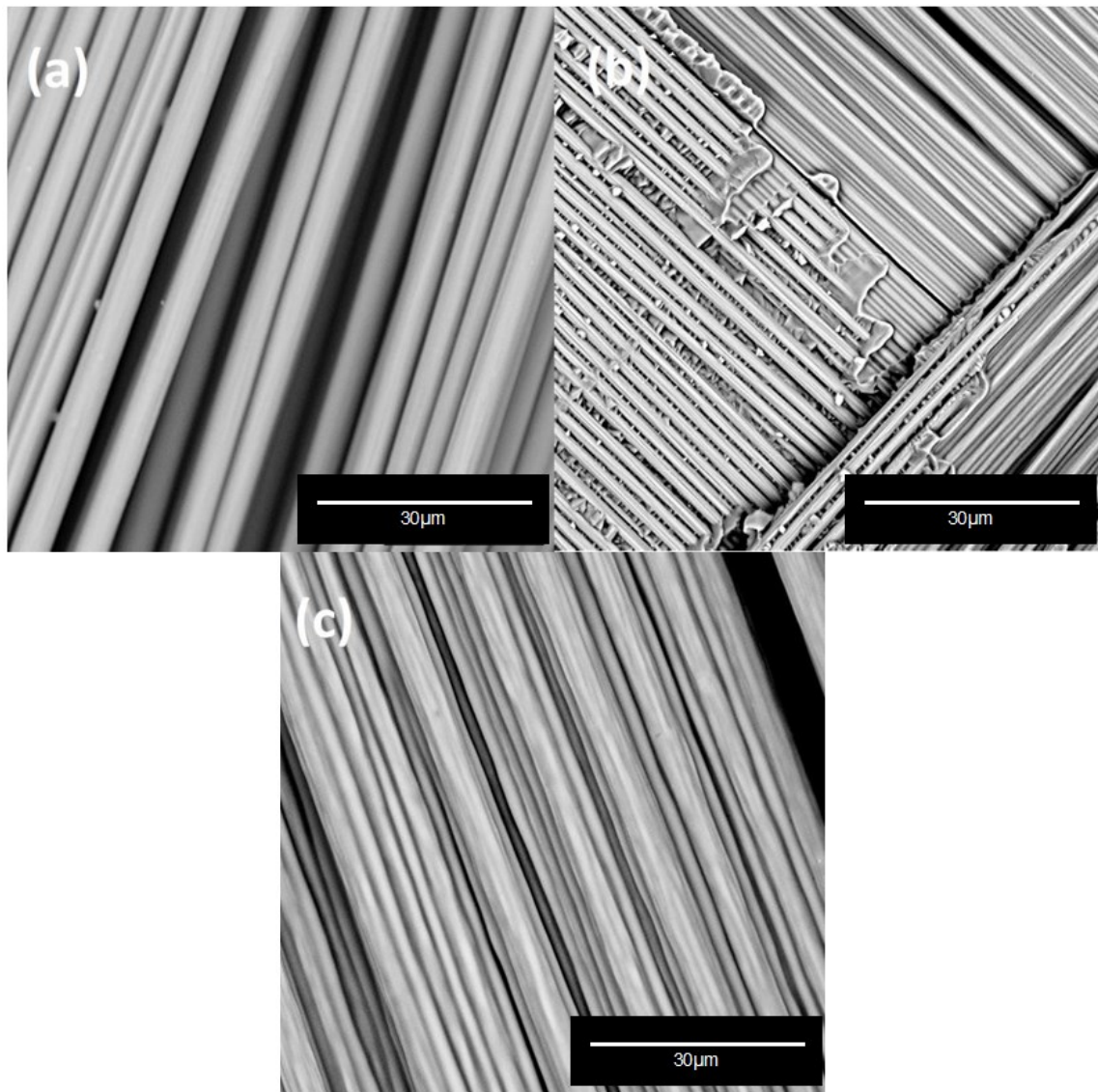
Při experimentu bylo dokázáno, že při pyrolýze za přítomnosti inertní atmosféry, byl úbytek hmotnosti pouhých 9% oproti panenským vláknům. Ve srovnání, při experimentu s muflovou pecí byl hmotnostní úbytek při teplotě 500° 14,5%. Tento fakt ukázal, možnost použití inertní atmosféry při dalším vývoji recyklace pomocí pyrolýzy. [9]



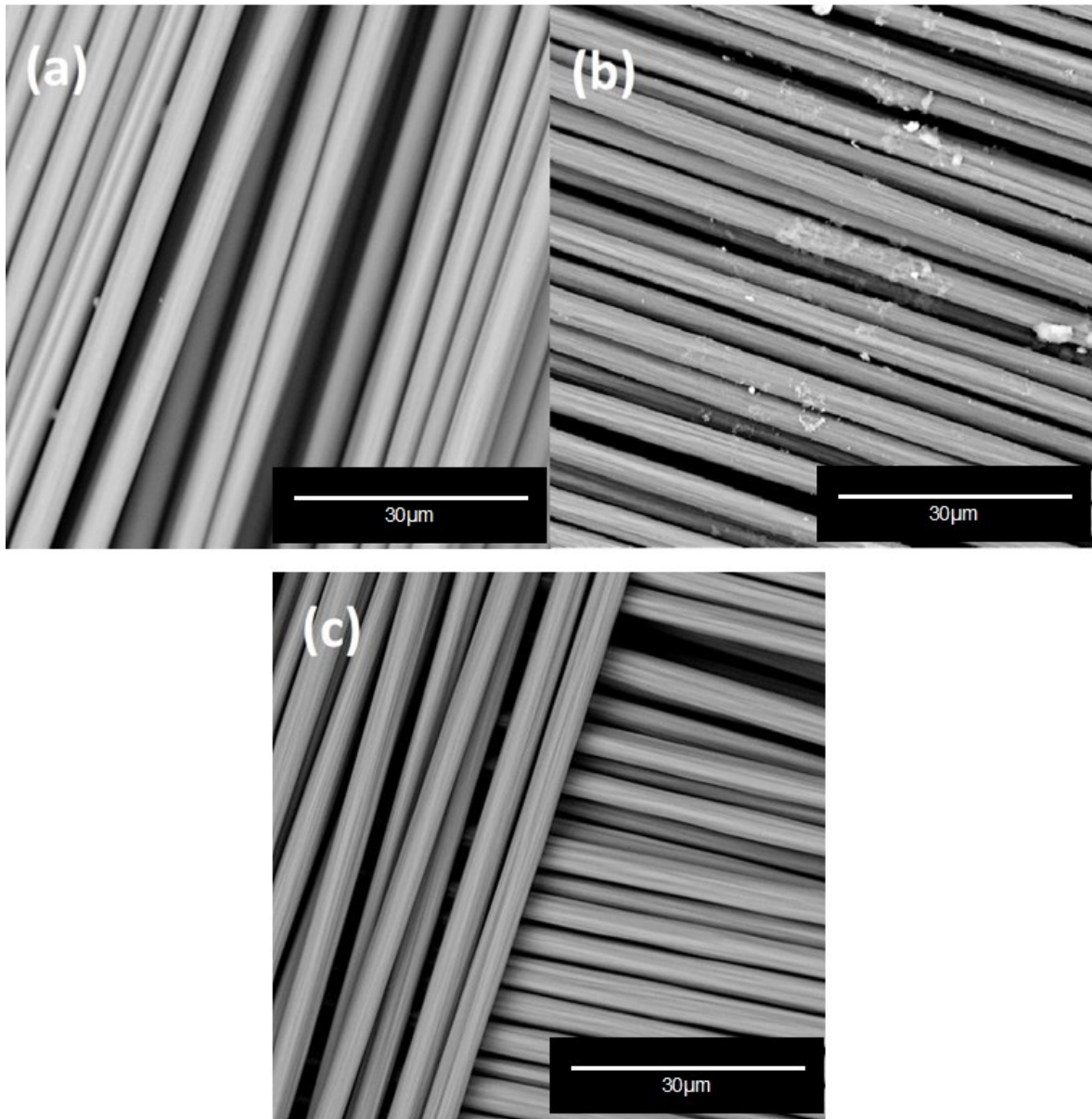
Obr. 10: Křivka hmotnostního úbytku uhlíkových vláken při zvyšující se teplotě v inertní atmosféře [9]

Experiment se dále zaměřoval na určení správné teploty pro úplné oddělení matrice od uhlíkových vláken. Jako správná byla určena teplota 550°C, při které došlo k úplnému spálení matrice a malému porušení vláken. Nižší teploty nezaručovaly nepřítomnost polymerní matrice a vyšší teploty již vedly k větší degradaci uhlíkového vlákna. Materiál byl zahříván na výslednou teplotu a poté byla tato teplota udržena po dobu 1 respektive 2 hodin. Po zahřátí a setrvání na určené teplotě byl materiál podroben zkoumání elektronovým mikroskopem – SEM, a porovnán s panenským vláknem, který byl také podroben zkoumání SEM. Výsledky si je možné prohlédnout na následujících obrázcích.

Na Obr. 11 si je možné povšimnout nespálené matrice při temperování na výslednou teplotu 300°C a setrvání na této teplotě 1 respektive 2 hodin. [9]

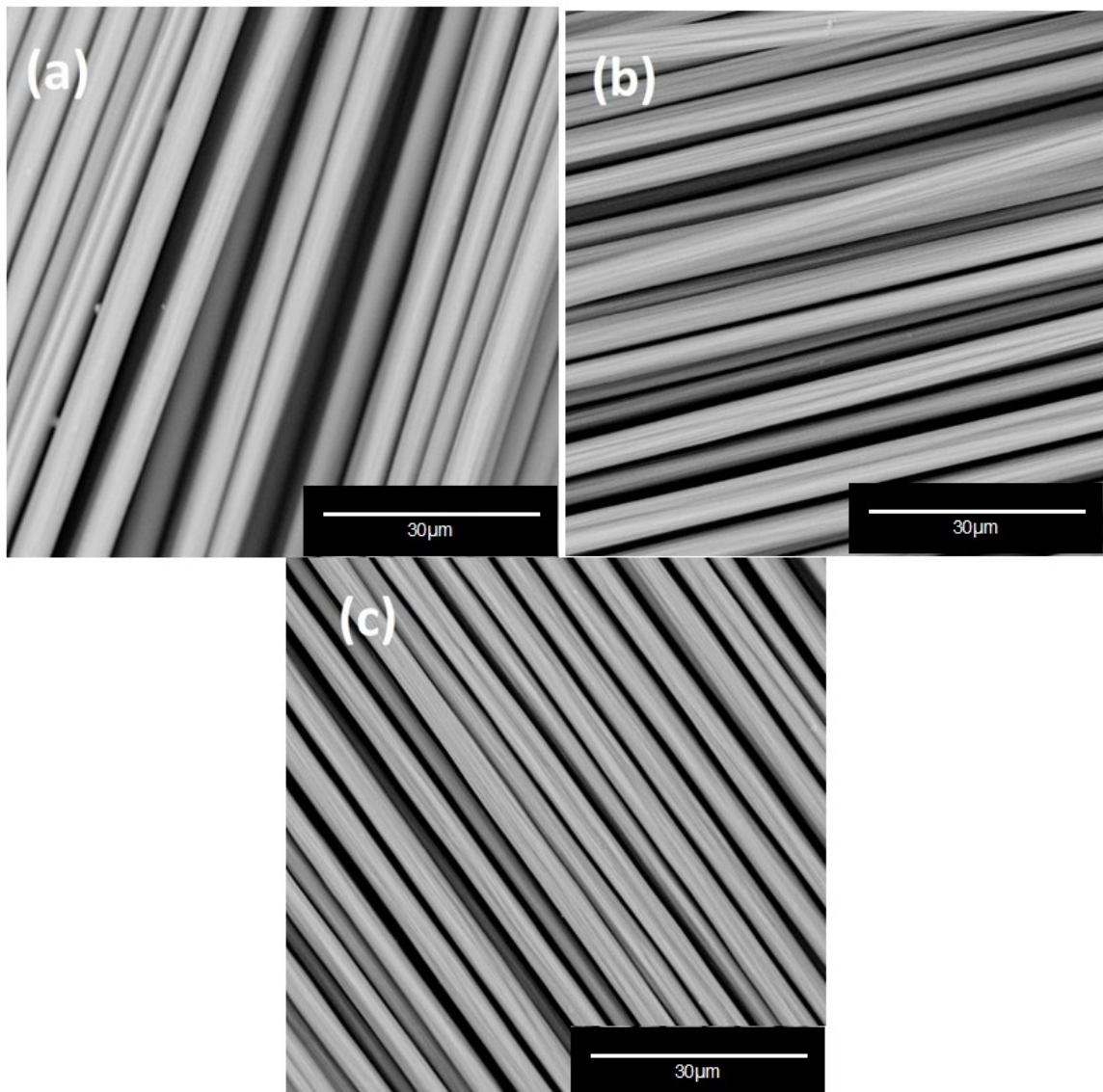


Obr. 11: Snímek z SEM, (a) - panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 300°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 300°C po dobu 2 hodin [9]



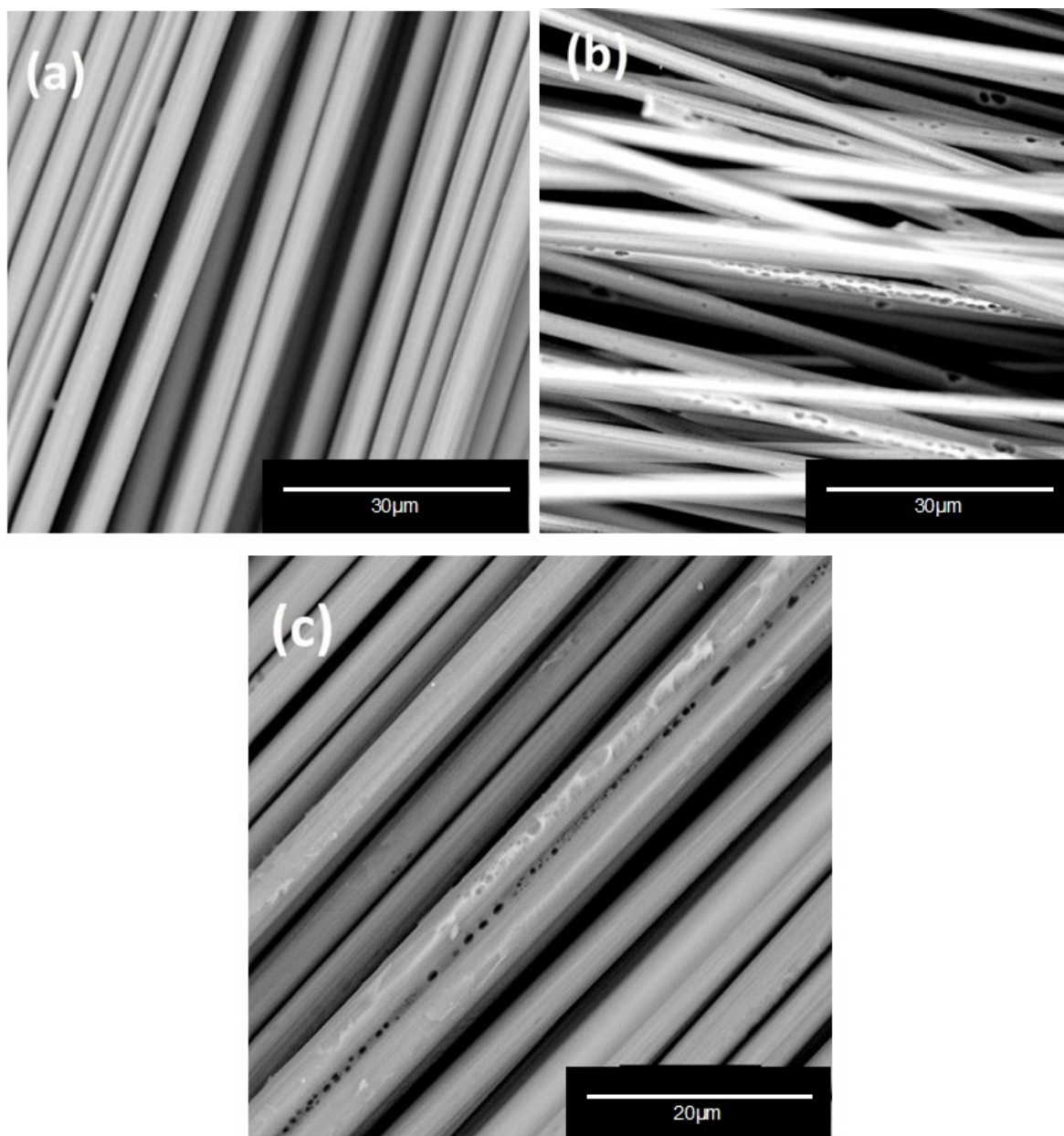
Obr. 12: Snímek z SEM, (a) – panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 450°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 450°C po dobu 2 hodin [9]

Na Obr. 12 vidíme, že při teplotě 450°C a setrvání na této teplotě po dobu 1 hodiny nevede k odstranění matrice. Při setrvání na této teplotě po dobu 2 hodin je již uhlíkové vlákno beze stop polymerní matrice. Bohužel při této teplotě stále není zaručeno odstranění matrice v celém rozsahu a existují oblasti, kde se pryskyřice nachází. Tato teplota je na spálení matrice tedy nedostatečná. [9]



Obr. 13: Snímek z SEM, (a) – panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 550°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 550°C po dobu 2 hodin [9]

Na Obr. 13 si je možné povšimnout úplného spálení matrice, čehož je u pyrolýzy vyžadováno. Při této teplotě nedojde k významnému poškození uhlíkových vláken, jako je tomu například u teploty 700°C Obr. 14, kde je možné si všimnout pórů, které vedou k oslabení uhlíkového vlákna. Tento fakt má nepříznivý účinek na výsledné mechanické vlastnosti a snižuje vazbu uhlíkových vláken. [9]



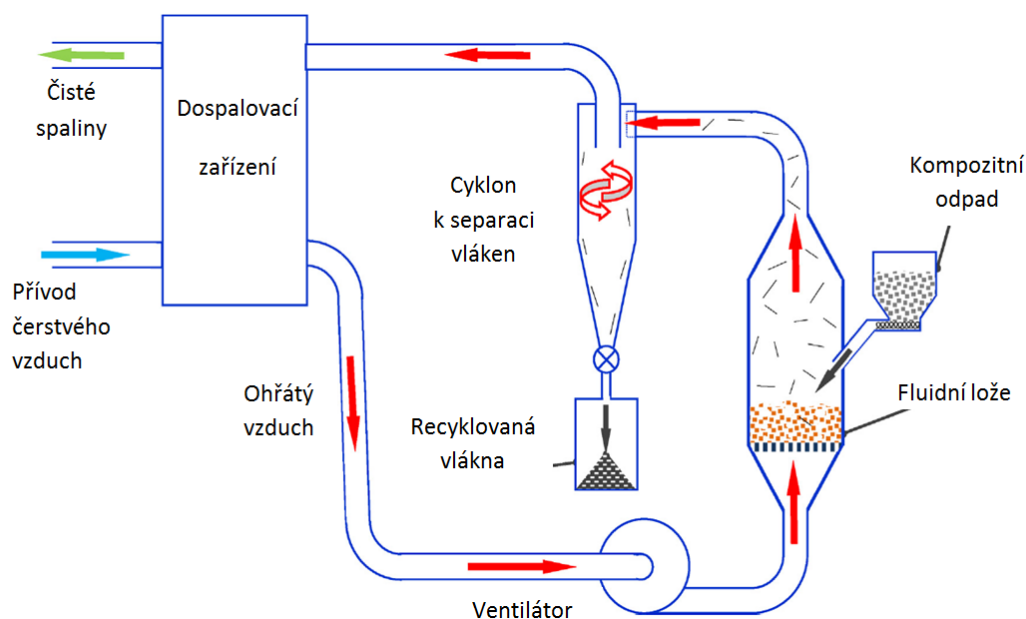
Obr. 14: Snímek z SEM, (a) – panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 700°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 700°C po dobu 2 hodin [9]

4.3.2 Fluidní lože

Proces recyklace pomocí fluidního lože se řadí mezi termální neboli tepelné způsoby recyklace kompozitního materiálu. Původně byla vynalezena na Univerzitě v Nottinghamu, kde se jí zabývají již od roku 2000. Schéma možného funkčního systému pro recyklaci polymerních kompozitů lze vidět na Obr. 15.

Odpad z kompozitního polymeru, nejčastěji z CFRP, je drcen na menší částičky, obvykle v rozmezí 6 a 20 mm. Poté je tento odpad přiveden na fluidní lože z křemičitého písku (velikost zrna <1mm), který je zahříván horkým vzduchem o teplotě 450 – 550°C. Díky těmto teplotám dochází k dekompozici vláken a matrice. Vlákná a zplynovaná matrice je poté unášena do části, která slouží k separaci těchto komponentů. Zatímco tuhé zbytky, jako jsou například kovy, zůstávají zachycené v tuhém loži, odchozí vlákna jsou separována pomocí cyklonu a zplynovaná matrice putuje dále do zařízení sloužícímu ke správnému a ekologickému spálení matrice. Toto dospalovací zařízení zároveň může sloužit jako rekuperační komora pro ohřev příchozího čerstvého vzduchu na vytápění fluidního lože. Tímto krokem je napomáháno k celkovému ekologickému efektu recyklace. Délka takto recyklovaných uhlíkových vláken je v rozmezí 5 – 10 mm a jejich pevnost se s ohledem na teplotu zpracování pohybuje okolo 75% pevnosti panenských uhlíkových vláken.

Teplota vytápění fluidního lože se může lišit dle vláken použitých v recyklovaném kompozitu. Obecně by se měla volit nižší teplota při recyklaci skelných vláken. Ty totiž při vyšších teplotách ztrácí svou pevnost až o 90%. [10,15,16]



Obr. 15: Schéma fluidního lože [15]

4.3.3 Pyrolýza pomocí mikrovlnného záření

Pyrolýza pomocí mikrovlnného záření je podobná klasické pyrolýze s tím rozdílem, že je materiál zahříván pomocí mikrovlnného záření. Takto je možné vyhřát materiál přímo ve svém jádru, tepelný přenos je proto velmi rychlý a může přinést úsporu energie. Tento způsob recyklace ovšem nebyl dosavadně nijak komercializován a jeho zkoumání bylo provedeno pouze na univerzitních půdách. [6]

4.4 Chemická recyklace

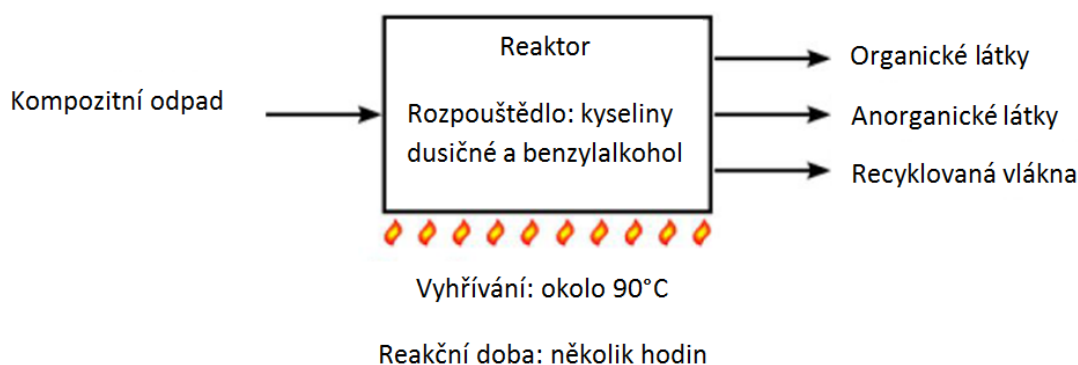
Chemická a s ní související elektrochemická recyklace polymerních kompozitů používá různorodou škálu rozpouštědel jako je kyselina dusičná, benzylalkohol, etanol nebo voda. Použití rozpouštědla vede k narušení a zničení vazby mezi pryskyřicí a vlákny a poté je rozloží na původní materiály. Uhlíková vlákna nejsou rozpuštěna a uvolňují se z pryskyřice. Naproti tomu skelná vlákna při procesu chemické recyklace trpí degradací, proto jsou chemické metody spíše vhodné pro uhlíková vlákna. [16.17]

Proces, který chemicky rozkládá kompozit na polymerní matici a vyztužující vlákna se nazývá solvolýza. Existují zejména dva hlavní typy solvolýzy:

- Solvolýza při nízké teplotě
- Solvolýza v superkritických tekutinách

4.4.1 Solvolýza při nízké teplotě

Solvolýza při nízké teplotě využívá rozpouštědlo zahřátého jen na nízkou teplotu, v závislosti na použitém rozpouštědlu. Příklad takovéto reakce je znázorněn na Obr. 16, jenž představuje experiment, jehož snahou bylo rozložení uhlíkového kompozitu pro účely recyklace. Uhlíkový kompozit byl vložen do reaktoru s roztokem kyseliny dusičné a benzylalkoholu. Tento roztok sloužil jako rozpouštědlo a byl zahříván na teplotu 90°C. Při tomto experimentu byla získána uhlíková vlákna se ztrátou pevnosti v tahu pouhých 1,1% oproti panenským vláknům. Nevýhoda ovšem je, že pevnost v tahu dramaticky klesá s délkou vlákna, a proto je pro delší vlákna nepoužitelná [17]



Obr. 16: Schéma procesu solvolýzy při nízké teplotě [17]

4.4.2 Solvolýza v podkritických a superkritických tekutinách

Proces solvolýzy v superkritických tekutinách nebo tekutinách blízkých superkritické hodnotě je skoro stejný jako proces solvolýzy při nízké teplotě. Superkritická tekutina je taková, která přesáhla určitou teplotu a tlak. Například u vody se jedná o teplotu 374°C při tlaku 22,1 MPa. Po překonání těchto hodnot voda dramaticky mění své vlastnosti a přechází do tzv. superkritického stavu. Při dosažení těchto hodnot může i voda působit jako rozpouštědlo v recyklačním procesu kompozitů.

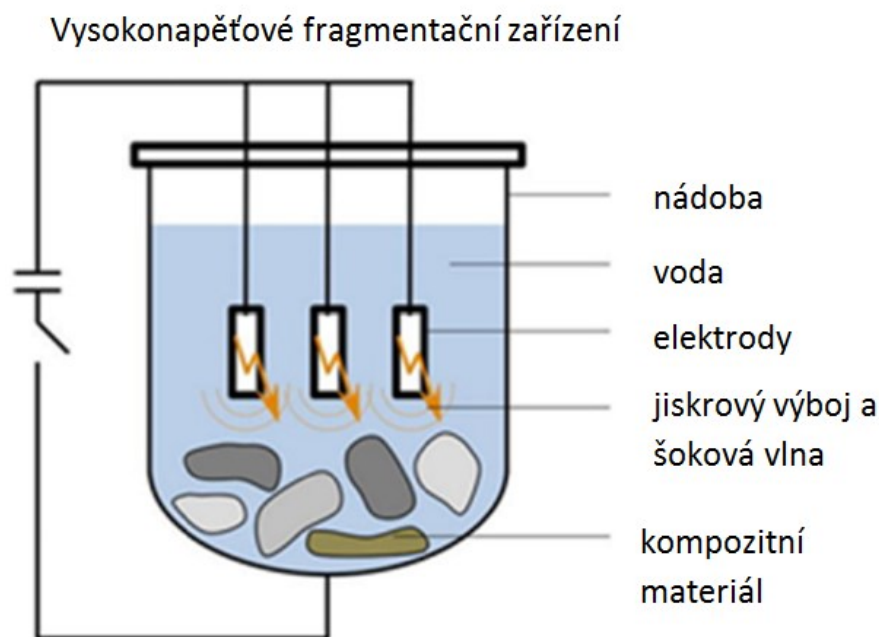
Do superkritické vody mohou být přimíchány i další složky k napomáhání solvolýzy jako je ethanol, methanol nebo aceton, působící jako katalyzátory reakce. Nicméně použití pouze čisté vody je šetrnější k přírodě, jelikož není potřeba řešit nakládání s nebezpečnými chemikáliemi a nehrozí její únik do volné přírody.

Na rozdíl od pyrolýzy používá solvolýza nižší teploty. Vlákna tedy nejsou tolik tepelně namáhána a po recyklaci touto metodou jsou méně poničená. Nevýhodou je, že solvolýza a zejména solvolýza v superkritických tekutinách vyžaduje drahé zařízení, které musí odolat zvýšeným teplotám a tlakům.

Chemická recyklace plastů pomocí superkritických kapalin byla vyvinuta v Japonsku roku 1995, a poté zkoumána zejména společností Goto v roce 2009. Superkritické kapaliny jsou skvělým reakčním médiem pro úplný rozklad polymerů na monomery. [10,17]

4.4.3 Elektrochemická recyklace

Elektrochemická recyklace je metoda fragmentace kompozitního materiálu za pomoci pulzů vysokého napětí. Schéma takovéhoho zařízení je zobrazeno na Obr. 17.



Obr. 17: Schéma elektrochemického recyklačního zařízení [10]

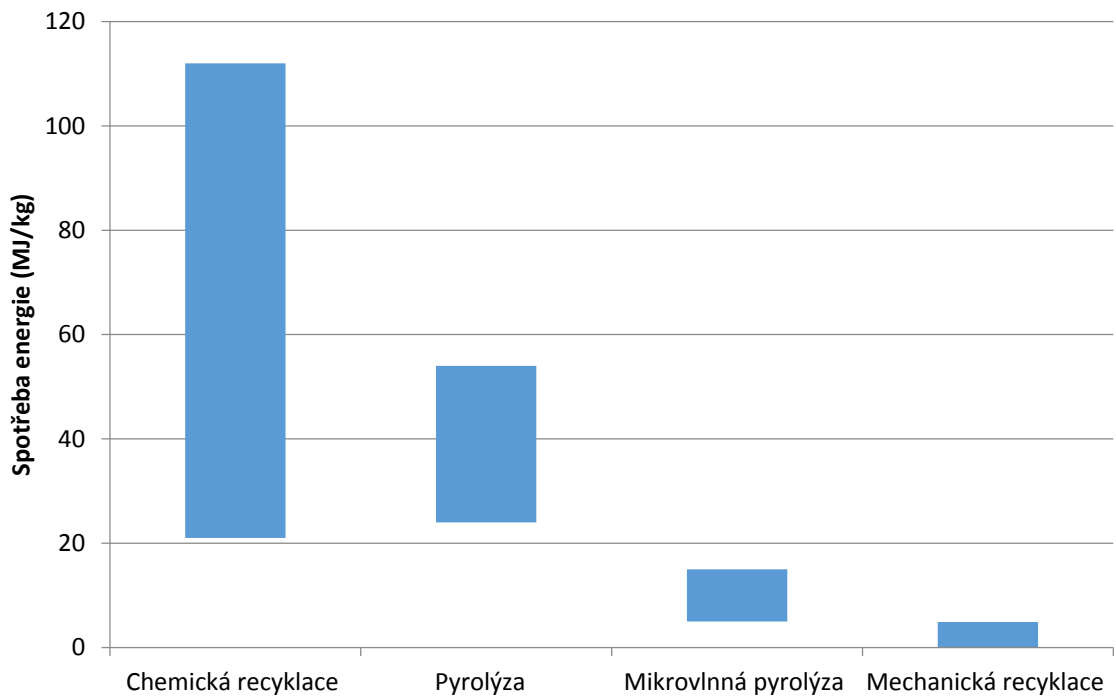
Proces je založen na vysokonapěťovém elektrickém pulzu generovaném mezi elektrodami. Tento pulz se dále šíří médiem v nádobě a narušuje kompozitní materiál. Největší problém této metody tkví ve vysoké spotřebě energie. Ve srovnání s mechanickou recyklací přináší čistější a delší recyklovaná vlákna, avšak spotřeba energie je 2,6 krát vyšší než je tomu u mechanické recyklace. Po přezkoumání bylo dokázáno, že elektrochemická recyklace ve srovnání nejen s mechanickou recyklací postrádá konkurenceschopnost a její použití mimo laboratorní využití je prozatím nerealizovatelná. [10,17]

4.5 Srovnání recyklačních metod

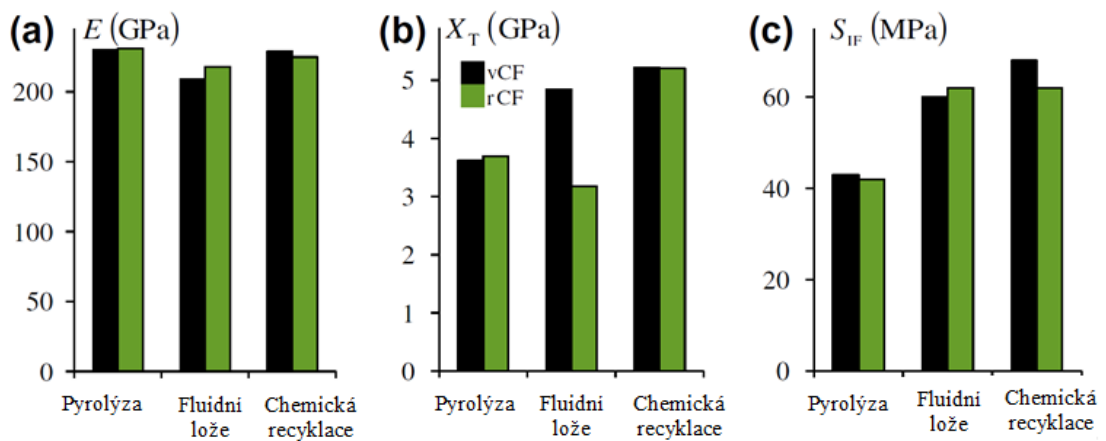
Srovnání jednotlivých technologií není úplně jednoduché. Porovnání současných technologií recyklace v závislosti na pevnosti v tahu panenských vláken oproti recyklovaným udává Tab. 4. Jako nejlepší způsob recyklace pro dosažení nejpodobnějších vlastností, jako mají panenská vlákna, se jeví chemická recyklace a pyrolýza. Nejméně kvalitní jsou vlákna po mechanické recyklaci, avšak mechanická recyklace je zároveň nejméně nákladnou technologií.

Tab. 4: Porovnání pevnosti s tahu recyklovaných a panenských vláken při různých technologiích recyklace [19]

Autor recyklace	Recyklační materiál	Recyklační metoda	Pevnost v tahu panenských vláken	Pevnost v tahu recyklovaných vláken
Y. Bai, Z. Wang	CFRP	Superkritická voda	3100 MPa	3100 MPa (100%)
Y. Huang, Z.Ge	CFRP	Solvolýza při zvýšené teplotě	3500 MPa	3307,5-3430 MPa (94,5-98%)
Nakagawa a spol.	CFRP	Chemická recyklace	3500 MPa	3422 MPa (97,77%)
Adherent Technologies,	CFRP	Chemická recyklace	3500 MPa	3325 MPa (95%)
Hernanz a spol.	CFRP	Solvolýza	3500 MPa	2975-3465 MPa (85-99%)
Hyde a spol.	CFRP	Solvolýza	4090 MPa	3900 MPa (95%)
Liu a spol.	CFRP	Solvolýza	3500 MPa	3461,5 MPa (99%)
Palmer	SMC	Mechanická recyklace	1490-2670 MPa	1130-2310 MPa (83%)
Takahashi a spol. Suzuki	CFRP	Tepelná recyklace	120 MPa	99,6 MPa (83%)
Pickering a spol.	Termosetový kompozit	Fluidní lože	3500 MPa	1750 MPa (50%)
Kennerley a spol.	SMC	Fluidní lože	3500 MPa	1750 MPa (50%)
Turner a spol.	Prepreg	Fluidní lože	3500 MPa	1750-2625 MPa (50-75%)
Pimenta & Pinho	GFRP	Pyrolýza	3600 MPa	3600 MPa (100%)
Pimenta & Pinho	GFRP	Fluidní lože	3600 MPa	3200 MPa (67%)



Obr. 18: Graf spotřeby energie při různých možnostech recyklace [19]



Obr. 19: Mechanické vlastnosti recyklovaných vláken (zelená škála) oproti panenským vláknům (černá škála), (a) – Youngův modul, (b) – Pevnost v tahu, (c) – Mezifázová pevnost ve smyku s epoxidovou pryskyřicí [20]

Rozdílu v mechanických vlastnostech recyklovaných vláken oproti panenským vláknům je možné vidět na Obr. 19.

Recyklace jakéhokoliv materiálu na 100% je prakticky nedosažitelná. Prvním přístupem pro dosažení recyklace je mechanické zpracování. Jedná se o nejvíce komerčně zavedený postup recyklace termosetových kompozitních polymerů, který je dále využívaných jako výztuž nebo výplň pro různé materiály. Největší výhoda mechanické recyklace tkví v její ekologičnosti, jelikož se pro tuto metodu nevyužívá plynů ani toxických chemikálií. Na druhou stranu se nám díky mechanické recyklaci nepodaří získat samotná vlákna bez pryskyřice.

Lepší možností pro získání recyklovaných vláken je tepelná recyklace, jako je pyrolýza nebo fluidní lože. Díky těmto metodám můžeme lépe zužitkovat jednotlivé složky obsažené v kompozitním materiálu, ať už vlákna pro vytvoření nového kompozitního materiálu nebo oleje a plyny, které je možno využít pro ohřev samostatného recyklačního procesu. Získané vlákno má veskrze horší vlastnosti než je tomu u panenského vlákna. Na druhou stranu je takové vlákno levnější a proces recyklace ekologičtější, než je tomu u výroby panenského vlákna.

Chemická recyklace nabízí možnosti inovace pro ekonomicky lepší a udržitelnější procesy než je tomu dodnes. Výhodou oproti mechanickému a tepelnému recyklačnímu zpracování je kvalita recyklovaného vlákna. Mechanické vlastnosti jsou velmi blízké panenským vláknům, což znamená kvalitnější výrobky zhotovené z těchto vláken. Nevýhodou je použití chemikálií, které jsou toxické nebo využití drahých reaktorů, zejména u použití superkritické vody. Porovnání průměrné spotřeby energie při různých procesech recyklace kompozitního polymeru jsou uvedeny na Obr. 18. [10,19]

5 VYUŽITÍ RECYKLOVANÝCH KOMPOZITŮ

Nejvýznačnější část recyklovaných kompozitních materiálů tvoří uhlíkové kompozity. To je opodstatněno zejména jejich vysokou výrobní cenou, která vede ke snaze co nejlepší možné recyklace, při níž nedojde k enormnímu poškození vláken.

5.1 Současní největší výrobci kompozitního recyklátu

Recyklace uhlíkových kompozitů se rozmohla v posledních dvaceti letech zejména v Evropě, USA a Japonsku. Tab. 5 uvádí hlavní společnosti a jejich komerční technologie zpracování a výroby uhlíkového recyklátu.

Tab. 5: Současné společnosti zabývající se recyklací uhlíkových kompozitů [10]

Název firmy	Recyklační technologie	Kapacita výroby (tun/rok)
Alpha Recyclage Composites	Termální recyklace	300
Carbon Conversions	Pyrolýza	2000
CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG (Germany)	Pyrolýza	1000
ELG Carbon Fibre	Pyrolýza	2000
Hitachi Chemical	Solvolýza	12
KARBOREK RCF	Pyrolýza	1000
Pilot plant at University of Nottingham	Fluidní lože	100
SGL Automotive Carbon Fibres US site	Pyrolýza	1500
Toray Industries	Pyrolýza	1000

Zejména tyto hlavní zpracovatelské závody se snaží odebírat již nevyužitý materiál od velkých společností a usilují o vytvoření zásob materiálu pro pozdější recyklaci. Například firma ELG a Boeing zavedli první materiálovou výměnu kompozitních materiálů na konci životnosti a recyklovaných vláken, což naznačuje použití recyklovaného uhlíkového vlákna v leteckém průmyslu.

V současnosti také roste použití recyklovaných kompozitních materiálů v automobilech značky BMW a celého koncernu Volkswagen. Tento trend naznačuje životaschopnost recyklovaných uhlíkových kompozitů v automobilovém průmyslu. [10]



Obr. 20: Pyrolýzní linka společnosti ELG Carbon Fibre [26]

5.2 Finanční zhodnocení recyklovaných vláken

Při nedávné studii mapující finanční atraktivitu recyklovaného uhlíkového vlákna bylo zjištěno, že při objemu recyklace od 500 tun/rok lze dosáhnout ceny 5 \$/kg, za použití fluidního lože. Tato cena odpovídá přibližně 15% nákladů na zhotovení panenského uhlíkového vlákna. Zmíněná případová studie byla zaměřena na automobilový průmysl. Její snahou bylo zjištění ekonomické náročnosti při použití uhlíkových kompozitů místo ocelových dílů s cílem snížení jak finančních nákladů, tak hmotnosti vozidla za předpokladu dodržení stejných mechanických vlastností.

Jiná studie zaměřená na recyklaci uhlíkového vlákna pomocí mletí ukazuje, že při produkci 1000 tun/rok lze snížit cenu recyklovaného uhlíkového vlákna na 1€/kg mletého uhlíkového vlákna.

Dosud zavedené a funkční recyklační techniky jsou stále více finančně náročně, než je tomu u pouhého skládkování. To ve srovnání s ostatními možnostmi recyklace stojí pouze zlomek ceny, přibližně 0,1 €/kg. Ve snaze k omezení skládkování jsou vydávány stále nové zákony o snižování počtu skládek nebo jejich rozšiřování. Tento fakt by měl urychlit důraz na důležitost recyklace. [24,25]

5.3 Aplikace recyklovaných uhlíkových vláken

Přibližně 40% odpadu uhlíkových kompozitů vzniká již při výrobě. Tyto vlákna nemusí být nutně proscena pryskyřicí.

Získaná recyklovaná vlákna se používají zejména v aplikacích, které nemají tak velké mechanické nároky jako je tomu u panenských vláken.

5.3.1 Automobilový průmysl

Každý rok vyprodukuje evropský trh přibližně 17 milionů vozidel. V každém z těchto automobilů se nachází přibližně 120 kg plastu, z toho 20% jsou kompozity. Je proto co nejvyšší snaha o využití polymerního kompozitu na konci životnosti automobilu. Kompozity z recyklovaných vláken dokáží poskytnout zejména snížení hmotnosti při relativně nízkých nákladech. V neprospěch zavedení širšího spektra použití těchto recyklovaných vláken působí zejména fakt zdoluhavého a náročného zpracování. Problémem v navrhování nových součástí z recyklovaných polymerů je především zajištění stabilní dodávky těchto recyklovaných vláken. Konstrukteři se proto oprávněně obávají, že poskytovatelé recyklovaných vláken jednoduše nebudou schopni pokrýt poptávku na výrobu sériových částí vozidel.

Jednou z prvních automobilových gigantů, kteří se přiklonili k sériové výrobě z recyklovaných vláken, byla společnost BMW. Ta již v roce 2013 využila takto nenasycených zbytků z prvovýroby jako příměs do netkaných textilií k výrobě autosedaček nebo střešní konstrukce modelů i3 a i8. Před tímto krokem se také firmy BMW a Airbus dohodly na spolupráci v recyklaci uhlíkových vláken. [28]

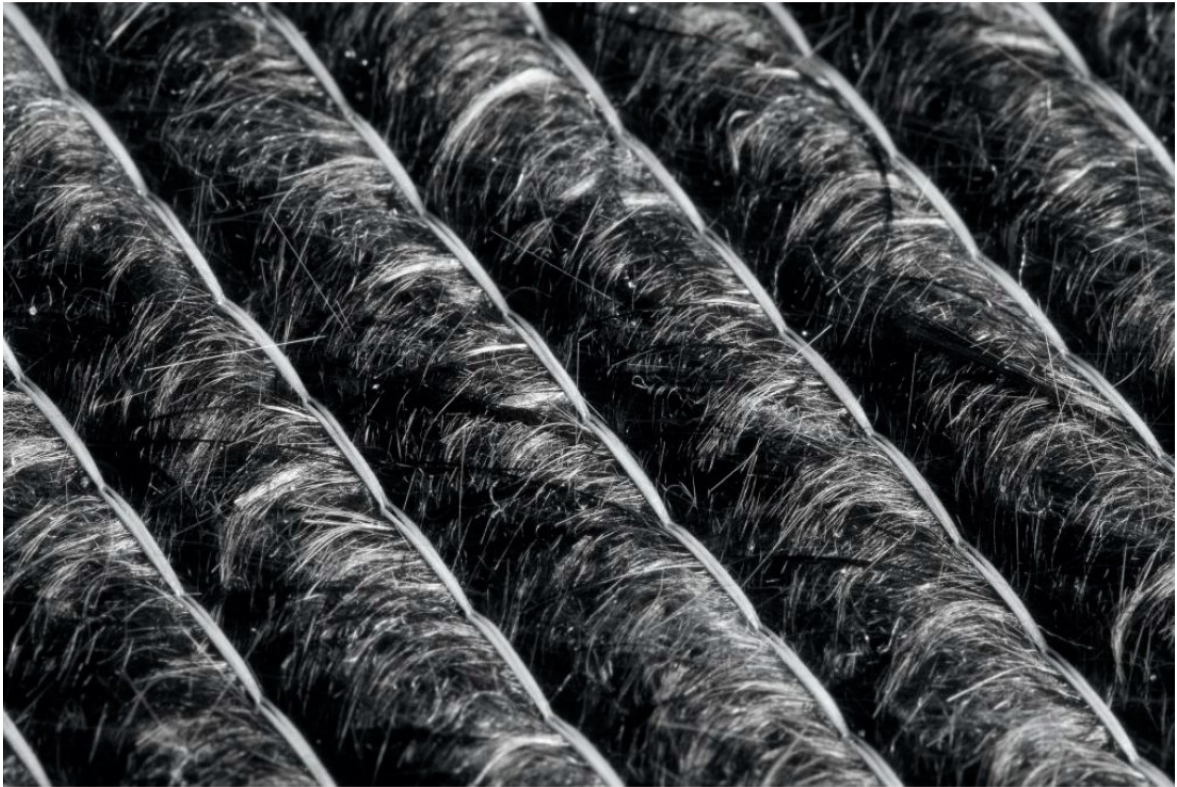
Při rozdrčení recyklovaných vláken vznikají vlákna krátká, která je možno využít například jako příměs do polotovarů, z nichž se vyrábí plechy na formování metodou SMC. Touto metodou je vyráběna například výztuž C-sloupku u vozů BMW řady 7.



Obr. 21: C-sloupek v automobilu BMW řady 7, vyztužený recyklovaným uhlíkovým vláknem vyrobený metodou SMC [28]

Dalším příkladem postupu recyklace firmy BMW je střecha modelu i3 a i8. Až 95% materiálu použitého při jeho konstrukci pochází z recyklovaných uhlíkových vláken. Obr. 22 ukazuje detailní pohled na tyto recyklovaná vlákna, následně použita na výrobu střechy modelu i3. [28]

Nově se také rozvíjí technika vstřikování plastů s příměsí recyklátu získaného drcením uhlíkových vláken. Jedním z takovýchto případů je středová konzole automobilu MINI, vyrobeného z granulátu a nasekaných CFRP dílů.



Obr. 22: Recyklovaná uhlíková vlákna určená na výrobu střechy vozu BMW i3 [28]

Použitelnost recyklovaných vláken, ať ve formě krátkých či dlouhých vláken, pro opětovnou výrobu kompozitních dílů v automobilovém průmyslu je rozmanitý. Uplatňují se zejména pro výrobu:

- Kryty motorů
- Antikoroziční kryty
- Plastové povrchy vyztužené vlákny
- Interiérové kryty, zejména části palubní desky
- Části karosérie – přední a zadní nárazník

Pro správnou funkci jednotlivých dílů v automobilovém průmyslu je třeba zvážit správnou metodu recyklace. Například pro zlepšení mechanických vlastností, zejména pevnosti, namáhaných krytů je možno použít sekaných uhlíkových vláken do formovací směsi pro SMC. [28,29]

5.3.2 Železniční průmysl

Dalším velkým spotřebitelem polymerních kompozitů je rovněž železniční průmysl a s ním spojená výroba železničních vozů či vagonů. Proto železniční společnost British Rail spolu s firmou ELG Carbon Fibre, zabývající se recyklací uhlíkových kompozitů, společně dospěli k vytvoření dvouosého podvozku využívající recyklované rohože uhlíkových kompozitů. Tyto rohože se přidávají mezi nerecyklovaná vlákna a nahradí ocelovou konstrukci. Takto použitý materiál ušetří nejen finance, ale také váhu, jelikož při použití uhlíkových kompozitů místo ocelového rámu došlo k snížení hmotnosti o 36%.

V současné době je použití recyklovaných vláken u těchto podvozků na dobré cestě hlavně díky zapojení několika společností do celkového testování. Odhaduje se, že jen britský trh bude v příštích 10 letech potřebovat přibližně 36 000 těchto podvozků pro výrobu železničních vozů, což by znamenalo velký ekonomický potenciál pro recyklovaná uhlíková vlákna. [28,30]



Obr. 23: Podvozek vagonu z recyklovaného uhlíkového vlákna [32]

5.3.3 Recyklovaná uhlíková vlákna pro výrobu forem a trup lodí

Výhodou využití uhlíkových kompozitů na výrobu forem, například pro autoklávové použití, je stejná tepelná roztažnost formovacího i formového materiálu. Při chlazení z formovací teploty proto nedochází k tak velkému pnutí mezi formou a výrobkem. Formy z uhlíkových vláken mají také oproti ostatním materiálům velmi nízkou hmotnost, což zaručuje bezproblémovou manipulaci.

Pro výrobu formy existuje více způsobů. Jedním z nich jsou nasekané prepregové pásy, které jsou náhodně orientované do tlustých plechů. Jiné řešení, které právě prochází vývojem, je použití netkaných rohoží z recyklovaných uhlíkových vláken, tyto rohože by byly následně formovány a vytvrzeny. Takovéto rohože již na trhu existují a nabízí je společnost ELG. [28,32]



Obr. 24: Netkaná rohož z recyklovaných uhlíkových vláken společnosti ELG Carbon [32]

První praktická aplikace těchto rohoží z recyklovaných uhlíkových vláken byla provedena na trupu lodi AC75 INEOS Team UK. Na vývoji této lodi se také podílela společnost ELG a v trupu je použito právě jejich rohoží. [28,32]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 ZADÁNÍ A STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

V této diplomové práci byly stanoveny následující cíle:

- Literární rešerše na problematiku recyklace kompozitních materiálů
- Aktuální stav a trendy v recyklaci
- Uplatnění recyklovaných vláken v inženýrských aplikacích
- Experimentální recyklace pro danou kompozitní aplikaci provedením termické recyklace pomocí pyrolýzního reaktoru
- Experimentální výroba kompozitního vzorku s recyklovanými vlákny metodou ruční laminace
- Experimentální vyhodnocení mechanických vlastností pomocí tahové zkoušky dle ČSN 527-4 a zkouška Charpyho kladivem dle ČSN EN ISO 179-2
- Závěr a diskuze dosažených výsledků

S ohledem na provedení rešeršní práce, spolu s trendy zavedenými v recyklaci kompozitních materiálů, bylo přistoupeno k provedení termické recyklace uhlíkového a hybridního kompozitu za pomoci pyrolýzního reaktoru. Tato metoda je jednou z nejrozšířenějších při provádění recyklace kompozitů. Při výběru vhodných typů tkanin pro provedení termické recyklace byly použity tkaniny uhlíkové a hybridní, složené z uhlíkových a aramidových vláken. Uhlíková vlákna byla vybrána pro svůj největší podíl zastoupení v recyklovaných kompozitních materiálech, jakožto vyztužujícího vlákna. Hybridní tkanina byla naopak vybrána jako experimentální tkanina, jelikož na téma recyklace této tkaniny není příliš mnoho vědecké či jiné literatury s širší výpovědní hodnotou.

Praktická část diplomové práce se tedy zabývá recyklací kompozitních desek, jejich výrobou a srovnáním mechanických vlastností vybraných kompozitních systémů vůči nerecyklovaným ekvivalentům. Bylo proto nutné vytvořit vždy tři totožné kompozitní desky pro daný typ tkaniny, vyráběné stejnou metodou, z nichž jedna byla ponechána ve stavu prvovýroby, a zbylé dvě byly podrobeny termické recyklaci dle zvolených procesních podmínek. Po provedené recyklaci a odstranění matrice byla recyklovaná vlákna opět spojena s matricí a nařezána na zkušební vzorky. Tyto vzorky byly poté podrobeny mechanickým zkouškám stejně jako jejich nerecyklované ekvivalenty.

7 VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU

V prvé řadě bylo nutné vytvořit takový kompozitní systém, který bude možno recyklovat. S ohledem na poznatky získané během vypracování literární rešerše bylo přistoupeno ke zvolení dvou typů tkanin. Uhlíkové tkaniny a hybridní tkaniny složené z uhlíku a aramidu. Z obou typů tkanin byly následně vyrobeny kompozitní desky pomocí ruční laminace. Jako pojivo byla zvolena u obou typů tkanin stejná epoxidová pryskyřice L 285 MGS od společnosti Havel Composites.

Pro každý typ tkaniny byly vytvořeny vždy dvě desky s použitím totožné tkaniny i epoxidové pryskyřice. Tento přístup byl proveden kvůli nutnosti podrobení jedné z desek recyklaci. Druhá deska vyrobená stejnou metodou nebyla podrobena recyklaci, aby bylo možné porovnání mechanických vlastností mezi deskou vyrobenou z recyklovaných vláken a deskou vyrobenou z panenských vláken stejným způsobem a porovnání bylo relevantní.

Kompozitní desky byly vytvořeny metodou ruční laminace vždy ve dvou vyhotoveních. Jedna z nich byla ponechána pro budoucí mechanické zkoušky a druhá byla podrobena termické recyklaci.

Každá deska byla vytvořena spojením 5 vrstev uhlíkové nebo hybridní tkaniny. Všechny vrstvy byly jednotlivě prosyceny metodou ruční laminace. Jako pojivo byla použita epoxidová pryskyřice L 285 MGS společnosti HAVEL Composites. Tato pryskyřice je certifikovaná pro letecký průmysl a pro výrobu modelů. Tato epoxidová pryskyřice byla namíchána s tužidlem 285 MGS v hmotnostním poměru 100:40 dle tabulky epoxidových systémů HAVEL Composites. Díky tomu vznikne velmi viskózní směs, která prosytí všechny vlákna.

Všechny vyráběné desky byly vytvořeny v laboratoři UVI na fakultě FT UTB.

7.1 Příprava formy

Nejprve bylo nutné připravit podkladovou část. Jako forma posloužila tlustá tabule skla, která splňuje předpoklad pevného a hladkého povrchu.

Forma byla nejdříve důkladně mechanicky očištěna a následně separována pomocí separačního vosku HAVEL Wax 60-x3. Tento vosk byl nanášen krouživými pohyby na celé potřebné ploše skleněné tabule. Následně byl ponechán vosk 10 minut vytvrdnout a poté opět krouživými pohyby vyleštěn ze skleněné tabule pryč. Tento proces byl opakován

celkem třikrát. Přibližné rozměry vyráběné desky, byly vyznačeny pomocí lepicí pásky, která zhruba kopírovala okraje vyráběné desky.



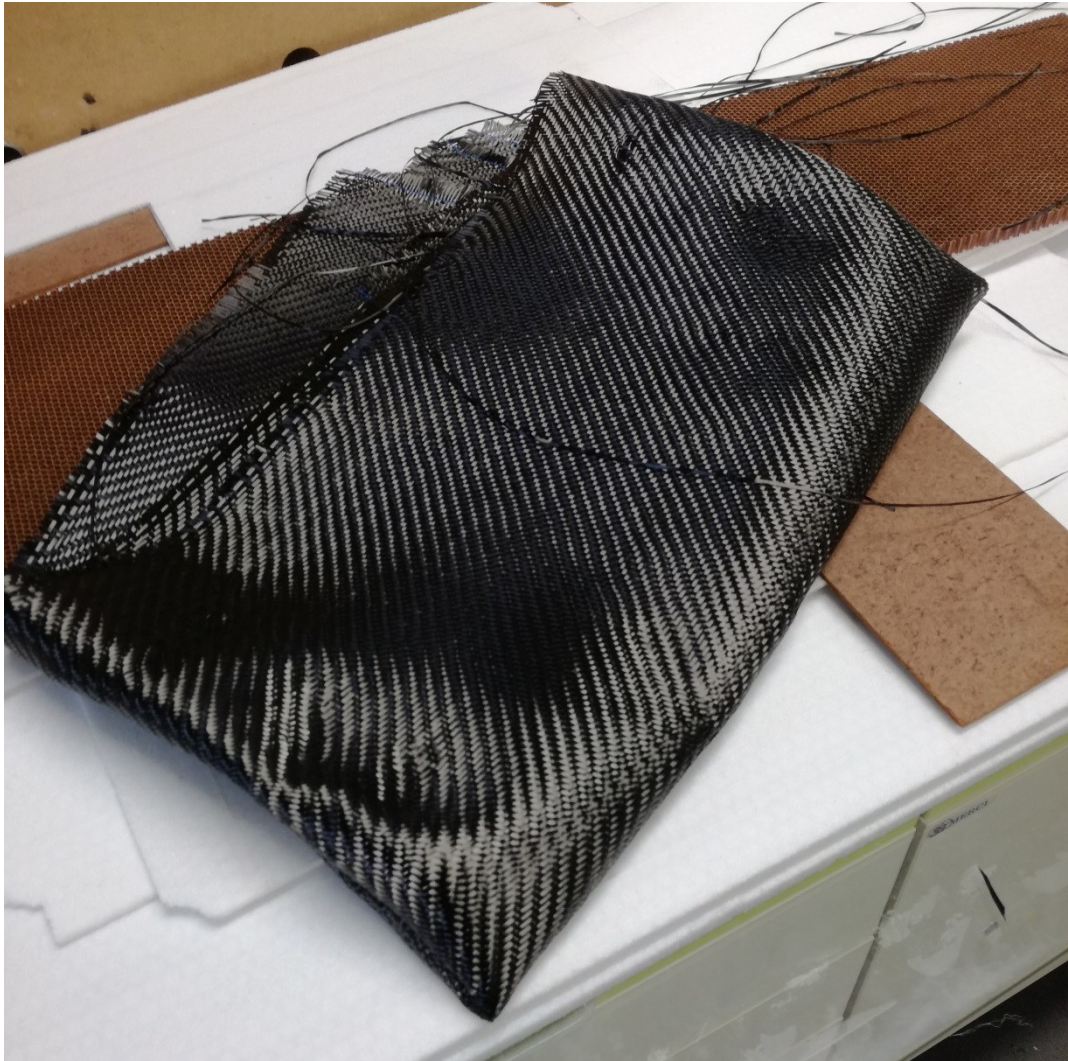
Obr. 25: Separace povrchu formy

7.2 Příprava uhlíkové a hybridní tkaniny

Tkanina byla vystřížena pomocí ručních nůžek z velké role šíře. Takto bylo vytvořeno 5 stejně velkých kusů pro každou jednotlivou desku.

- **Uhlíková tkanina**

Pro účely výroby uhlíkové kompozitní desky byla zvolena uhlíková tkanina KordCarbon Industry s hustotou 200g/m^2 a keprovou vazbou. Parametry této tkaniny jsou součástí přílohy PI.



Obr. 26: Uhlíková tkanina

- **Hybridní tkanina**

Pro účely výroby hybridní kompozitní desky byla zvolena aramid-uhlíková tkanina KordCarbon Industry s hustotou 164g/m² a plátňovou vazbou. Parametry této tkaniny jsou součástí přílohy PII.



Obr. 27: Hybridní tkanina aramid-uhlík

7.3 Příprava matrice

Pro správné stanovení množství matrice je nezbytné zvážit potřebné množství tkaniny na výrobu jedné desky. V tomto případě bylo tedy nutné zvážit všech 5 vrstev, ze kterých bude udělána jedna deska. K výsledné hmotnosti 5 vrstev tkanin bylo ještě připočítáno přibližně 10% hmotnosti navíc, aby bylo zaručeno správné prosycení.

Jako matrice byla zvolena laminační epoxidová pryskyřice HAVEL L 285 MGS spolu s tužidlem HAVEL 285 MGS sloužící pro vytvrzení epoxidové pryskyřice. Poměr míchání byl dán dle tabulek výrobce a to 100:40 váhově. Směs bylo nutné správně rozmíchat a poté nepřekročit dobu zpracovatelnosti tzv. gel-time, kdy je možné s pryskyřicí ještě pracovat, systém neztrácí tekutost a viskozita je malá.

Tab. 6: Hodnoty hustoty a viskozity zvolené matrice [37]

	Laminační pryskyřice L 285	Tužidlo 285 MGS
Hustota g/cm ³ (25°C)	1,85 - 1,23	0,94 - 0,97
Viskozita MPa.s (25°C)	600 - 900	50 - 100

7.4 Proces ruční laminace – výroba desek

Po správné přípravě formy (tabule skla) bylo přistoupeno k ruční laminaci neboli ručnímu kladení. Nejprve byla nanesena připravená matrice přímo na tabuli skla a na ní následně položena první vrstva tkaniny. Poté opět nanesena matrice na kladenou vrstvu a následně opět přidána další vrstva tkaniny. Tento proces je opakován dle potřebného počtu vrstev tkaniny, v tomto případě bylo použito 5 vrstev tkanin.

Matrice byla nanášena pomocí válečku, to také pomohlo při odstraňování vzduchových bublin, které se tvořili mezi jednotlivými vrstvami tkaniny.

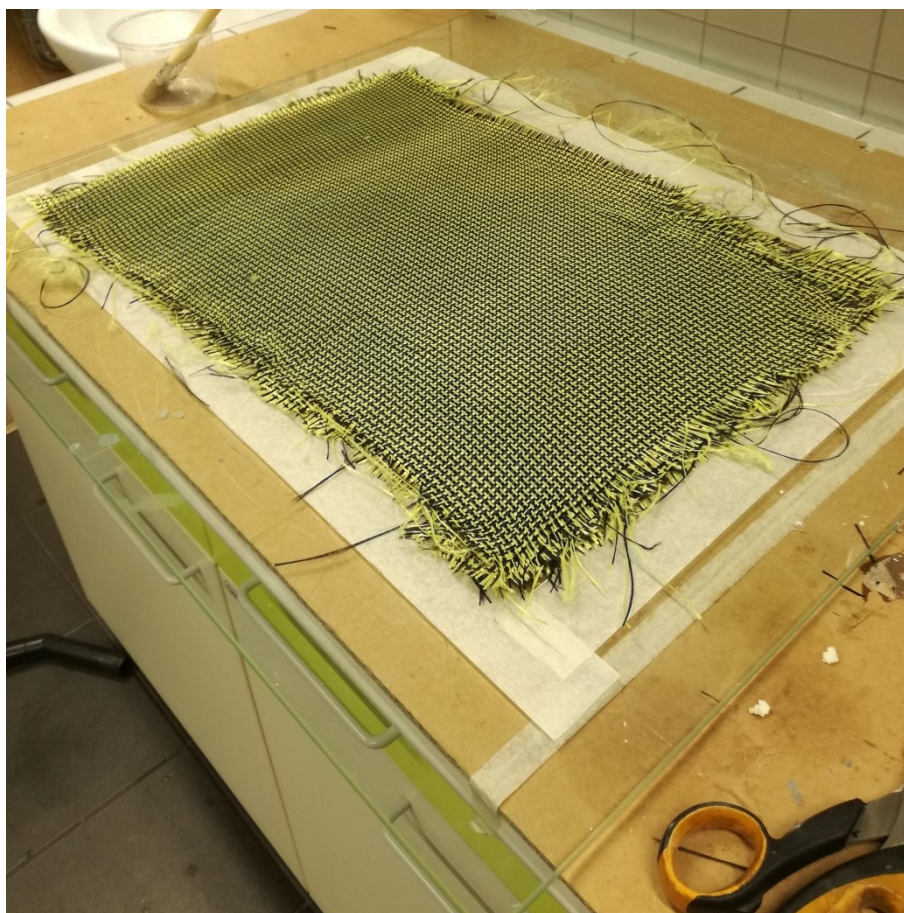
Rozměry desek byly zvoleny s ohledem na budoucí recyklační postup, a aby zároveň bylo možné vytvořit z desek vhodná tělíska pro mechanické zkoušky.

- Přibližné rozměry uhlíkových desek:
 - 1000x600 mm
 - 500x500 mm
- Přibližné rozměry hybridních desek aramid – uhlík:
 - 600x400 mm
 - 600x400 mm

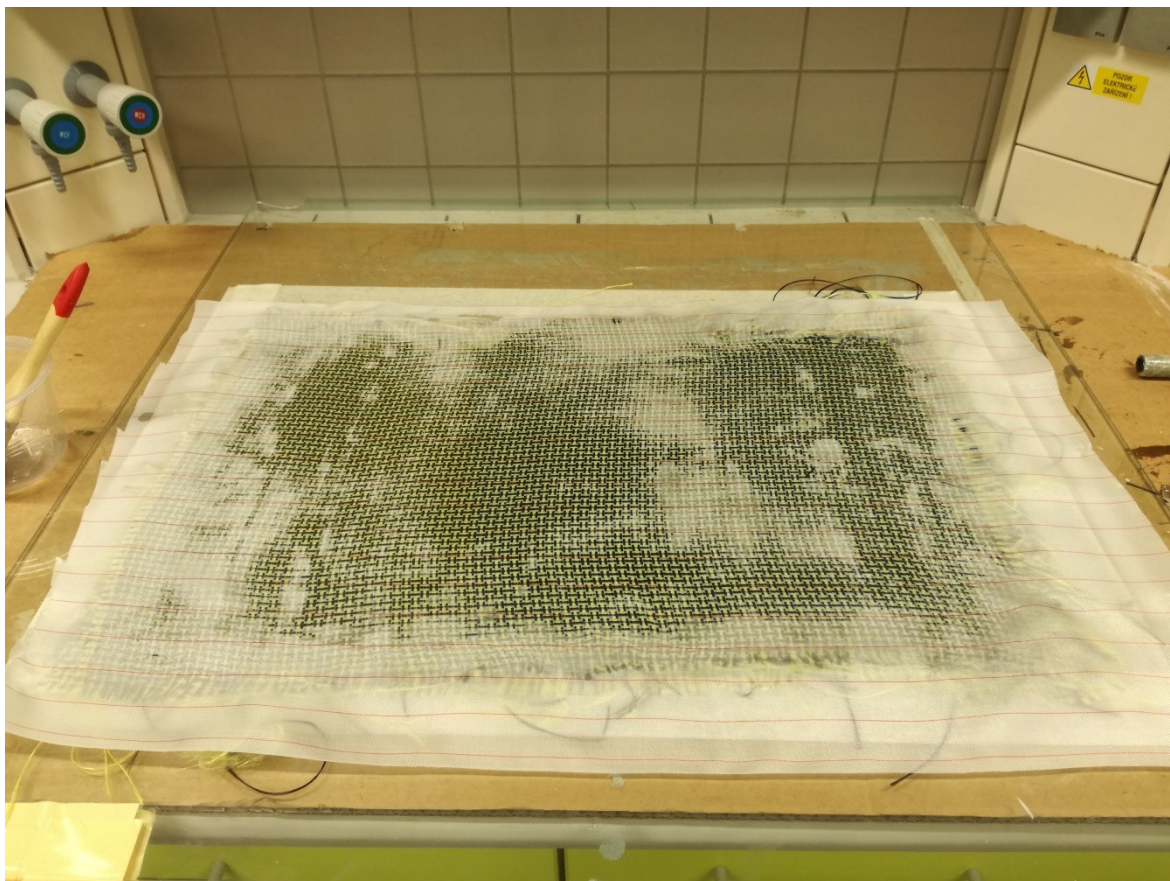
Po provedení ruční laminace byla poslední vrstva zakryta odtrhovou tkaninou, která zapříčiní lepší odformování a lepší kvalitu poslední vrstvy kompozitní desky.



Obr. 28: Ruční laminace uhlíkové kompozitní desky



Obr. 29: Ruční laminace hybridní kompozitní desky



Obr. 30: Hybridní kompozitní deska aramid-uhlík opatřena odtrhovou tkaninou

Po procesu ruční laminace byly desky ponechány 24 hodin v klidu při pokojové teplotě pro správné vytvrzení. Poté mohly být desky odformovány.

8 PROCES RECYKALCE KOMPOZITNÍCH DESEK

Jako způsob recyklace kompozitních polymerů byla vybrána termická recyklace pomocí pyrolýzy. Ta byla uskutečněna ve spolupráci s firmou MSV STUDÉNKA s.r.o. na jejich laboratorní pyrolýzní lince. Tato linka se skládá z těchto částí:

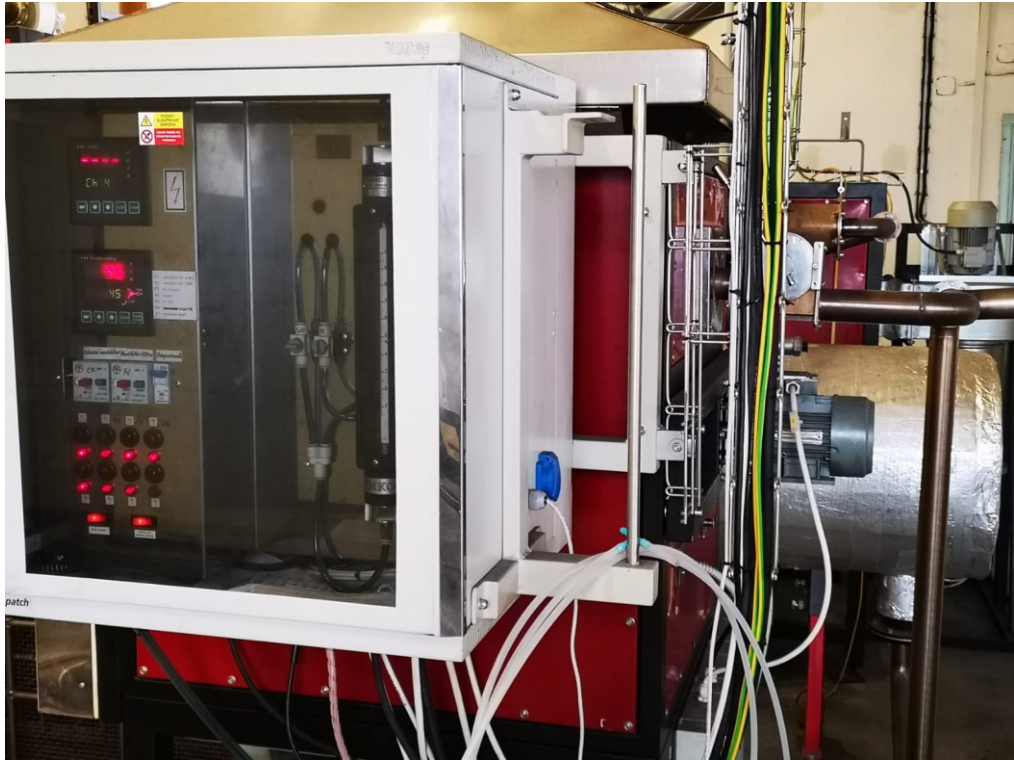
- a) Tepelná komora / pyrolýzní část
- b) Dospalovací zařízení
- c) Chladicí jednotka
- d) Vzduchotechnika
- e) Kontrolní a regulační prvky
- f) Zdroj umělé atmosféry – N₂ z generátoru dusíku 5N čistota
- g) Odsávací digestoř
- h) Kontinuální měření spalin

Základem systému je pyrolýzní reaktor, ve které dochází k samotnému teplotnímu rozkladu dávkově vložených materiálů typu vláknových reaktoplastických kompozitních materiálů. Zpracováváný materiál je umístěn uvnitř reaktoru. Ke zpracování může dojít v atmosféře standardní, inertní (např. dusík, apod.), příp. smíšené. Výsledkem zpracování je zplynování polymerní matrice kompozitního materiálu.

Plynné produkty jsou vedeny propojovacím potrubím přes škrticí klapku a přísávací ventil do dospalovacího zařízení, kde vlivem vysoké teploty dochází k zplynění a rozkladu veškerých plynných složek na CO₂, který je dále veden do chladicí jednotky. Pohyb zplodin, a tedy celkově mírně podtlakový charakter systému s dostatečnou kapacitou odvodu zplodin, zajišťuje odsávací ventilátor umístěný za chladicí jednotkou.

Inertní atmosféra, případně atmosféra smíšeného typu (standardní atmosféra + inertní plyn) je zajišťována přívodem příslušného plynu z generátoru dusíku přes ovládací a směšovací ventily a rotometr.

Uvnitř teplotního reaktoru je umístěn prostorový regulační termočlánek; kontrolní termočlánky jsou umístěny v prostoru teplotního reaktoru a v dalších místech. Regulaci prostorové teploty zajišťuje regulátor Ht Industry, kontrolní teploty jsou zaznamenávány pomocí multikanálového sběru Ht 100.



Obr. 31: Pyrolýzní komora ve firmě MSV Studénka s.r.o.

8.1 Příprava vzorků na recyklaci

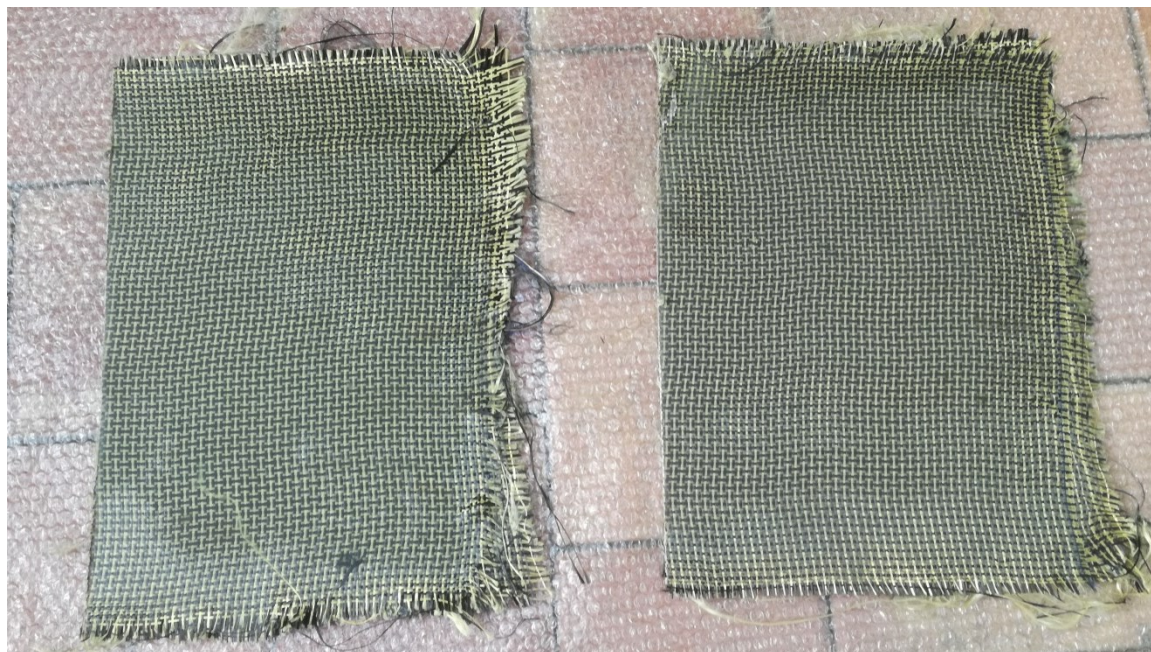
Vyrobené desky bylo třeba upravit na provedení recyklace. Obě desky určené pro recyklaci bylo nutné rozřezat na dvě poloviny, jelikož pro každou dvojici desek byly vybrány rozdílné procesní podmínky pyrolýzním recyklace.

8.1.1 Rozřezání vzorků

Rozdělení kompozitních desek obou zvolených tkanin bylo provedeno pomocí ruční kotoučové pily. Díky této operaci vznikly dvě uhlíkové kompozitní desky s rozměrem cca. 500x500 mm a dvě hybridní kompozitní desky aramid-uhlík s rozměrem cca 300x400 mm. Tyto desky již byly připraveny na proces recyklace.



Obr. 32: Kompozitní uhlíkové desky před recyklačním procesem



Obr. 33: Hybridní kompozitní desky před procesem recyklace

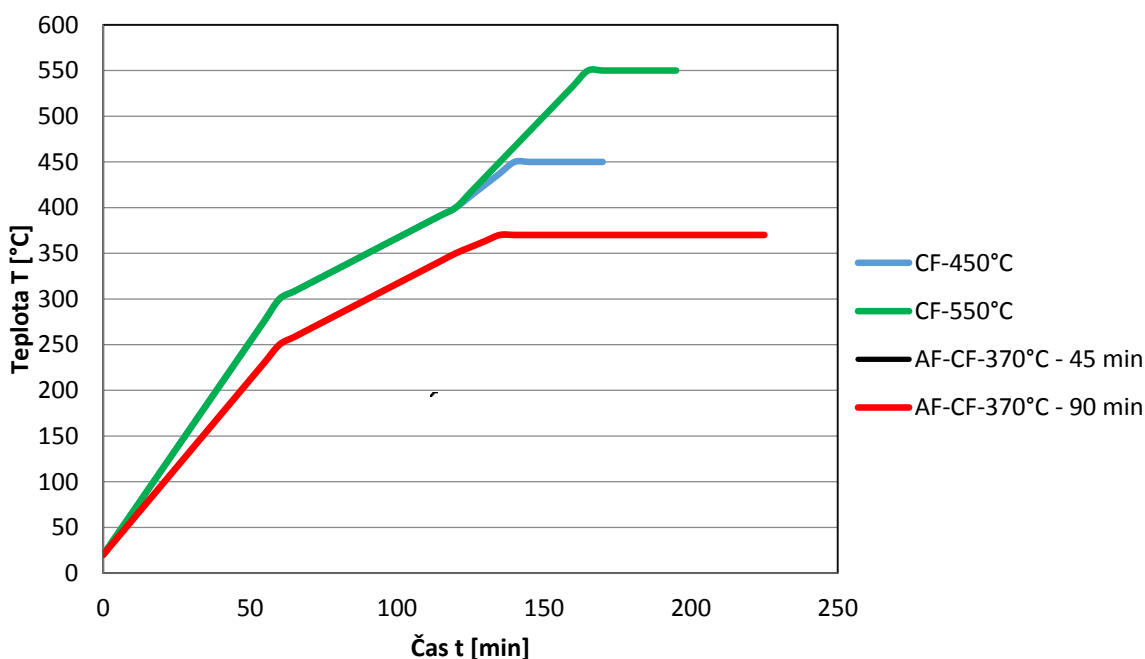
8.2 Zvolené procesní parametry recyklace

Pro každou připravenou desku byly zvoleny odlišné parametry recyklace. Ty byly vybírány dle fyzikálních vlastností jednotlivých částí kompozitních desek, zejména pak dle

použitých vláken. Bylo proto přistoupeno k těmto procesním podmínkám pyrolýzním recyklace:

- **Uhlíkové kompozitní desky**
 - Recyklace při teplotě 450°C s výdrží na této teplotě po dobu 30 minut
 - Recyklace při teplotě 550°C s výdrží na této teplotě po dobu 30 minut
- **Hybridní kompozitní desky aramid-uhlík**
 - Recyklace při teplotě 370°C s výdrží na této teplotě po dobu 45 minut
 - Recyklace při teplotě 370°C s výdrží na této teplotě po dobu 90 minut

Všechny desky byly temperovány pomocí ztrátové dusíkové atmosféry. Ta zabraňuje nadměrnému poškození vláken. Při použití pouze vzdušné atmosféry může dojít, vlivem kyslíku obsaženým v něm, k exotermické reakci. Průběh teploty během pyrolýzy je zaznamenán v grafu na Obr. 34. Rychlost zahřívání byla pro jednotlivé druhy desek stejná. Proto se křivky u CF (uhlíkových kompozitních desek) a AF-CF (hybridních kompozitních desek aramid uhlík) v počáteční fázi překrývají.



Obr. 34: Graf průběhů teplot při recyklaci u jednotlivých desek (CF - uhlíková kompozitní deska, AF-CF - hybridní deska aramid-uhlík)



Obr. 35: Uhlíková kompozitní deska zavěšená v pyrolýzní komoře

Při provádění recyklace kompozitních desek v pyrolýzní komoře, byla temperovaná každá deska zvlášť. Pro optimální prohřívání byly desky zavěšeny do svislé polohy viz Obr. 35.

8.3 Výsledky recyklace

Po proběhlé termické recyklaci v pyrolýzní komoře byla z kompozitních desek odstraněna, vlivem vysoké teploty, matrice. Ne u všech ovšem došlo k odstranění matrice v celém svém objemu.

8.3.1 Uhlíkové kompozitní desky

- Recyklace při teplotě 450°C s výdrží na této teplotě po dobu 30 minut

U uhlíkové kompozitní desky podrobené termické recyklaci při 450°C a výdrže na této teplotě po dobu 30 minut nedošlo k odstranění epoxidové pryskyřice v celém svém objemu. Jednotlivé vrstvy tkanin se od sebe dali oddělit, nicméně zůstávali mírně tvrdé a nepoddajné a zachovávali tvar desek.



Obr. 36: Recyklované uhlíkové vlákno při teplotě 450°C po dobu 30 minut

- Recyklace při teplotě 550°C s výdrží na této teplotě po dobu 30 minut

Při teplotě 550°C a výdrží na této teplotě po stejnou dobu, tedy 30 minut, již došlo k odstranění matrice v celém objemu. Jednotlivé vrstvy tkanin se od sebe dali taktéž oddělit, navíc byly poddajné a mechanickým chováním připomínali panenská vlákna.

V okrajových částech tkanin docházelo k třepení vláken. Dá se tedy konstatovat, že použití teploty 550°C při termické recyklaci uhlíkových kompozitů vede k lepším výsledkům při odstraňování matrice, než je tomu při použití teploty 450°C.



Obr. 37: Recyklované uhlíkové vlákno při teplotě 550°C po dobu 30 minut

8.3.2 Hybridní kompozitní desky

Při použití teploty 370°C nedojde k takovému odpařování matrice, které by zaručovalo její odstranění v celém objemu tkaniny. Nicméně při použití vyšších teplot, jako například u čistě uhlíkových kompozitních desek, by mohlo dojít k výrazné degradaci aramidu nebo dokonce k jeho odpaření. Bylo proto přistoupeno k použití nižší teploty s delší dobou výdrže oproti deskám uhlíkovým.

U hybridních desek došlo během recyklace ke změně barvy. Konkrétně došlo ke změně žluté barvy na černou u aramidových vláken. Krom toho však nebyla vlákna nijak viditelně poškozená.

- Recyklace při teplotě 370°C s výdrží na této teplotě po dobu 45 minut

Hybridní kompozitní deska po provedení recyklace za těchto procesních podmínek vykazovala podobné vlastnosti jako uhlíková kompozitní deska recyklovaná při teplotě 450°C se setrváním na této teplotě po dobu 30 minut.

Matrice nebyla odstraněna v celém svém objemu, ovšem jednotlivé vrstvy tkaniny se od sebe daly oddělit. Stejně jako u zmíněné uhlíkové desky došlo ke zkroucení jednotlivých vrstev. Zbytky matrice byly viditelné pouhým okem. Tento fakt je zaznamenán na Obr. 38.



Obr. 38: Hybridní tkanina aramid-uhlík po provedené recyklaci při 370°C a setrvání na této teplotě po dobu 45 minut.

- Recyklace při teplotě 370°C s výdrží na této teplotě po dobu 90 minut

Stejně jako u výdrže na teplotě 370°C po dobu 45 minut vykazovala hybridní tkanina aramid-uhlík zbytky matrice, pozorovatelné pouhým okem. Mechanické vlastnosti byly taktéž velice podobné tkanině spalované po dobu 45 minut.



Obr. 39: Hybridní tkanina aramid-uhlík po provedené recyklaci při 370°C a setrvání na této teplotě po dobu 90 minut.

8.4 Opětné zalisování desek po recyklaci a výroba zkušebních tělísek

Po proběhlé pyrolýze byly všechny recyklované tkaniny opět zalisovány stejnou metodou, tedy ruční laminací s použitím stejného typu epoxidové matrice. Z vyrobených desek byly poté vytvořeny zkušební tělíska na tahovou zkoušku a zkoušku rázové houževnatosti Charpyho kladivem, ve velikostech dle platných norem. Tyto zkušební tělíska byly vytvořeny ve spolupráci s firmou FORM s.r.o. pomocí vodního paprsku.

Nutno podotknout, že malé rozměry některých z desek umožňovaly vytvoření pouze určitého množství těchto zkušebních tělísek, zejména u recyklovaných hybridních desek.

9 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Všechny vyrobené a recyklované kompozitní desky byly testovány dle platných norem na půdě UTB ve Zlíně. Z desek byly vyřezány zkušební tělíska pomocí vodního paprsku dle normy pro tahovou zkoušku a pro zkoušku rázové houževnosti – Charpy kladivo.

9.1 Tahová zkouška dle ČSN EN ISO 527-4

Ze všech vyrobených desek byly vyrobeny zkušební tělíska v rozměrech 250x25 mm. Tyto tělíska poté byly zatěžovány tahovou zkouškou dle normy ČSN EN ISO 527 - 4 a byly zjišťovány hodnoty modulu pružnosti – E , napětí na mezi pevnosti – R_m , relativní prodloužení – ϵ , síla při přetržení – F_m , práce při přetržení – W . Tyto hodnoty jsou zaznamenány v tabulkách včetně průměrných hodnot.

Zkouška byla vykonána na zařízení ZwickRoell Vibrophore 100 v prostorech fakulty UTB. Pro záznam a vyhodnocení výsledků z tahové zkoušky byl použit program testXpert III.



Obr. 40: Zkušební tělísko při provádění tahové zkoušky

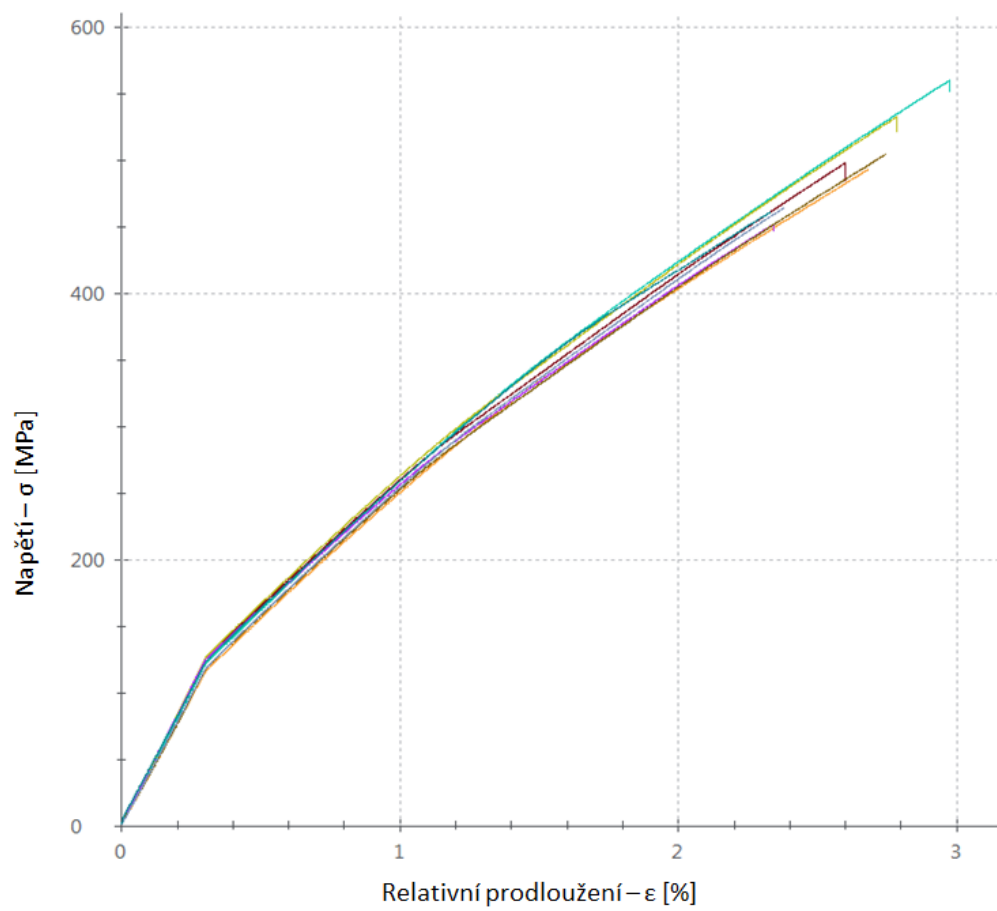
9.1.1 Tahová zkouška pro uhlíkový kompozit z panenských vláken

Záznam z tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z panenských vláken je zobrazen v Tab.

7. Pracovní diagram je zaznamenán na Obr. 41.

Tab. 7: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z panenských vláken

Číslo měření	Modul pružnosti	Napětí na mezi pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
1	38200	493	2,7	19700	15679,20
2	39800	560	3,0	22000	19558,61
3	41000	498	2,6	19300	15345,27
4	41500	533	2,8	20800	17531,14
5	40900	451	2,3	17800	12645,01
6	38500	505	2,7	20200	16372,01
7	38800	464	2,4	18600	13016,37
8	39300	461	2,3	18400	12865,75
Průměrné hodnoty					
	Modul pružnosti	Napětí na mez pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
Průměrná hodnota (\bar{x})	39800	496	2,6	19600	15376,67
Směr. odchylka (s)	1300	37,2	0,2	1380	2465,51
Variační koeficient (v) [%]	3,19	7,5	9,06	7,03	16,03



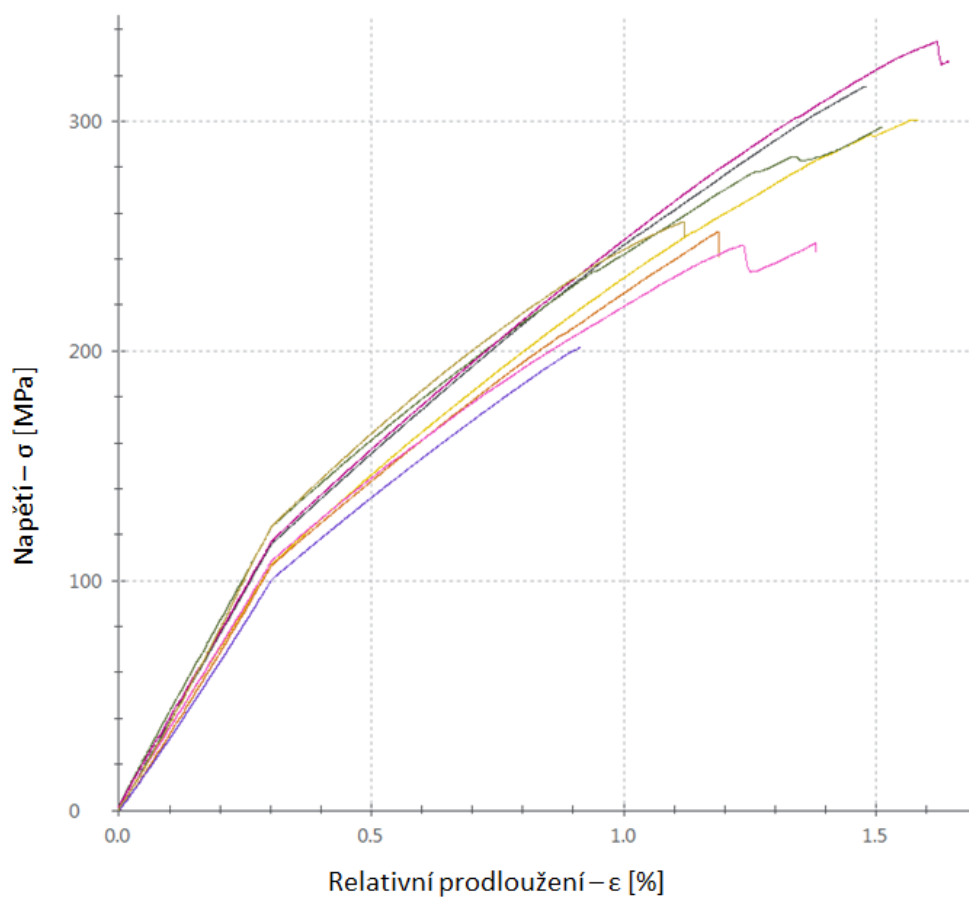
Obr. 41: Pracovní diagram tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z panenských vláken

9.1.2 Tahová zkouška pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C

Záznam z tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C je zobrazen v Tab. 8 Pracovní diagram je zaznamenán na Obr. 41.

Tab. 8: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C

Číslo měření	Modul pružnosti	Napětí na mezi pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
1	38500	315	1,5	12600	5623,55
2	34800	301	1,6	12000	5886,74
3	39700	298	1,5	11900	5773,35
4	35700	252	1,2	9620	3562,04
5	35500	247	1,4	9700	4467,23
6	33400	202	0,9	8060	2177,96
7	37900	335	1,6	13000	6760,36
8	41600	256	1,1	9970	3603,25
Průměrné hodnoty					
	Modul pružnosti	Napětí na mez pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
Průměrná hodnota (\bar{x})	37100	276	1,3	10900	4731,81
Směr. odchylka (s)	2770	43,7	0,3	1750	1538,23
Variační koeficient (v) [%]	7,45	15,87	18,57	16,13	32,51



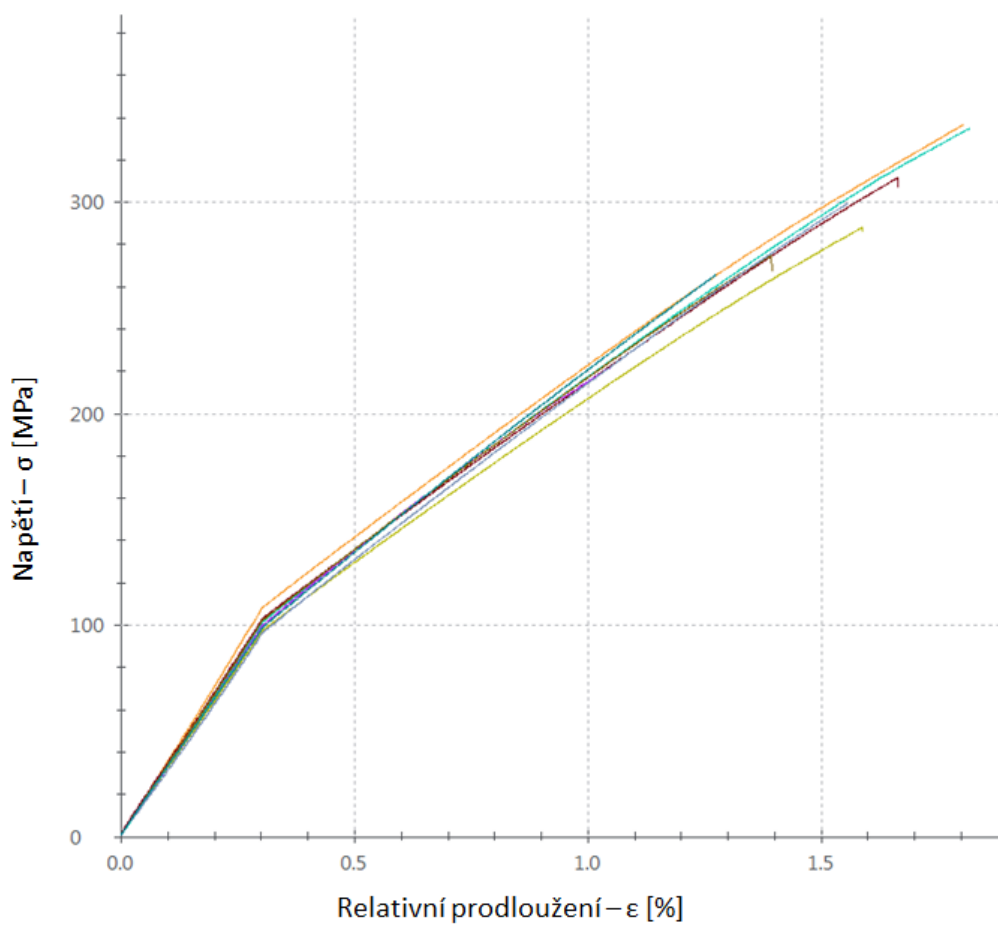
Obr. 42: Pracovní diagram tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C

9.1.3 Tahová zkouška pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C

Záznam z tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C je zobrazen v Tab. 9. Pracovní diagram je zaznamenán na Obr. 43.

Tab. 9: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C

Číslo měření	Modul pružnosti	Napětí na mezi pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
1	35500	337	1,8	13500	7208,09
2	33200	335	1,8	13400	7118,57
3	33300	311	1,7	12300	6064,17
4	31500	288	1,6	11400	5370,07
5	32400	222	1,1	8890	2759,19
6	33400	275	1,4	10700	4499,90
7	31300	300	1,6	12000	5358,12
8	32100	266	1,3	10600	3888,08
Průměrné hodnoty					
	Modul pružnosti	Napětí na mez pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
Průměrná hodnota (\bar{x})	32800	292	1,5	11600	5283,27
Směr. odchylka (s)	1320	38,1	0,3	1540	1541,22
Variační koeficient (v) [%]	4,02	13,06	17,49	13,25	29,17



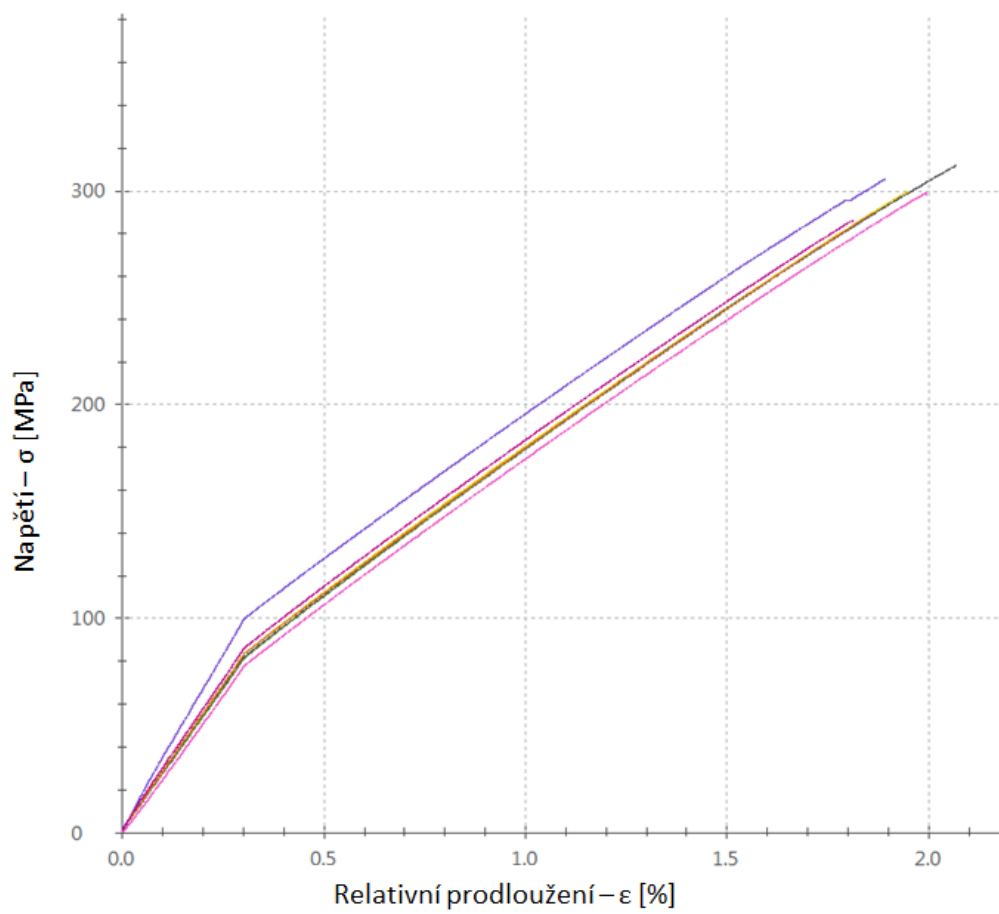
Obr. 43: Pracovní diagram tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C

9.1.4 Tahová zkouška pro hybridní kompozit z panenských vláken

Záznam z tahové zkoušky pro hybridní kompozit složený z uhlíkových a aramidových vláken je zobrazen v Tab. 10. Pracovní diagram je zaznamenán na Obr. 44.

Tab. 10: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro hybridní kompozit z panenských vláken

Číslo měření	Modul pružnosti	Napětí na mezi pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
1	26600	312	2,1	12500	7386,76
2	27300	300	1,9	11900	6697,97
3	26400	252	1,6	10100	4471,7
4	27100	290	1,9	11600	6173,24
5	25900	299	2	11900	6748,36
6	32200	306	1,9	12200	6903,06
7	27600	286	1,8	11400	6000,16
Průměrné hodnoty					
	Modul pružnosti	Napětí na mez pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
Průměrná hodnota (\bar{x})	27600	292	1,9	11700	6340,18
Směr. odchylka (s)	2110	19,7	0,2	783	943,53
Variační koeficient (v) [%]	7,65	6,76	8,85	6,72	14,88



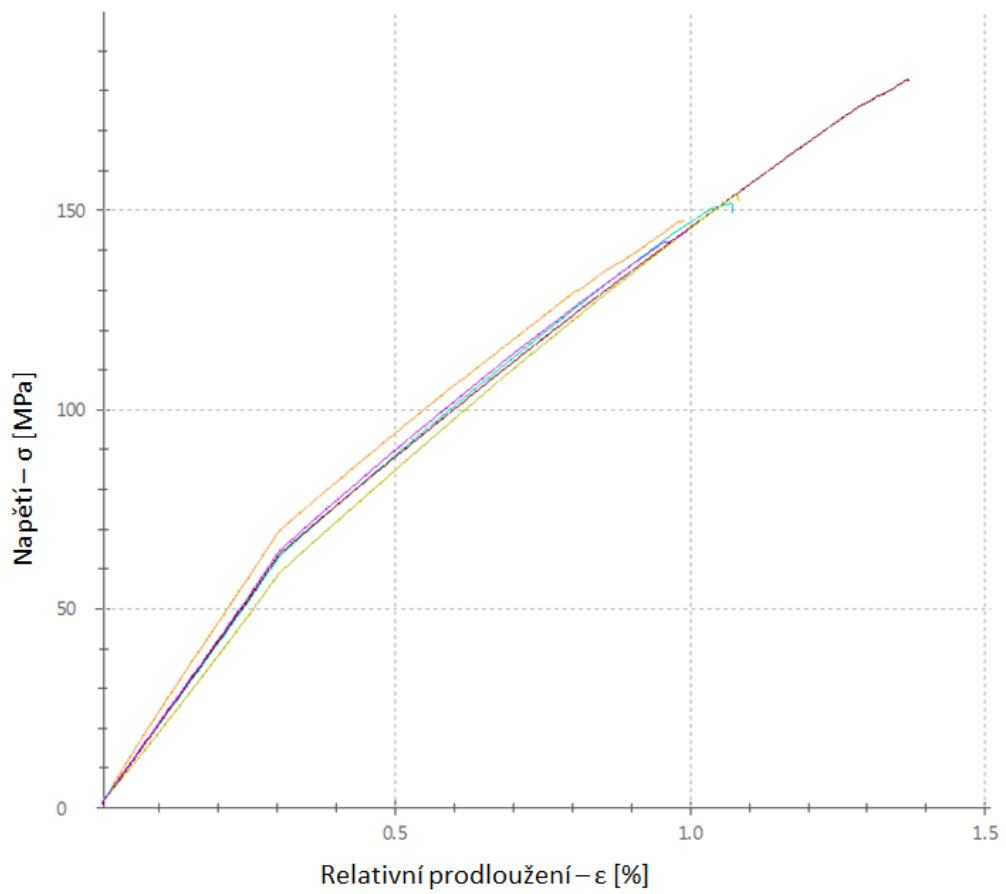
Obr. 44: Pracovní diagram tahové zkoušky pro hybridní kompozit z panenských vláken

9.1.5 Tahová zkouška pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 45 minut

Záznam z tahové zkoušky pro hybridní kompozit složený z uhlíkových a aramidových vláken recyklovaný při teplotě 370°C s dobou výdrže na této teplotě po dobu 45 minut je zobrazen v Tab. 11. Pracovní diagram je zaznamenán na Obr. 45. Hodnota práce při přetížení u třetího měřeného zkušebního tělesa značně převyšuje všechny ostatní hodnoty. Díky tomu je variační koeficient u toho měření značně vysoký. Stejně je tomu u relativního prodloužení tohoto měření. Třetí hodnota se dá považovat za odlehlou.

Tab. 11: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 45 min

Číslo měření	Modul pružnosti	Napětí na mezi pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
1	22400	148	1,0	5910	1742,68
2	20300	152	1,1	5970	1892,87
3	20700	183	1,4	7290	2889,78
4	19100	154	1,1	6100	1863,19
5	18800	133	1,0	2260	1852,08
6	20800	145	1,0	5790	1675,89
Průměrné hodnoty					
	Modul pružnosti	Napětí na mez pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
Průměrná hodnota (\bar{x})	20700	157	0,9	6230	1677,18
Směr. odchylka (s)	1190	13,7	0,5	549	935,21
Variační koeficient (v) [%]	5,78	8,77	51,25	8,81	55,76



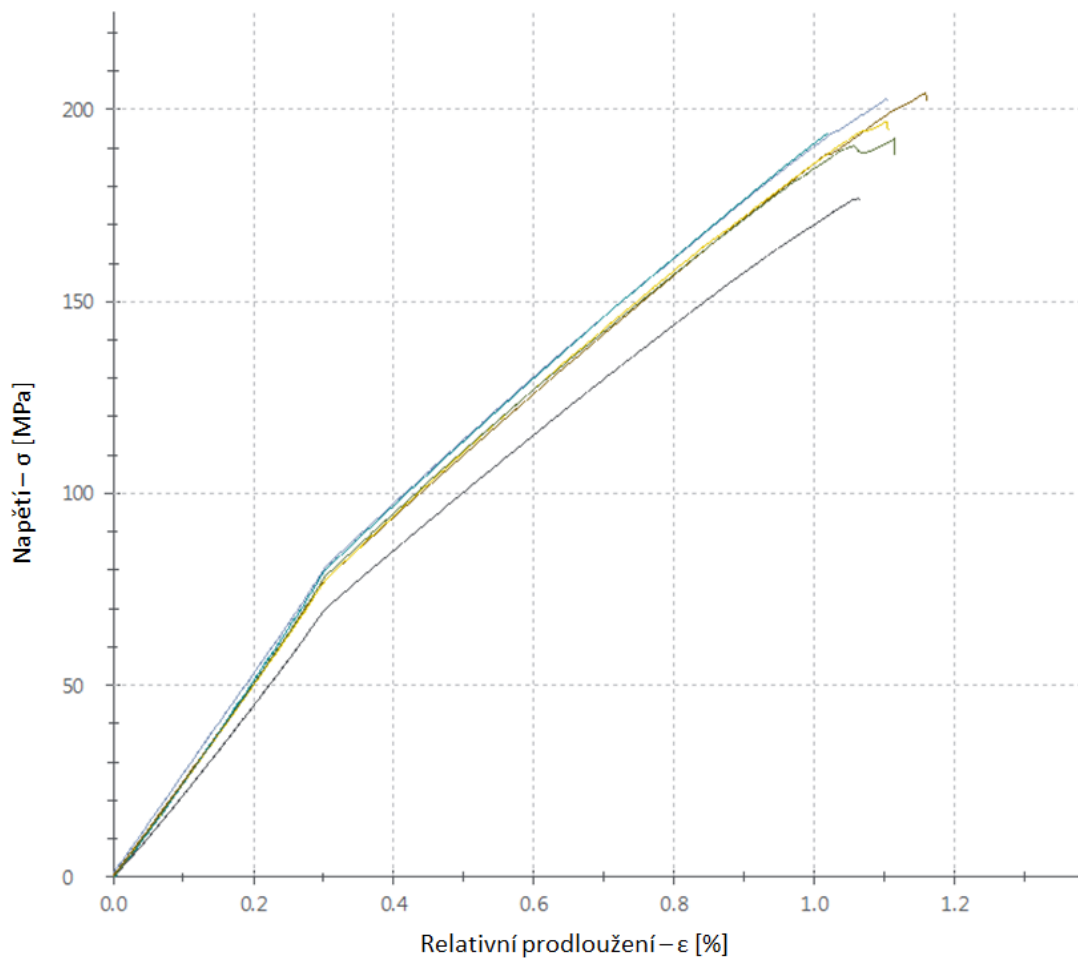
Obr. 45: Pracovní diagram tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 45 minut.

9.1.6 Tahová zkouška pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 90 minut

Záznam z tahové zkoušky pro hybridní kompozit složený z uhlíkových a aramidových vláken recyklovaný při teplotě 370°C s dobou výdrže na této teplotě po dobu 90 minut je zobrazen v Tab. 12. Pracovní diagram je zaznamenán na Obr. 46.

Tab. 12: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 90 min

Číslo měření	Modul pružnosti	Napětí na mezi pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
1	25300	204	1,2	8080	2712,84
2	26100	203	1,1	8090	2568,20
3	26600	194	1,0	7760	2226,15
4	23100	177	1,1	7050	2125,52
5	25500	197	1,1	7790	2500,20
6	25800	192	1,1	7530	2531,70
Průměrné hodnoty					
	Modul pružnosti	Napětí na mez pevnosti	Relativní prodloužení	Síla při přetržení	Práce při přetržení
	E [MPa]	σ_m [MPa]	ϵ [%]	F_{max} [N]	W [N/mm]
Průměrná hodnota (\bar{x})	25400	195	1,1	7720	2444,1
Směr. odchylka (s)	1200	9,87	0	391	222,46
Variační koeficient (v) [%]	4,73	5,07	4,31	5,07	9,1



Obr. 46: Pracovní diagram tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 90 minut.

9.1.7 Porovnání hodnot tahové zkoušky pro jednotlivé kompozitní systémy

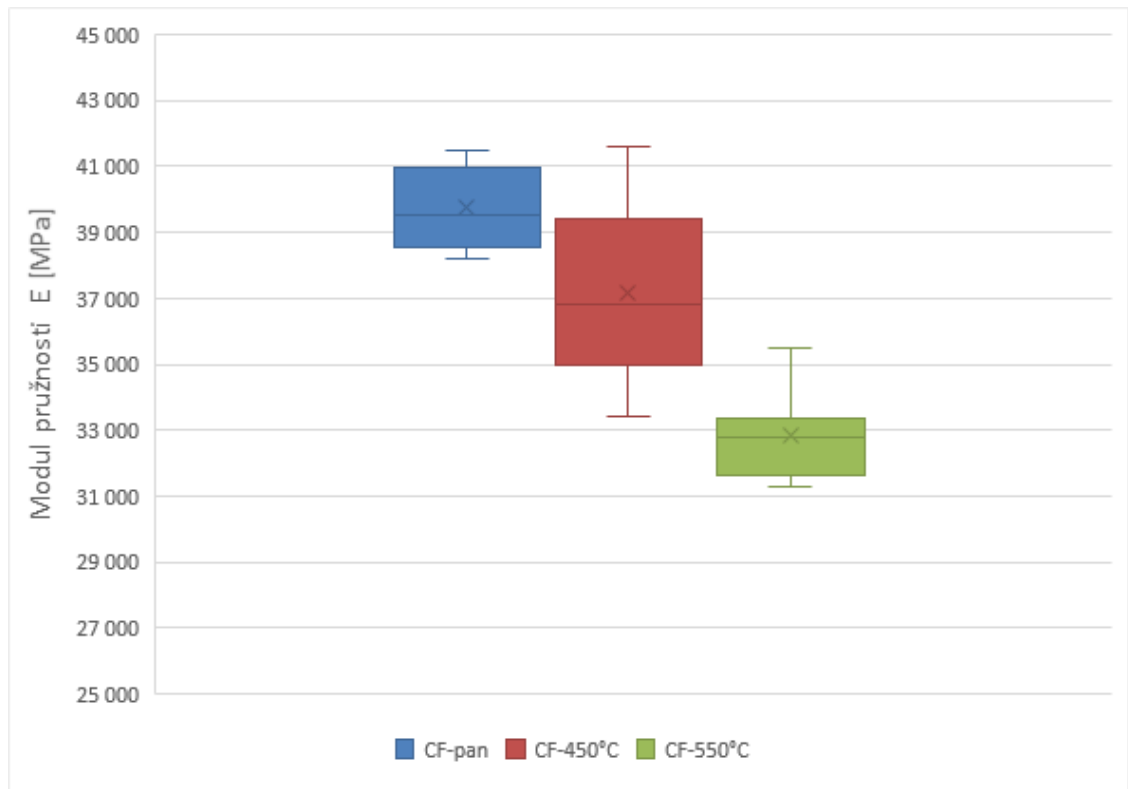
Po provedení tahové zkoušky byly srovnány průměrné hodnoty modulu pružnosti a napětí na mezi pevnosti zvláště pro uhlíkový kompozitní systém a hybridní kompozitní systém. Toto porovnání je reprezentováno pomocí box-plot diagramů.

- Uhlíkový kompozitní systém

Uhlíkový kompozitní systém se skládal ze tří desek, vyrobených ze stejného počtu vrstev i stejné tkaniny. Uhlíková vlákna nezátížená recyklací jsou v grafech značená jako CF-pan. Uhlíková vlákna zatížená recyklací jsou v grafech značena jako CF-450°C respektive CF-550°C, vždy označující maximální teplotu provedené recyklace.

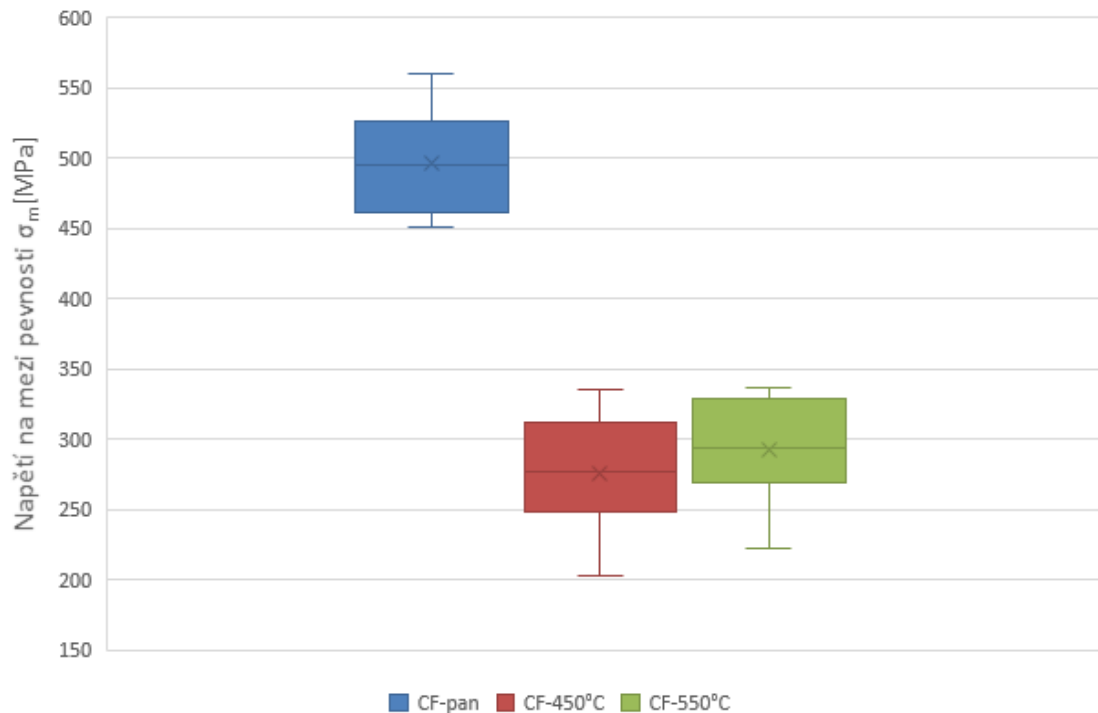
Při srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti jednotlivých kompozitních systémů lze pozorovat klesající trend modulu pružnosti.

Největší modul pružnosti byl naměřen na uhlíkovém kompozitu nezatíženém recyklací, naopak nejnižší byl naměřen na uhlíkovém kompozitu podrobeném recyklaci při teplotě 550°C. Graf srovnání je na Obr. 47.



Obr. 47: Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti u jednotlivých uhlíkových kompozitních desek

Při srovnání průměrných hodnot napětí na mez pevnosti pro jednotlivé kompozitní systémy je pokles hodnot recyklovaných vláken ve srovnání s panenskými o více než 30%.



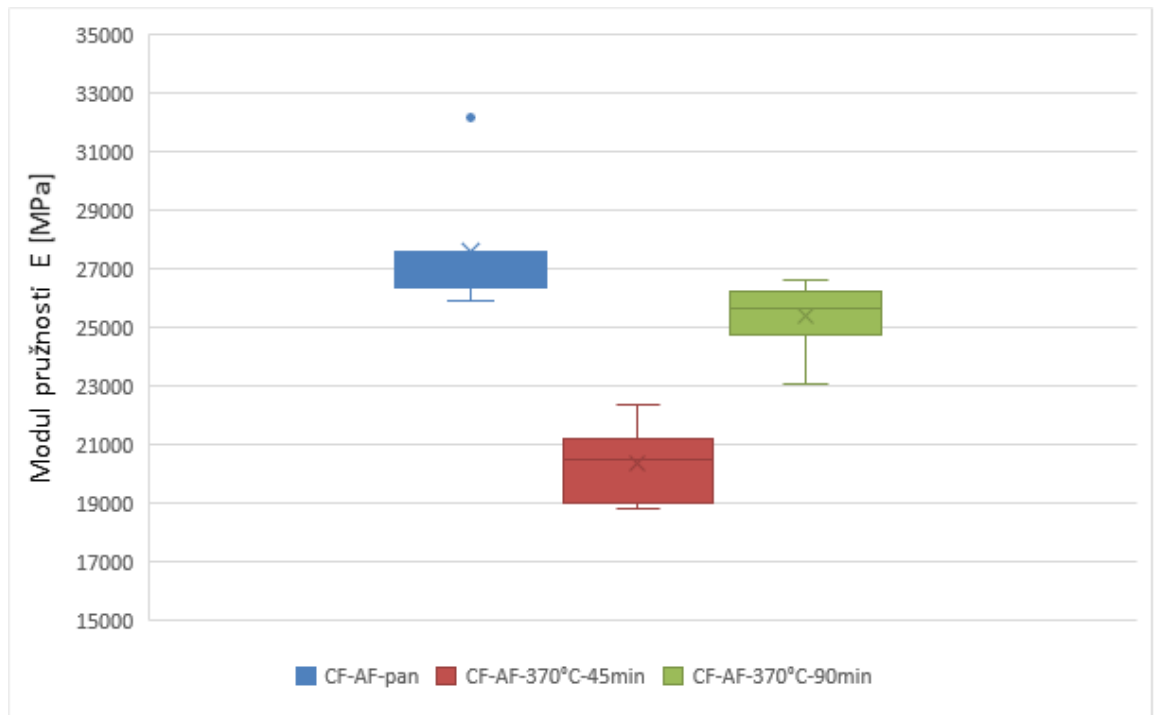
Obr. 48: Srovnání průměrných hodnot napětí na mezi pevnosti u jednotlivých uhlíkových kompozitních desek

- Hybridní kompozitní systém

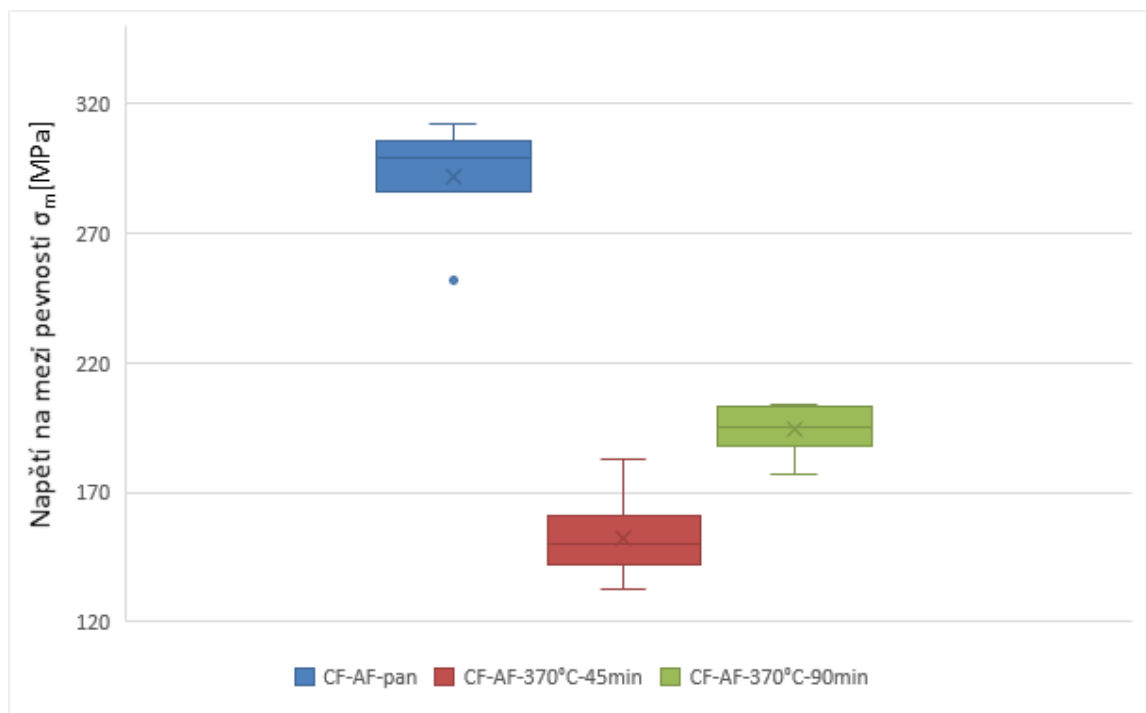
Hybridní kompozitní systém se skládá ze tří desek z hybridní tkaniny, složené z uhlíkových a kompozitních vláken jak recyklovaných tak panenských. V grafech značené jako CF-AF-pan pro panenská vlákna. Recyklované tkaniny jsou v grafech značeny dle teploty recyklace a doby výdrže na těchto teplotách, tedy CF-AF-370°C-45min a CF-AF-370°C-90min.

Při srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti a napětí na mezi pevnosti hybridního kompozitního systému, lze pozorovat, že nejlepších výsledků dosahovaly tělíska vyrobená z desky nezátížené recyklačním cyklem. Překvapením ovšem je, že vlákna recyklovaná při teplotě 370°C po delší dobu, tedy 90 minut, mají lepší mechanické vlastnosti, než je tomu u vláken recyklovaných po dobu 45 minut. Tento fakt lze přisoudit k lepšímu odstranění matrice v případě delší doby výdrže na stejné teplotě a tedy kvalitnějšímu odstranění přebytečné matrice.

U srovnání průměrných hodnot napětí na mezi pevnosti pro hybridní kompozitní systém, byl zaznamenán stejný trend jako pro srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti u stejného systému.



Obr. 49: Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti u jednotlivých hybridních kompozitních desek

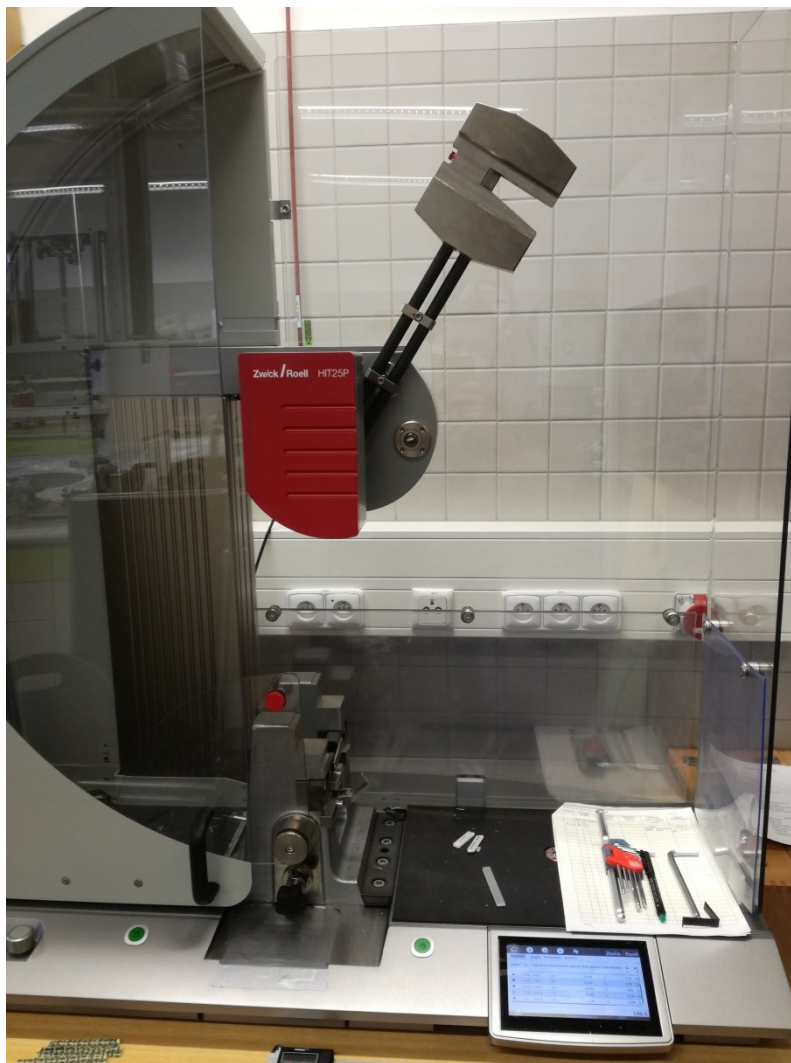


Obr. 50: Srovnání průměrných hodnot napětí na mezi pevnosti u jednotlivých hybridních kompozitních desek

9.2 Zkouška rázové houževnatosti Charpy dle ČSN EN ISO 179-1

Pro zkoušku rázové houževnatosti pomocí Charpy kladiva byly ze všech vyrobených panenských i recyklovaných desek vyřezány, pomocí vodního paprsku, zkušební tělíska v rozměrech 80 mm na délku a 10 mm na šířku dle normy ČSN EN ISO 179-1. Tyto tělíska byly poté zatěžovány rázem na širší stranu pomocí zařízení Zwick Roell HIT25P.

Experiment byl proveden na půdě Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.



Obr. 51: Charpy kladivo pro testování rázové houževnatosti

Zkouška rázem v ohybu, se provádí na Charpyho kyvadlovém kladivu. Těžké kladivo, které je otočné kolem své osy, se zdvihne a upevní v počáteční poloze, viz (Obr. 51). V nejnižší poloze se upevní zkušební těleso. Po uvolnění z počáteční polohy se kladivo pohybuje po kruhové dráze, v dolní poloze poté přerazí zkušební tělíska a pokračuje dále do konečné polohy, která je nižší než počáteční, jelikož kladivo spotřebovalo určitou energii pro přeražení zkušební tělesa.

9.2.1 Zkouška rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z panenských vláken

Záznam naměřených a průměrných hodnot zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit nezatížený recyklačním cyklem je zobrazen v Tab. 13.

Tab. 13: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z panenských vláken

Číslo měření	Rázová energie	Rázová houževnatost
	W [J]	a_{cu} [kJ/m ²]
1	0,72	48,08
2	0,73	48,95
3	0,90	59,77
4	0,73	48,77
5	0,77	51,19
6	0,80	53,11
7	0,71	47,05
8	0,70	46,71
9	0,82	54,85
10	0,74	49,64
Průměrné hodnoty		
Průměrná hodnota (\bar{x})	0,76	50,81
Směr. odchylka (s)	0,06	4,08
Variační koeficient (v) [%]	8,02	8,02

9.2.2 Zkouška rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C

Záznam naměřených a průměrných hodnot zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit složený z vláken zatížený recyklací při teplotě 450°C je zobrazen v Tab. 14.

Tab. 14: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C

Číslo měření	Rázová energie	Rázová houževnatost
	W [J]	a_{cu} [kJ/m ²]
1	0,87	58,19
2	0,52	26,16
3	0,74	37,23
4	0,73	36,58
5	0,77	38,53
6	0,79	39,70
7	0,77	38,53
8	0,56	27,91
Průměrné hodnoty		
Průměrná hodnota (\bar{x})	0,72	37,85
Směr. odchylka (s)	0,12	9,68
Variační koeficient (v) [%]	16,55	25,57

9.2.3 Zkouška rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C

Záznam naměřených a průměrných hodnot zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit složený z vláken zatížený recyklací při teplotě 450°C je zobrazen v Tab. 15

Tab. 15: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C

Číslo měření	Rázová energie	Rázová houževnatost
	W [J]	a_{cu} [kJ/m ²]
1	0,34	24,37
2	0,32	22,82
3	0,33	23,85
4	0,31	21,96
5	0,37	26,45
6	0,31	22,13
7	0,41	29,41
8	0,40	28,36
9	0,34	24,37
Průměrné hodnoty		
Průměrná hodnota (\bar{x})	0,35	24,86
Směr. odchylka (s)	0,04	2,67
Variační koeficient (v) [%]	10,74	10,74

9.2.4 Zkouška rázem v ohybu pro hybridní kompozit z panenských vláken

Záznam naměřených a průměrných hodnot zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit složený z panenských vláken uhlíku a aramidu je zobrazen v Tab. 16.

Tab. 16: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit z nerecyklovaných vláken

Číslo měření	Rázová energie	Rázová houževnatost
	W [J]	a_{cu} [kJ/m ²]
1	0,58	38,56
2	0,71	47,22
3	0,63	42,27
4	0,65	43,29
5	0,66	43,97
6	0,64	42,61
7	0,65	43,12
8	0,65	43,12
9	0,78	52,06
10	0,73	48,95
Průměrné hodnoty		
Průměrná hodnota (\bar{x})	0,67	44,52
Směr. odchylka (s)	0,06	3,86
Variační koeficient (v) [%]	8,66	8,66

9.2.5 Zkouška rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobrou výdrže na této teplotě 45 min.

Záznam naměřených a průměrných hodnot zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit, složený z uhlíku a aramidu, recyklovaný při 370°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 45 minut, je zobrazen v

Tab. 17. Důvod nízkého počtu měření pro oba recyklované hybridní kompozity je fakt, že recyklované desky měly malé rozměry. Důvod byl počáteční pochyb, zdali se recyklace hybridního kompozitu vůbec zdaří a zda budou desky po recyklačním cyklu vhodné pro další měření.

Tab. 17: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 45 min.

Číslo měření	Rázová energie	Rázová houževnatost
	W [J]	a_{cu} [kJ/m ²]
1	0,54	35,71
2	0,36	24,20
3	0,45	32,52
4	0,50	33,38
5	0,44	29,58
6	0,46	30,40
Průměrné hodnoty		
Průměrná hodnota (\bar{x})	0,46	30,97
Směr. odchylka (s)	0,06	3,97
Variační koeficient (v) [%]	13,27	12,82

9.2.6 Zkouška rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobrou výdrže na této teplotě 90 min.

Záznam naměřených a průměrných hodnot zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit, složený z uhlíku a aramidu, recyklovaný při 370°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 90 minut je zobrazen v Tab. 18.

Tab. 18: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 90 min.

Číslo měření	Rázová energie	Rázová houževnatost
	W [J]	a_{cu} [kJ/m ²]
1	0,52	34,37
2	0,57	37,88
3	0,49	32,55
4	0,57	38,22
5	0,55	36,22
6	0,55	35,13
7	0,61	38,67
8	0,57	36,41
Průměrné hodnoty		
Průměrná hodnota (\bar{x})	0,55	36,18
Směr. odchylka (s)	0,04	2,10
Variační koeficient (v) [%]	6,54	5,80

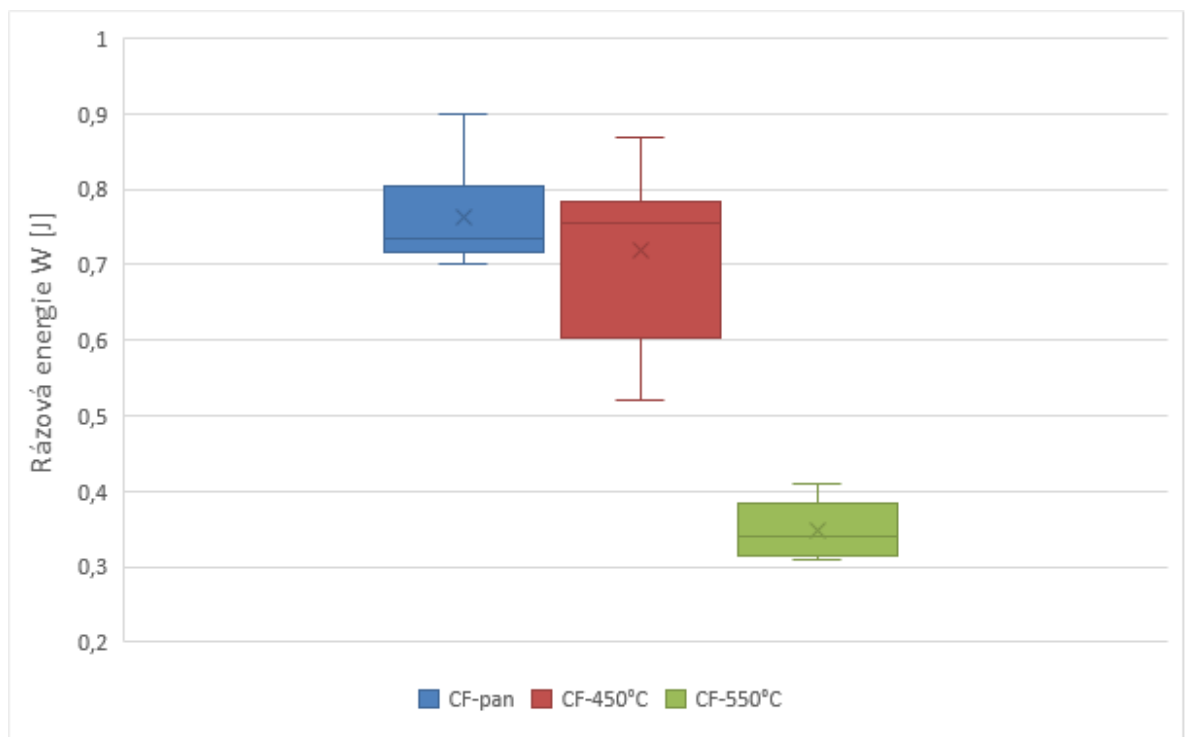
9.2.7 Porovnání hodnot zkoušky rázem v ohybu pro jednotlivé kompozitní systémy.

Po provedení zkoušky rázem v ohybu byly srovnány průměrné hodnoty rázové energie a rázové houževnatosti zvláště pro uhlíkový kompozitní systém a hybridní kompozitní systém. Toto porovnání je reprezentováno pomocí box-plot diagramů.

- Uhlíkový kompozitní systém

Uhlíkový kompozitní systém se, stejně jako pro tahovou zkoušku, skládal ze tří desek vyrobených ze stejného počtu vrstev i stejné tkaniny. Uhlíkové vlákna nezatížená recyklací jsou v grafech značena jako CF-pan. Uhlíkové vlákna zatížená recyklací jsou v grafech značena jako CF-450°C respektive CF-550°C, vždy označující maximální teplotu provedené recyklace.

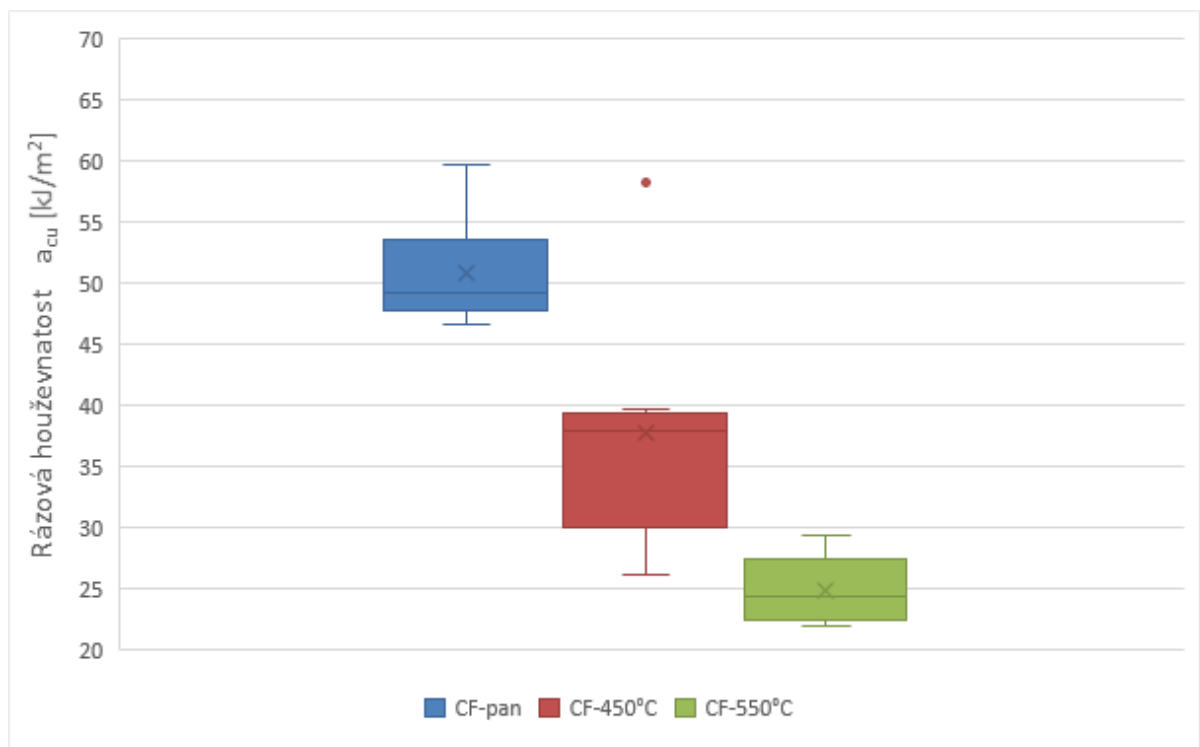
Při srovnání průměrných hodnot rázové energie jednotlivých uhlíkových desek pomocí box-plot diagramů (Obr. 52) si lze všimnout, že hodnoty pro uhlíkový kompozit nezatížený recyklačním cyklem a uhlíkový kompozit recyklovaný při teplotě 450°C vykazují velmi podobné hodnoty. Oproti tomu uhlíkový kompozit recyklovaný při 550°C vykazuje o dost nižší hodnoty rázové energie.



Obr. 52: Srovnání průměrných hodnot rázové energie pro uhlíkový kompozitní systém pomocí box-plot diagramů

Rázová energie je taková energie, která je spotřebovaná při zrychlení, deformaci a popřípadě přeražení zkušebního tělesa.

Při srovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti, což je rázová energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa bez vrubu, vztažena na původní průřez tělesa, lze pozorovat klesající trend. Největší hodnoty byly zaznamenány u uhlíkového kompozitu nezátíženého recyklačním cyklem (CF-pan), nižší hodnoty byly zaznamenány u uhlíkového kompozitu zatíženého recyklačním cyklem při teplotě 450°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 30 minut (CF-450°C) a nejhorsí výsledky byly naměřeny na uhlíkovém kompozitu zatíženého recyklačním cyklem při teplotě 550°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 30 minut (CF-550°C).



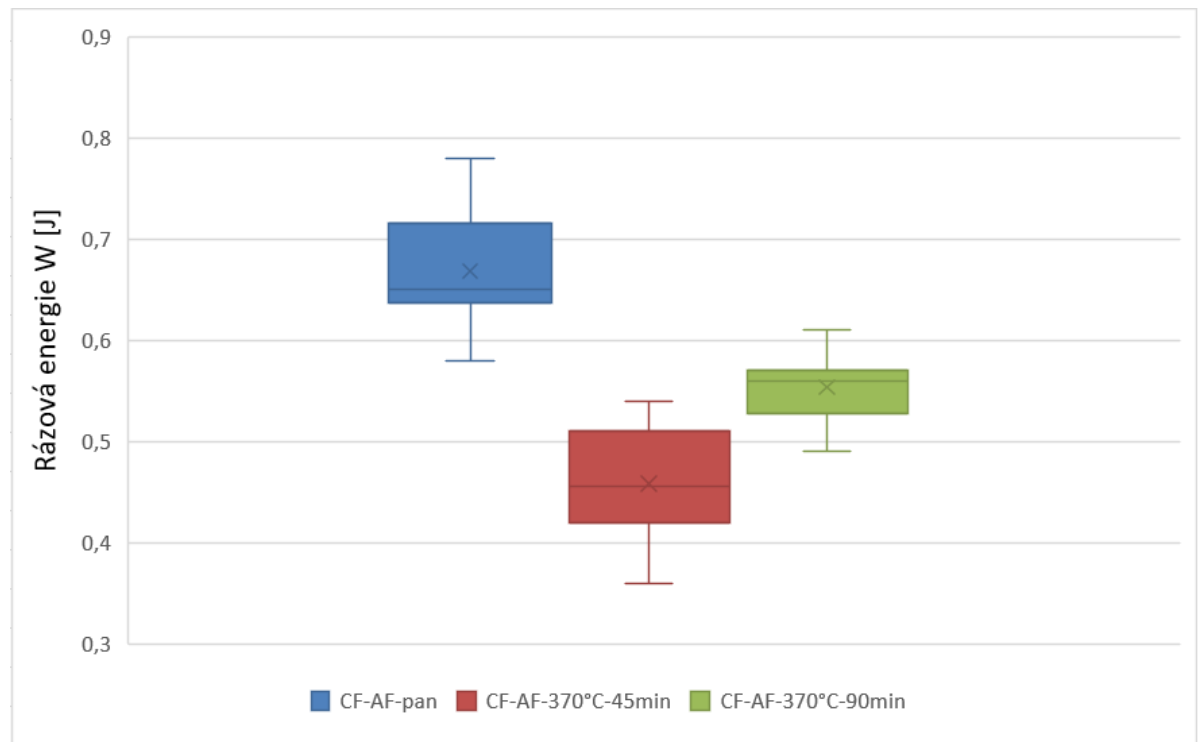
Obr. 53: Srovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti pro uhlíkový kompozitní systém pomocí box-plot diagramů

- Hybridní systém

Hybridní kompozitní systém se, stejně jako pro tahovou zkoušku, skládá z kompozitních desek z panenských vláken hybridní tkaniny, složené z uhlíkových a kompozitních vláken (v box-plot diagramu značených jako CF-AF-pan) a recyklovaných vláken ze stejné tkaniny. Recyklované tkaniny jsou v grafech značeny

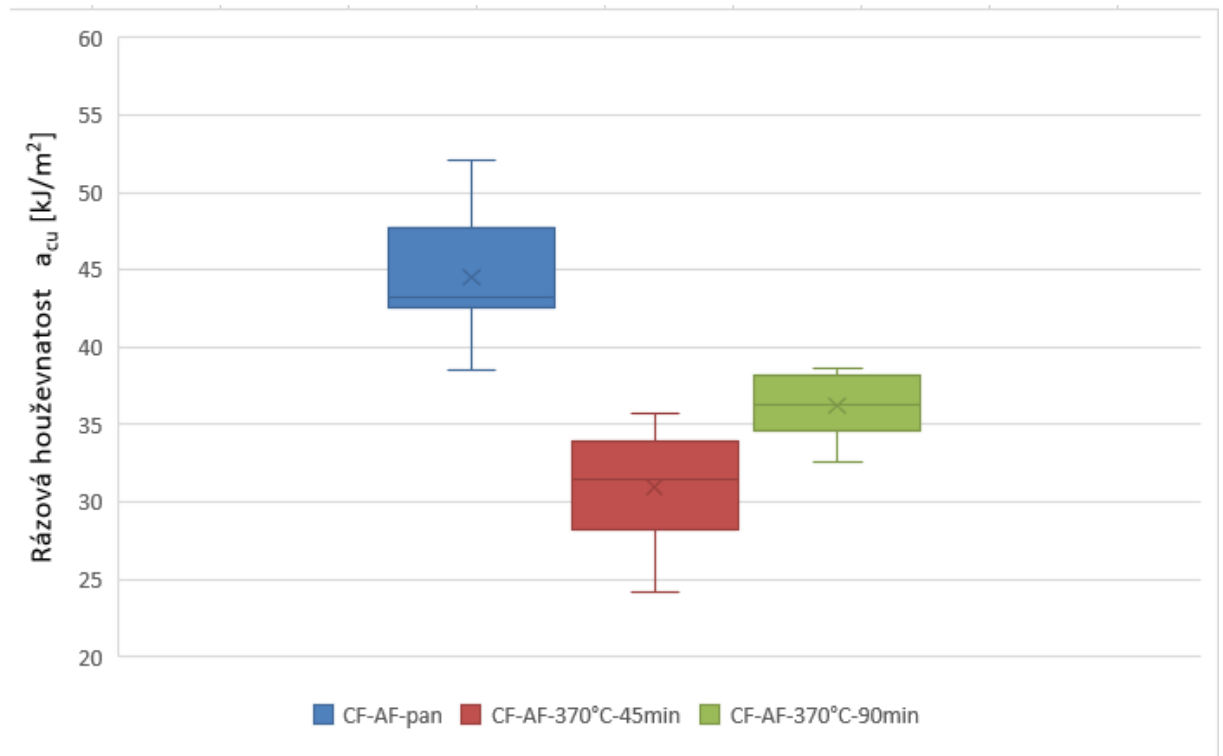
dle teploty recyklace a doby výdrže na těchto teplotách, tedy CF-AF-370°C-45min a CF-AF-370°C-90min.

Při srovnání průměrných hodnot rázové energie pro jednotlivé kompozitní desky.



Obr. 54: Srovnání průměrných hodnot rázové energie pro hybridní kompozitní systém pomocí box-plot diagramů

Při srovnání hodnot rázové houževnosti hybridního kompozitního systému pomocí box-plot diagramů lze s jistotou říct, že nejlepších výsledků dosahoval materiál nezatížený recyklačním cyklem, tedy ten tvořený pouze panenskými vlákny uhlíku a aramidem. S podivem lze ovšem, stejně jako u předešlých zkoušek, konstatovat, že materiál, který byl podroben delší době recyklace, tedy hybridní tkanina recyklovaná při teplotě 370°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 90 minut dosáhla lepších hodnot, než její ekvivalent recyklovaný kratší dobu při stejné teplotě. Tento fakt lze opět nejspíše vysvětlit odstraněním přebytečné matrice aplikované při první ruční laminaci.



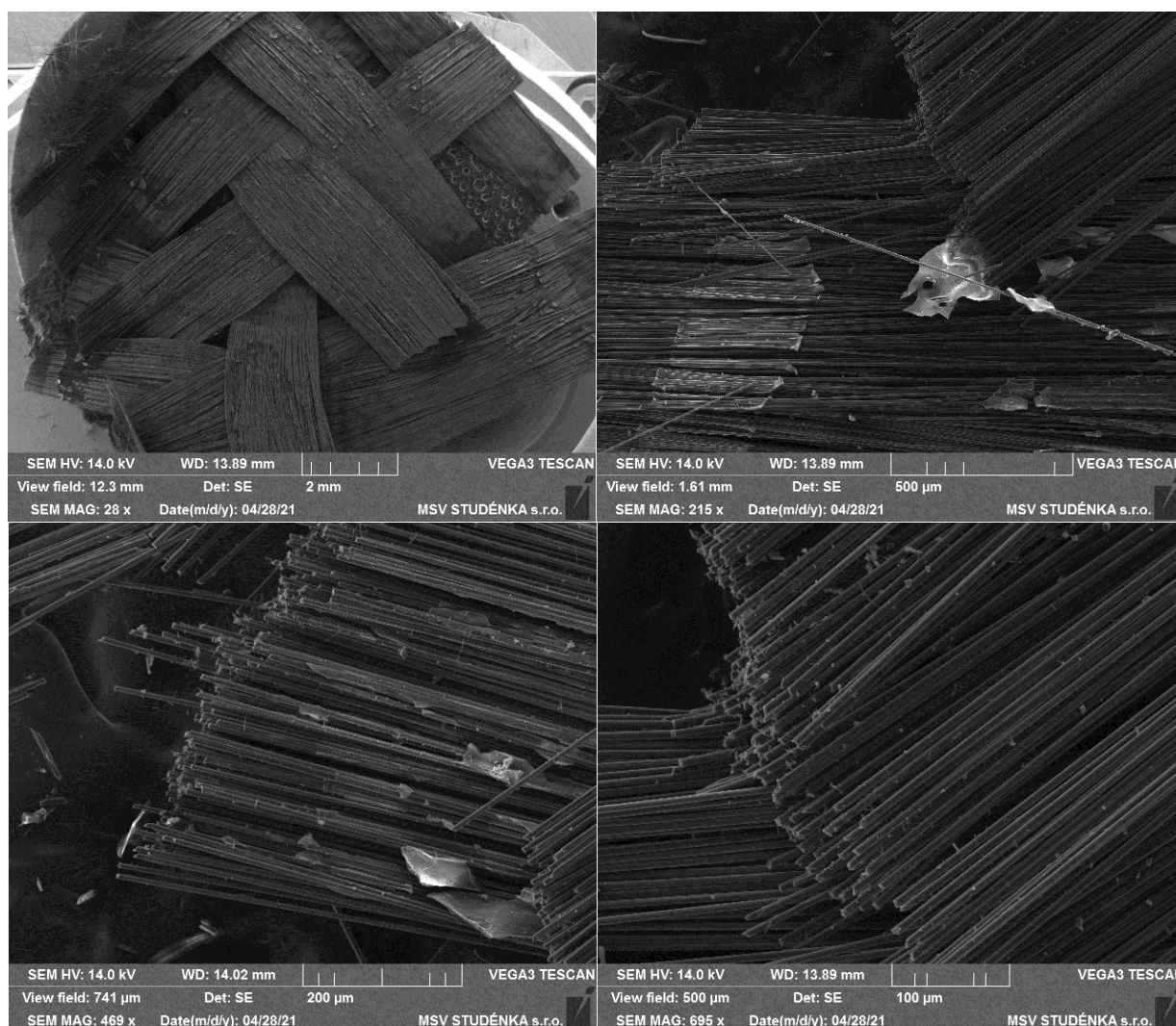
Obr. 55: Srovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti pro hybridní kompozitní systém pomocí box-plot diagramů

10 STRUKTURNÍ ANALÝZA POMOCÍ SEM

V rámci zkoumání stavu desky po proběhlé pyrolýze byly tkaniny, obsažené v recyklovaných deskách, podrobeny strukturní analýze. Experiment byl proveden na skenovacím elektronovém mikroskopu VEGA 3 ve firmě MSV STUDÉNKA s.r.o.

10.1 Analýza uhlíkové tkaniny recyklované při 450°C

Uhlíková tkanina recyklovaná pomocí pyrolýzy při 450°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 30 minut (Obr. 56), vykazovala zbytky epoxidové matrice viditelné pouhým okem. Toto zjištění už jen potvrdily snímky z elektronového mikroskopu. Obrázky tkanin jsou seřazeny dle použitého zvětšení, který je možno pozorovat v dolní části každého snímku. Vlákna držela dobře pospolu, jelikož nebyl odstraněn sizing a vlákna se tak netřepila.

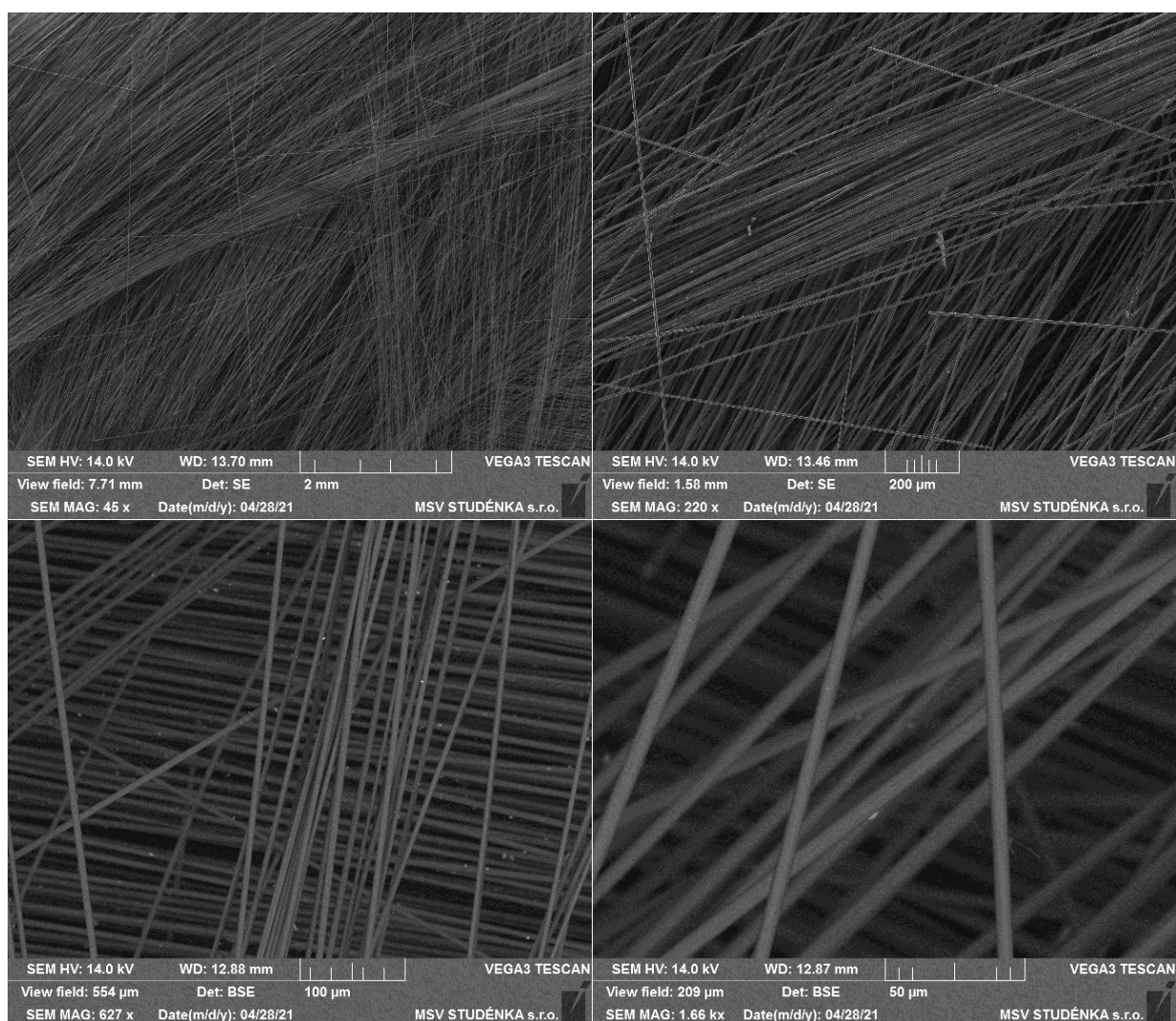


Obr. 56: Snímky SEM uhlíkového kompozitu po proběhlé pyrolýze při 450°C

10.2 Analýza uhlíkové tkaniny recyklované při 550°C

Uhlíková tkanina recyklovaná pomocí pyrolýzy při 550°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 30 minut (Obr. 57) již zbytky epoxidové pryskyřice nevykazovala. Na rozdíl od totožné tkaniny recyklované při 450°C, se podařilo vlivem vyšší teploty dosáhnout k úplnému zplynění matrice, včetně odstranění sizingu, kterým jsou vlákna opatřena již z výroby proto, aby drželi pospolu a nedocházelo k třepení.

Výdrž na teplotě 550°C po dobu 30 minut byla tedy dostatečná k úplnému odstranění matrice. Ideálem by nejspíše bylo použití stejné teploty a nižší doby výdrže na této teplotě, jelikož bylo zjištěno při bližším zkoumání při vysokém přiblížení, lehké zmenšení průměru vláken a tím pádem zhoršení jejich povrchu, které mohlo zapříčinit horší mechanické vlastnosti. Tento jev ovšem nemusí být zapříčiněn pouze delší dobou výdrže a vyskytuje se poměrně často, jelikož hranice mezi správným nastavením procesních podmínek je tenká.

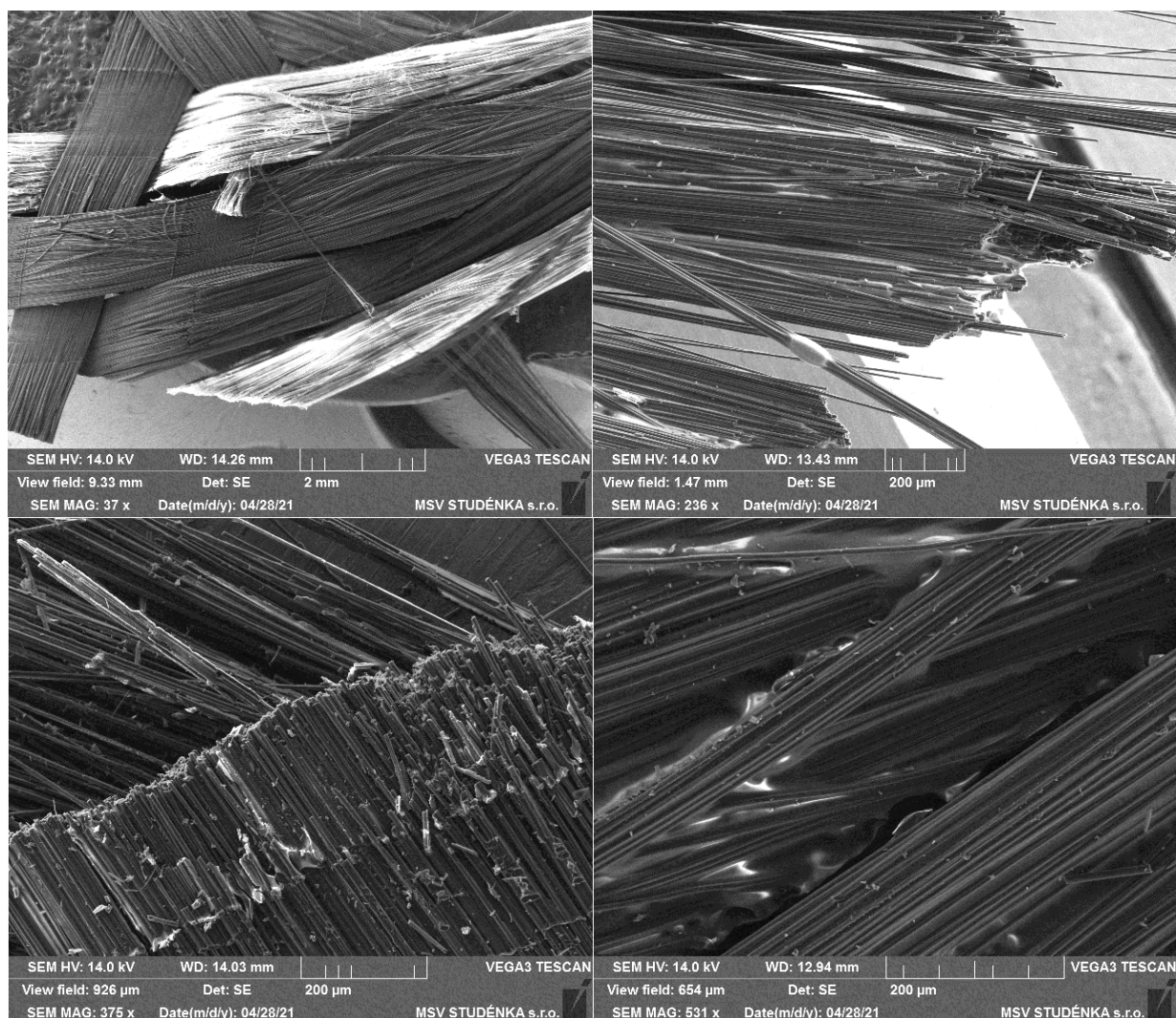


Obr. 57: Snímky SEM uhlíkového kompozitu po proběhlé pyrolýze při 550°C

10.3 Analýza hybridní tkanina recyklované při 370°C s dobou výdrže 45 minut

Hybridní tkanina složená z uhlíku a aramidu recyklovaná pomocí pyrolýzy při 370°C a dobou výdrže na této teplotě po dobu 45 minut (Obr. 58), vykazovala patrné zbytky pryskyřice. To bylo způsobeno vlivem nízké teploty proběhlé pyrolýzy. Ideálem by bylo použití vyšší teploty, ovšem aramid má nízký interval teploty tavení počínající již okolo 400°C. Nebylo proto možné zvolení vyšších teplot s ohledem na budoucí mechanické vlastnosti tkaniny. Proto bylo přistoupeno ke zvolení nižších teplot s delší dobou výdrže.

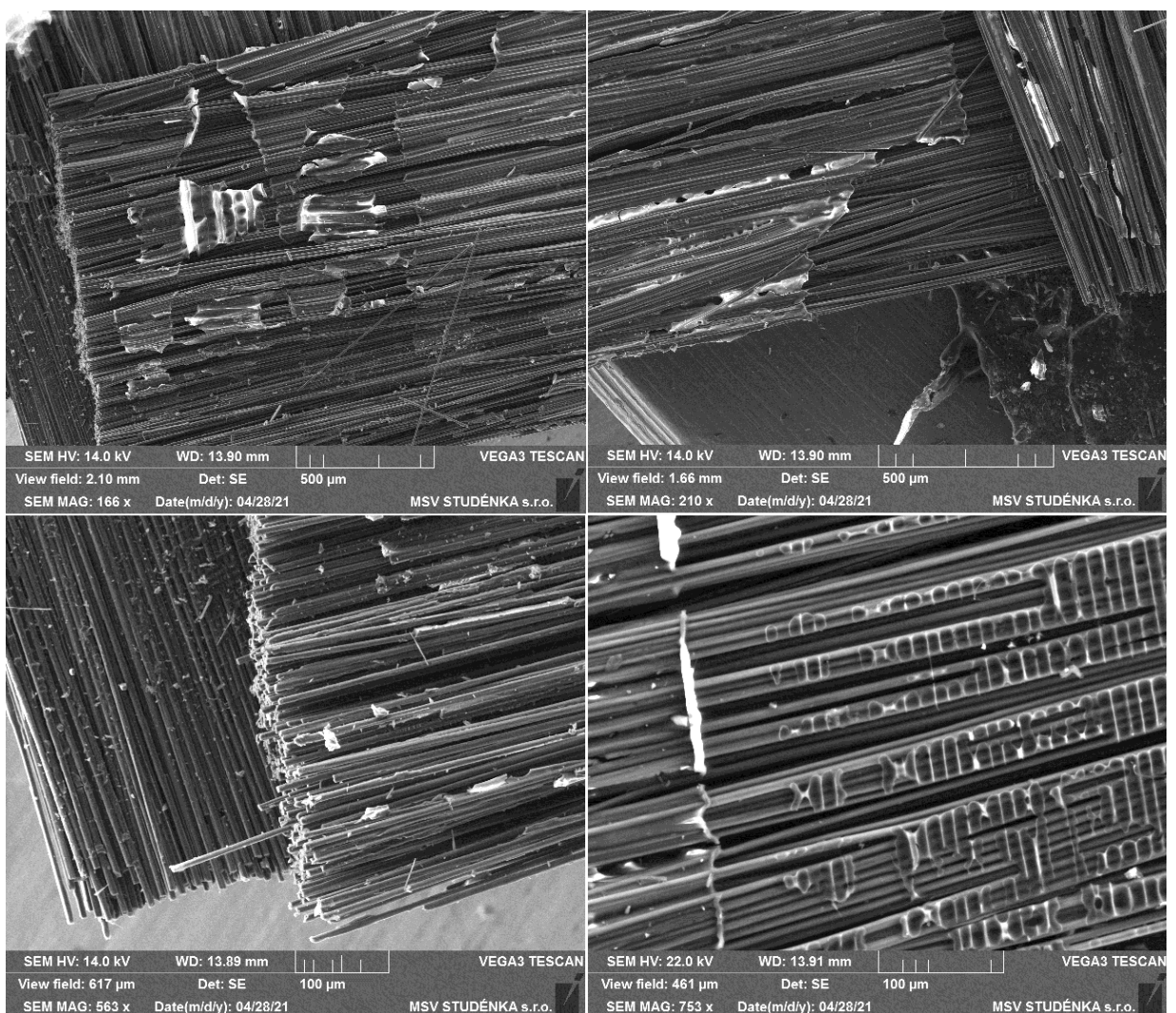
Na snímcích z elektronového mikroskopu je vidět vyšší zůstatek epoxidové pryskyřice s ohledem na vysvětlení z předchozího odstavce. Obrázky tkanin jsou seřazeny dle použitého zvětšení, který je možno pozorovat v dolní části každého snímku.



Obr. 58: Snímky SEM hybridního kompozitu po proběhlé pyrolýze při 370°C a 45 min

10.4 Analýza hybridní tkanina recyklované při 370°C s dobou výdrže 90 minut

Stejná hybridní tkanina jako v předchozím případě byla zatížena pyrolýzou při stejné teplotě, ovšem delší výdrži na této teplotě, a to po dobu 90 minut (Obr. 59). Při zkoumání snímků z elektronového mikroskopu, nejsou příliš patrné rozdíly recyklovaných tkanin. Stejně jako v předchozím případě nedošlo k zplynění matrice v celém objemu a jsou zde stále pozorovatelná vlákna obalená epoxidovou pryskyřicí. Obrázky tkanin jsou seřazeny dle použitého zvětšení, který je možno pozorovat v dolní části každého snímku.



Obr. 59: Snímky SEM hybridního kompozitu po proběhlé pyrolýze při 370°C a 90 min

ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na recyklaci polymerních kompozitů. Teoretická část přibližuje možné způsoby recyklaci těchto kompozitů, zaměřené na moderní trendy, a srovnává jejich ekonomické hledisko se zpětným využitím. Jsou zde vypsány hlavní principy recyklace se zaměřením zejména na uhlíkové kompozity, tedy zástupce nejčastěji recyklovaného kompozitního polymeru.

S ohledem na poznatky, získané při rešeršní práci, bylo v praktické části přistoupeno k vytvoření dvou kompozitních systémů, složených z uhlíkových a hybridních vláken zalaminovaných v epoxidové pryskyřici, které byly následně recyklovány pomocí pyrolýzy. Pro tento účel byly vytvořeny vždy tři laboratorní kompozitní desky od každé tkaniny, vyrobené metodou ruční laminace, z nichž jedna byla ponechána ve stavu prvovýroby, a zbylé dvě byly podrobeny recyklaci dle stanovených procesních podmínek. Tyto podmínky byly stanoveny experimentálně dle mnoha faktorů. U uhlíkových kompozitních desek bylo přistoupeno k provedení pyrolýzy při teplotě 450°C a 550°C s dobou výdrže na této teplotě po dobu 30 minut. Složitější nastala situace při nastavení správných procesních podmínek u hybridního systému. Po ohledání mnoha informačních kanálů nebyla nalezena žádná informace o podobném experimentu nebo snad uvedením recyklace tohoto druhu kompozitu do praxe. Bylo proto nutné přistoupit k čistě experimentálním podmínkám recyklace. Jelikož největší limitující faktor pro provedení pyrolýzy byla teplota tání aramidů, počínající okolo 400°C, bylo přistoupeno k provedení pyrolýzy při 370°C a hybridních desek ponechání na této teplotě po dobu 45 minut a 90 minut.

Proběhlá pyrolýza měla za následek částečné nebo úplné odstranění epoxidové matrice z vláken, které byly poté opět zalisovány metodou ruční laminace se stejným typem epoxidové pryskyřice a podrobeny mechanickým zkouškám, stejně jako totožné desky ponechány ve formě prvovýroby, tedy nezatížené recyklačním cyklem.

Z výsledků tahové zkoušky a zkoušky rázové houževnatosti, kterým byly desky podrobeny, lze usuzovat zhoršení mechanických vlastností v případech desek zatížených recyklačním cyklem, oproti jejich nerecyklovaným ekvivalentům. Tento jev byl naprosto očekávaný a nebyl žádným způsobem překvapující. Zajímavé byly výsledky mechanických zkoušek při srovnání hybridních kompozitních systémů. U těchto zkoušek dosáhl lepších průměrných mechanických vlastností hybridní kompozitní polymer, recyklovaný při 370°C

po dobu 90 minut v porovnání se stejným typem kompozitu, který byl podroben totožné recyklaci, ovšem s dobou výdrže na maximální teplotě pouhých 45 minut. Například v modulu pružnosti měl recyklovaný hybridní kompozit při 370°C s dobou výdrže 45 minut o 25% horší výsledky, než tomu bylo u panenských vláken. Naproti tomu stejný materiál s delší dobou recyklace měl snížený modul pružnosti oproti panenskému vláknu o pouhých 8%. Tento fakt lze přičíst lepšímu odstranění přebytečné matrice po proběhlé pyrolýze, před finálním zalisováním.

V neposlední řadě byly všechny tkaniny, po proběhlé pyrolýze, podrobeny zkoumání pomocí skenovacího elektronového mikroskopu. Při bližším pozorování byly zjištěny zbytky epoxidové matrice u uhlíkového kompozitu recyklovaného při teplotě 450°C. Lepšího výsledku bylo dosaženo při použití vyšší teploty, tedy 550°C. Při této teplotě již došlo k odstranění matrice v celém objemu a takovému nastavení procesních podmínek lze tedy považovat za optimální.

Při zkoumání hybridních tkanin, po proběhlé pyrolýze, byly zjištěny zbytky epoxidové matrice v obou případech hybridních kompozitních desek. Tento fakt je zapříčiněn nízkou teplotou provedené recyklace. V případě recyklace tohoto hybridního systému by nejspíše bylo vhodnější použití jiné recyklační cesty. Například využití chemické recyklace, by pravděpodobně vedlo k uspokojivějšímu odstranění přebytečné matrice, nicméně toto tvrzení je pouze autorova úvaha.

Diplomová práce se zabývá recyklováním dlouhovláknových kompozitů. Současný trend recyklování se ovšem zaměřuje spíše na krátkovláknové, které jsou ve větší míře používány v automobilovém průmyslu. Proto je žádanější kompozitní materiál před recyklací rozmělnit na menší kousky, které se poté také lépe recyklují.

Na závěr je nutno podotknout, že výsledky mohly být zkresleny nedokonalostí provedené ruční laminace. Tento způsob výroby polymerních kompozitů patří mezi nejjednodušší a mohl být zatížen mnoha vadami plynoucími z podstaty samotného procesu, spolu s nedostatečnými zkušenostmi při provádění ruční laminace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN iso8070805684.
- [3] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 156 s. ISBN 80-704-3273-X
- [4] EZRIN, Myer. Plastics Failure Guide [online]. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co., 2013 [cit. 2021-02-13]. ISBN 978-3-446-41684-0. Dostupné z: doi:10.3139/9783446428829
- [5] Recyklace plastového odpadu - Časopis Vesmír. [online]. Copyright © VESMÍR, spol. s [cit. 26.01.2021]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2019/cislo-12/recyklace-plastoveho-odpadu.html>
- [6] JOB, Stella, Paul MATINVEGA a . *Composites Recycling: Where are we now?* [online]. 7.7.2016 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Recycling%20Report%202016.pdf>
- [7] YANG, Yongxiang, Rob BOOM, Brijan IRION, Derk-Jan VAN HEERDEN, Pieter KUIPER a Hans DE WIT. Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2012, **51**, 53-68 [cit. 2021-02-16]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2011.09.007
- [8] GOODSHIP, Vanessa. *Management, recycling and reuse of waste composites*. Elsevier, 2009. ISBN 9781845694623.
- [9] ABDOU, T.R., A.B. BOTELHO JUNIOR, D.C.R. ESPINOSA a J.A.S. TENÓRIO. Recycling of polymeric composites from industrial waste by pyrolysis: Deep evaluation for carbon fibers reuse. *Waste Management* [online]. 2021, **120**, 1-9 [cit. 2021-02-14]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2020.11.010
- [10] ZHANG, Jin, Venkata S. CHEVALI, Hao WANG a Chun-Hui WANG. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B:*

- Engineering* [online]. 2020, **193** [cit. 2021-02-13]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2020.108053
- [11] UTEKAR, Shubham, Suriya V K, Neha MORE a Adarsh RAO. Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites – Driving force, challenges and methods. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2021, 207 [cit. 2021-02-14]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2020.108596
- [12] LÓPEZ, Félix A., Olga RODRÍGUEZ, Francisco José ALGUACIL, Irene GARCÍA-DÍAZ, Teresa A. CENTENO, José Luis GARCÍA-FIERRO a Carlos GONZÁLEZ. Recovery of carbon fibres by the thermolysis and gasification of waste prepreg. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2013, **104**, 675-683 [cit. 2021-02-15]. ISSN 01652370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2013.04.012
- [13] YANG, Jie, Jie LIU, Wenbin LIU, Jun WANG a Tao TANG. Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen–oxygen atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2015, **112**, 253-261 [cit. 2021-02-15]. ISSN 01652370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2015.01.017
- [14] PIETROLUONGO, Mario, Elisa PADOVANO, Alberto FRACHE a Claudio BADINI. Mechanical recycling of an end-of-life automotive composite component. *Sustainable Materials and Technologies* [online]. 2020, **23** [cit. 2021-02-15]. ISSN 22149937. Dostupné z: doi:10.1016/j.susmat.2019.e00143
- [15] MENG, F., J. MCKECHNIE, T.A. TURNER a S.J. PICKERING. Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2017, **100**, 206-214 [cit. 2021-02-15]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2017.05.008
- [16] JIANG, G., S.J. PICKERING, G.S. WALKER, K.H. WONG a C.D. RUDD. Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed. *Applied Surface Science* [online]. 2008, **254**(9), 2588-2593 [cit. 2021-02-16]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2007.09.105
- [17] MORIN, Christelle, Anne LOPPINET-SERANI, François CANSSELL a Cyril AYMONIER. Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the

- art. *The Journal of Supercritical Fluids* [online]. 2012, **66**, 232-240 [cit. 2021-02-16]. ISSN 08968446. Dostupné z: doi:10.1016/j.supflu.2012.02.001
- [18] RYBICKA, Justyna, Ashutosh TIWARI a Gary A. LEEKE. Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **112**, 1001-1012 [cit. 2021-02-17]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.104
- [19] UTEKAR, Shubham, Suriya V K, Neha MORE a Adarsh RAO. Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites – Driving force, challenges and methods. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2021, **207** [cit. 2021-02-17]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2020.108596
- [20] PIMENTA, Soraia a Silvestre T. PINHO. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management* [online]. 2011, **31**(2), 378-392 [cit. 2021-02-18]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2010.09.019
- [21] KOSIOR, Edward, Jonathan MITCHELL a Irene CRESCENZI. Plastics Recycling. HARRISON, R M a R E HESTER, ed. *Plastics and the Environment* [online]. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2018, 2018, s. 156-176 [cit. 2021-02-22]. Issues in Environmental Science and Technology. ISBN 978-1-78801-241-6. Dostupné z: doi:10.1039/9781788013314-00156
- [22] Přehled dosahovaných výsledků | EKO-KOM. *Systém sběru a recyklace obalových odpadů* | EKO-KOM [online]. Copyright © 2011 [cit. 24.03.2021]. Dostupné z: <https://www.ekokom.cz/cz/ostatni/o-spolecnosti/system-eko-kom/vysledky-systemu/vyrocní-shrnutí>
- [23] PIMENTA, Soraia a Silvestre T. PINHO. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management* [online]. 2011, **31**(2), 378-392 [cit. 2021-03-25]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2010.09.019
- [24] MENG, Fanran, Jon MCKECHNIE a Steve J. PICKERING. An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2018, **109**, 207-220 [cit. 2021-03-25]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2018.03.011

- [25] VO DONG, Phuong Anh, Catherine AZZARO-PANTEL a Anne-Laure CADENE. Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2018, **133**, 63-75 [cit. 2021-03-25]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2018.01.024
- [26] JOB, Stella. Recycling composites commercially. *Reinforced Plastics* [online]. 2014, **58(5)**, 32-38 [cit. 2021-03-25]. ISSN 00343617. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-3617(14)70213-9
- [27] BLEDZKI, Andrzej K., Holger SEIDLITZ, Krzysztof GORACY, Magdalena URBANIAK a Janina J. RÖSCH. Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composite Polymers—Review—Part 1: Volume of Production, Recycling Technologies, Legislative Aspects. *Polymers (20734360)* [online]. 2021, **13(2)**, 300-300 [cit. 2021-03-25]. ISSN 20734360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13020300
- [28] BHATTACHARJEE, Sujal a Dilpreet S BAJWA. Degradation in the mechanical and thermo-mechanical properties of natural fiber filled polymer composites due to recycling. *Construction* [online]. 2018, **172**, 1-9 [cit. 2021-03-25]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.010
- [29] MLČŮCH, Filip. *Hodnocení vlastností a mikrostruktury kompozitů vyrobených z recyklátu z uhlíkových vláken*. Ostrava, 2019. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10084/136543>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Košťál Pavol.
- [30] *Co se děje s odpadem: Dotříd'ovací linka v Lišově u Českých Budějovic* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <http://www.jihocesketrideni.cz/co-se-deje-s-odpadem?oid=3152154&nid=10939&action=detail&id=1>
- [31] TANG, Jun, Yentl SWOLFS, Marco L. LONGANA, HaNa YU, Michael R. WISNOM, Stepan V. LOMOV a Larissa GORBATIKH. Hybrid composites of aligned discontinuous carbon fibers and self-reinforced polypropylene under tensile loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2019, **123**, 97-107 [cit. 2021-03-25]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2019.05.003

- [32] MASON, Karen. *Recycled Carbon Fiber on the Rails* [online]. 2019 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/recycled-carbon-on-the-rails>
- [33] NICKELS, Liz. Smooth sailing with recycled fibers. *Reinforced Plastics* [online]. 2019, **63**(6), 322-325 [cit. 2021-03-27]. ISSN 00343617. Dostupné z: doi:10.1016/j.repl.2019.10.002
- [34] TAPPER, Rhys J., Marco L. LONGANA, Hana YU, Ian HAMERTON a Kevin D. POTTER. Development of a closed-loop recycling process for discontinuous carbon fibre polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, **146**, 222-231 [cit. 2021-03-25]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.03.048
- [35] RAVELING, Jann. When wind turbines retire: Wind energy. *Bremeninvest* [online]. 2018 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.wfb-bremen.de/en/page/bremen-invest/recycling-glass-fibre-polymers-nehlsen>
- [36] BLEDZKI, Andrzej K., Holger SEIDLITZ, Jonas KRENZ, Krzysztof GORACY, Magdalena URBANIAK a Janina J. RÖSCH. Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composite Polymers—Review—Part 2: Recovery and Application of Recycled Carbon Fibers. *Polymers (20734360)* [online]. 2020, **12**(12), 3003-3003 [cit. 2021-03-25]. ISSN 20734360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12123003
- [37] Laminační pryskyřice L 285 a tužidla MGS 285: Technické listy, návod k použití. *Havel COMPOSITES* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/8/3801ead7cb8f67913c1b13e44001bf82c9015a49.pdf>
- [38] LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konštrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
- [39] SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 97818426549

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

\$	Americký dolar (měna)
€	Euro (měna)
BMC	Bulk Moulding Compound
CFRP	kompozitní materiál vyztužený uhlíkovými vlákny,
CO ₂	oxid uhličitý
ČR	Česká republika
ČSN	česká technická norma
EDS	Elektronově disperzní spektrometrie
EU	Evropská unie
GFRP	kompozitní materiál vyztužený skelnými vlákny
HDPE	Vysokohustotní polyethylen
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
LDPE	Nízkohustotní polyethylen
PA66	Polyamid 66
PET	Polyethylentereftalát
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
SEM	Zkoumání elektronovým mikroskopem
SMC	kompozitní materiál složený z termosetické pryskyřice
SMC	Sheet Moulding Compound

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Synergický efekt [2]	13
Obr. 2: Rozdělení kompozitů dle výztuže [3].....	14
Obr. 3: Polymerní odpad po vytřídění, před expedicí pro další zpracování [30].....	17
Obr. 4: Skládka polymerního odpadu z uhlíkových vláken [26].....	18
Obr. 5: GFRP materiál před spálením v cementářských pecích [35]	20
Obr. 6: Recyklovaná uhlíková vlákna pomocí pyrolýzy [7].....	21
Obr. 7: Graf dosavadní a predikované poptávky po kompozitních polymerech CFRP [11]	22
Obr. 8: Ilustrační schéma výroby zkušebních tělísek mechanické recyklace [14]	24
Obr. 9: Schéma pyrolýzy kompozitního odpadu – CFRP [8].....	26
Obr. 10: Křivka hmotnostního úbytku uhlíkových vláken při zvyšující se teplotě v inertní atmosféře [9].....	28
Obr. 11: Snímek z SEM, (a) - panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 300°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 300°C po dobu 2 hodin [9].....	29
Obr. 12: Snímek z SEM, (a) – panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 450°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 450°C po dobu 2 hodin [9].....	30
Obr. 13: Snímek z SEM, (a) – panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 550°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 550°C po dobu 2 hodin [9].....	31
Obr. 14: Snímek z SEM, (a) – panenské vlákno, (b) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 700°C po dobu 1 hodiny, (c) - získané uhlíkové vlákno po pyrolýze při 700°C po dobu 2 hodin [9].....	32
Obr. 15: Schéma fluidního lože [15]	34
Obr. 16: Schéma procesu solvolýzy při nízké teplotě [17].....	35
Obr. 17: Schéma elektrochemického recyklačního zařízení [10].....	36
Obr. 18: Graf spotřeby energie při různých možnostech recyklace [19].....	38
Obr. 19: Mechanické vlastnosti recyklovaných vláken (zelená škála) oproti panenským vláknům (černá škála), (a) – Youngův modul, (b) – Pevnost v tahu, (c) – Mezifázová pevnost ve smyku s epoxidovou pryskyřicí [20]	38
Obr. 20: Pyrolýzní linka společnosti ELG Carbon Fibre [26].....	41
Obr. 21: C-sloupek v automobilu BMW řady 7, vyztužený recyklovaným uhlíkovým vláknem vyrobený metodou SMC [28]	43
Obr. 22: Recyklovaná uhlíková vlákna určená na výrobu střechy vozu BMW i3 [28].....	44
Obr. 23: Podvozek vagonu z recyklovaného uhlíkového vlákna [32].....	45
Obr. 24: Netkaná rohož z recyklovaných uhlíkových vláken společnosti ELG Carbon [32]	46

Obr. 25: Separace povrchu formy	50
Obr. 26: Uhlíková tkanina	51
Obr. 27: Hybridní tkanina aramid-uhlík	52
Obr. 28: Ruční laminace uhlíkové kompozitní desky	54
Obr. 29: Ruční laminace hybridní kompozitní desky	54
Obr. 30: Hybridní kompozitní deska aramid-uhlík opatřena odtrhovou tkaninou	55
Obr. 31: Pyrolýzní komora ve firmě MSV Studénka s.r.o.	57
Obr. 32: Kompozitní uhlíkové desky před recyklačním procesem	58
Obr. 33: Hybridní kompozitní desky před procesem recyklace	58
Obr. 34: Graf průběhů teplot při recyklaci u jednotlivých desek (CF - uhlíková kompozitní deska, AF-CF - hybridní deska aramid-uhlík)	59
Obr. 35: Uhlíková kompozitní deska zavěšená v pyrolýzní komoře	60
Obr. 36: Recyklované uhlíkové vlákno při teplotě 450°C po dobu 30 minut	61
Obr. 37: Recyklované uhlíkové vlákno při teplotě 550°C po dobu 30 minut	62
Obr. 38: Hybridní tkanina aramid-uhlík po provedené recyklaci při 370°C a setrvání na této teplotě po dobu 45 minut.	63
Obr. 39: Hybridní tkanina aramid-uhlík po provedené recyklaci při 370°C a setrvání na této teplotě po dobu 90 minut.	64
Obr. 40: Zkušební tělísko při provádění tahové zkoušky	65
Obr. 41: Pracovní diagram tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z panenských vláken.	67
Obr. 42: Pracovní diagram tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C	69
Obr. 43: Pracovní diagram tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C	71
Obr. 44: Pracovní diagram tahové zkoušky pro hybridní kompozit z panenských vláken	73
Obr. 45: Pracovní diagram tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 45 minut.....	75
Obr. 46: Pracovní diagram tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 90 minut.....	77
Obr. 47: Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti u jednotlivých uhlíkových kompozitních desek	78
Obr. 48: Srovnání průměrných hodnot napětí na mezi pevnosti u jednotlivých uhlíkových kompozitních desek	79
Obr. 49: Srovnání průměrných hodnot modulu pružnosti u jednotlivých hybridních kompozitních desek	80
Obr. 50: Srovnání průměrných hodnot napětí na mezi pevnosti u jednotlivých uhlíkových kompozitních desek	80
Obr. 51: Charpy kladivo pro testování rázové houževnatosti.....	81

Obr. 52: Srovnání průměrných hodnot rázové energie pro uhlíkový kompozitní systém pomocí box-plot diagramů.....	86
Obr. 53: Srovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti pro uhlíkový kompozitní systém pomocí box-plot diagramů.....	87
Obr. 54: Srovnání průměrných hodnot rázové energie pro hybridní kompozitní systém pomocí box-plot diagramů.....	88
Obr. 55: Srovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti pro hybridní kompozitní systém pomocí box-plot diagramů.....	89
Obr. 56: Snímky SEM uhlíkového kompozitu po proběhlé pyrolýze při 450°C.....	90
Obr. 57: Snímky SEM uhlíkového kompozitu po proběhlé pyrolýze při 550°C.....	91
Obr. 58: Snímky SEM hybridního kompozitu po proběhlé pyrolýze při 370°C a 45 min ..	92
Obr. 59: Snímky SEM hybridního kompozitu po proběhlé pyrolýze při 370°C a 90 min ..	93

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Výsledek tahové zkoušky dle ISO 527 recyklovaného kompozitního materiálu [14]	24
Tab. 2: Výsledek tahové zkoušky dle ISO 527 recyklovaného kompozitního materiálu [14]	24
Tab. 3: Výsledek ohybové zkoušky dle ISO 178 recyklovaného kompozitního materiálu [14].....	25
Tab. 4: Porovnání pevnosti s tahu recyklovaných a panenských vláken při různých technologiích recyklace [19].....	37
Tab. 5: Současné společnosti zabývající se recyklací uhlíkových kompozitů [10].....	40
Tab. 6: Hodnoty hustoty a viskozity zvolené matrice [37].....	53
Tab. 7: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z panenských vláken	66
Tab. 8: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C.....	68
Tab. 9: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C.....	70
Tab. 10: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro hybridní kompozit z panenských vláken	72
Tab. 11: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 45 min.....	74
Tab. 12: Naměřené a vyhodnocené hodnoty tahové zkoušky pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C po dobu 90 min.....	76
Tab. 13: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z panenských vláken	82
Tab. 14: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 450°C.....	83
Tab. 15: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro uhlíkový kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 550°C.....	83
Tab. 16: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit z nerecyklovaných vláken.....	84
Tab. 17: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 45 min.	85
Tab. 18: Naměřené a vyhodnocené hodnoty zkoušky rázem v ohybu pro hybridní kompozit z recyklovaných vláken při teplotě 370°C a dobou výdrže 90 min.	85

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: TECHNICKÝ LIST UHLÍKOVÉ TKANINY

Příloha P II: TECHNICKÝ LIST HYBRIDNÍ TKANINY

Příloha P III: TABULKA MÍCHACÍCH POMĚRŮ EPOXIDŮ HAVEL

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST UHLÍKOVÉ TKANINY



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0174101**

Material Code: AKS000201
Material Designation: **CCA 200 T - 100 Industry**
Manufacturing Date: 28.8.2015
Article no.: CA0057-641-0001
Test roll No.: C0174101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: AKS 3K 200 tex
Kind of material - weft: AKS 3K 200 tex
Compatibility: epoxid, vinylester
Binding: twill

Results of specific tests according to Specification No.: AKS000201						
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	490	510	* 492	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	490	510	* 500	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,38	0,35	0,41	* 0,38	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	200	190	210	204	DIN EN 12127
Width	cm	100	99	101	* 100,2	DIN EN 1773
Density AKS 3K 200 tex	g/cm3	1,78			*	

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C01741



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST HYBRIDNÍ TKANINY



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0060101**

Material Code: TOR003201
Material Designation: **CA 164 P - 100**
Manufacturing Date: 24.5.2014
Article no.: CA0032-641-0001
Test roll No.: C0060101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: TOR 3K 200tex+Twaron 2200 121tex (2:1)
Kind of material - weft: TOR 3K 200tex+Twaron 2200 121tex (1:2)
Compatibility: Epoxi resin
Binding: plain
Kind of material: hybrid fabric

Results of specific tests according to Specification No.:		TOR003201				
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp1	n/m	334	331	339	* 340	DIN EN 1049-2
Sett of warp2	n/m	166	164	171	* 170	DIN EN 1049-2
Sett of weft1	n/m	166	164	171	* 170	DIN EN 1049-2
Sett of weft2	n/m	334	331	339	* 340	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,32	0,3	0,35	* 0.31	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	164	159	174	168	DIN EN 12127
Width	cm	100	99,5	101	* 100.1	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				
Density TWA 2200 121 tex	g/cm3	1,44				
* orientation value						
Corresponds to the batch no.: C00601						



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P III: TABULKA MÍCHACÍCH POMĚRŮ EPOXIDŮ HAVEL

Tabulka epoxidových systémů



Název pryskyřice	Název tužidla	Poměr (kg)	Zpracovatelnost	Poznámka	Použití např.
Epoxidová pryskyřice LH 160, LH 210, LH 260, LH 287, LH 288, LH 289, LH 385,	H 10	100:45	25 - 35 min	UV + u LH 210	Akvária, surfy, jílce
	H 10A	100:50	30 - 40 min	Alternativa k H10	
	H 10B	100:47	60 - 100 min	Alternativa k H10	
	H 25	100:25	100 min	Alternativa k P11	
	H 145	100:33	50 min	Také pro LH 145	Podlahy LH 287
	H 146	100:30	50 - 60 min		Pohledový carbon
	H 147	100:25	90 min		
	H 282	100:23	40 - 50 min	Jen pro LH 288	
	H 285	100:40	50 min	Jako 285 MGS	Kvalitní lamináty, sportovní potřeby, lodě
	H 286	100:40	120 min	Jako 286 MGS	
	H 287	100:40	240 min	Jako 287 MGS	
	H 289	100:33	20 - 30 min	Jen pro LH 289	
	H 505	100:27	20 - 25 min	Také pro LH 130	Kulisy, přílby..
	H 507	100:28	35 - 40 min		Trubky LH 260
	H 507A	100:19	30 - 40 min		
	H 508	100:28	40 - 60 min		
	H 509	100:26	70 - 80 min		
	H 512	100:23	150 - 180 min		Infuze LH 288
	H 513	100:22	150 - 180 min		
	H 533	100:35	10 - 15 min		
	H 534	100:35	20 - 25 min		Menší díly, na dřevo
	H 535	100:35	25 - 30 min		
	H 536	100:35	50 - 70 min		Chodníčky LH 289
	H 538	100:35	60 - 80 min		
	T 600	100:35	více než 5 hod		Bezbarvý produkt
	MGS 133	100:35	10 - 15 min		Vhodné také pro LH 130, LH 145, LH 1000, L 285 MGS, L 135 MGS, L 160 MGS
	MGS 134	100:35	20 min		
	MGS 135	100:35	25 - 30 min		
	MGS 136	100:35	1 - 2 hod		
	MGS 137	100:35	5 - 6 hod		
	MGS 138	100:35	10 hod		
	MGS 285	100:40	50 min		
	MGS 286	100:40	120 min		
MGS 287	100:40	240 min			
MGS 500	100:40	15 - 25 min			
MGS 501	100:40	20 - 30 min		Letecké díly	
MGS 502	100:40	45 - 60 min			
LH 202 licí	H 202	100:70	4 - 6 hod	Licí systémy	Logoprint
LH 204 licí	H 204	100:35	2 hod		
LH 206C	H 206C	100:40	2 hod		
LH 330	H 330	100:40	60 - 80 min		Na polystyren
Epoxid C	Tužidlo C	100:60	50 min		Palivové nádrže
Epoxid L	Tužidlo L	100:40	40 min		
Epovill A	T 111	100:74	prepreg	Vytvrzuje od 80°C	TO do 160°C
LS pro RTM	LS pro RTM	25:25:1	více než 8 hod		TO do 180°C