

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Problematika adheze u kompozitů s polymerní matricí

Autor: Bc. Tomáš Hájek

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

Praha 2016

Zadání

Prohlášení

Prohlašuji, že má vypracovaná diplomová práce je mojí prací a je vypracována samostatně. Pro mou práci jsem použil pouze podklady uvedené v seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucí práce Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za ochotu při konzultacích, za půjčení materiálů a za cenné rady, které byly pro mou práci velkým přínosem. Také bych rád poděkoval panu Václavu Nelibovi a Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D., za ochotu a pomoc při výrobě formy pro zkušební vzorky. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Vaněčkovi za příležitost pořídit několik snímků na digitálním mikroskopu VHX – 5000 od firmy Keyence. Nakonec bych také rád poděkoval své rodině za podporu při mém studiu.

Anotace

Vysoká škola: České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta Strojní

Ústav: Materiálového Inženýrství

Vedoucí ústavu: Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Téma diplomové práce: Problematika adheze u kompozitů s polymerní matricí

Akademický rok: 2015/2016

Autor: Bc. Tomáš Hájek

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

Klíčová slova: Kompozity, adheze, přírodní vlákna, polymerní matrice.

Abstrakt: Tato práce se zabývá studiem adheze přírodních vláken a polyetylenové matrice v základním stavu a plazmově modifikovaném stavu. Předmětem práce je vyrobit zkušební vzorky, které budou zkoumány a vyhodnocovány. Cílem je stanovit, v jaké kombinaci použitých vláken a stavu matrice bylo dosaženo lepší adheze. V závěru práce jsou shrnuty a diskutovány výsledky, s ohledem na zlepšení a další možnosti výzkumu adheze.

Annotation

University: Czech Technical University in Prague,

Faculty of Mechanical Engineering

Department: Department of Materials Engineering

Head of the Department: Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Theme: Methods of adhering matrix and reinforcement in plastic composites

Academic year: 2015/2016

Author: Bc. Tomáš Hájek

Supervisor: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

Keywords: Composites, adhesion, natural fibre, polymer matrix.

Abstract: This thesis deals with the study of adhesion of natural fibers and polyethylene matrix in basic condition and plasma modified condition. The object is to manufacture a test samples, which will be analyzed and evaluated. The goal is to determine, in which combination of the fibers and the condition of matrix was achieved a better adhesion. In the conclusion are the results summarized and discussed with regard to improvement and further research possibilities of adhesion.

Obsah

I.	Úvod.....	1
II.	Teoretická část	2
1.	Kompozitní materiály.....	2
1.1.	Matrice.....	4
1.2.	Výztuže.....	7
1.3.	Mezifáze	17
2.	Adheze v kompozitech.....	18
2.1.	Mechanické zaklínění.....	18
2.2.	Fyzikální působení.....	19
2.3.	Chemické působení	22
3.	Měření adheze v kompozitech	23
3.1.	Přímé měření adheze	23
3.2.	Porovnávací měření adheze.....	24
3.3.	Měření adheze přímo na kompozitech	25
4.	Modifikace pro zlepšení adheze.....	28
4.1.	Modifikace skleněných vláken	28
4.2.	Modifikace uhlíkových vláken.....	29
4.3.	Modifikace přírodních vláken	29
4.4.	Plazmová modifikace vláken.....	32
4.5.	Plazmová modifikace polymerní matrice	33
4.6.	Modifikace polymerní matrice roubováním.....	34
III.	Experimentální část.....	36
5.	Popis a cíl experimentální části.....	36
6.	Použité materiály.....	36
6.1.	Matrice.....	36
6.2.	Plnivo.....	38
6.3.	Označování vzorků	40
7.	Návrh a výroba přípravku	41
7.1.	Návrh přípravku.....	41
7.2.	Materiál přípravku	42

7.3.	Výroba přípravku.....	43
8.	Výroba zkušebních vzorků.....	44
8.1.	Příprava formy.....	44
8.2.	Sestavení a plnění formy	44
8.3.	Postup plnění formy s výztuží	46
9.	Testování vyrobených vzorků	46
9.1.	Tahová zkouška	46
9.2.	Vytrhávací (pull-out) test	54
9.3.	Měření hustoty a navlhavosti vzorků	55
9.4.	DSC zkouška	57
10.	Vyhodnocování lomové plochy	61
10.1.	Stereomikroskopie.....	61
10.2.	Elektronová mikroskopie.....	70
10.3.	Digitální mikroskopie.....	73
IV.	Závěr a diskuze	78
V.	Seznam použité literatury	81
VI.	Seznam použitých zkratk	84
	Zkratky materiálů.....	84
	Chemické vzorce.....	85
	Veličiny	87
	Označení vzorků	88
VII.	Slovníček používaných pojmů.....	90
VIII.	Přílohy.....	92
	Naměřené hmotnosti drcených ořechových skořápek	92
	Obrábění v softwaru PowerMill	92
	Naměřené hodnoty vyrobených vzorků	94
	Diagramy tahové zkoušky	98
	Porovnání vzorků bez plniva	98
	Porovnání vzorků s kokosovými vlákny.....	98
	Porovnání vzorků plněných drcenými ořechovými skořápkami	99

Porovnání vzorků plněných bavlněnými vlákny	99
Porovnání vzorků s přírodními plnivými a jednotlivými stavy matrice	100
Porovnání ostatních vzorků	101

I. Úvod

Cílem této práce je výzkum nových možností v oblasti modifikace povrchu vláken (výztuže), či matrice (pojiva) v určitých kompozitních materiálech a vliv těchto úprav na výsledné mechanické vlastnosti daného kompozitu. U kompozitních materiálů je nejslabším místem rozhraní pojiva a výztuže (spoj). Toto místo je proto předmětem probíhajících výzkumů, za účelem zvýšení jejich soudržnosti a zlepšení tak výsledných vlastností kompozitu.

Tato práce je rozdělena na dvě části, kde jsou v teoretické části stručně a obecně popsány kompozitní materiály, jako perspektivní materiály současné doby. Jsou zde rozebrány jednotlivé složky kompozitních materiálů, tedy matrice a výztuže, které se v současné době používají. Uvedena je zde dále problematika adheze v kompozitech, metody jejího měření a možnosti zlepšení pomocí vhodných modifikací vláken či matrice.

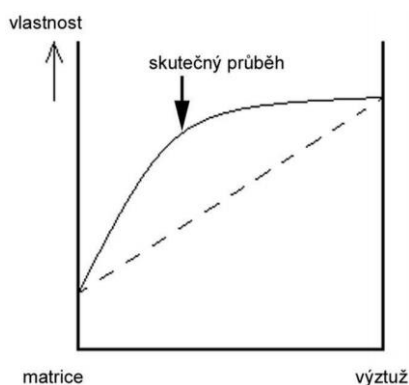
Druhá část práce je věnována experimentu, ve kterém je popsán návrh a výroba přípravku pro výrobu zkušebních vzorků, výroba zkušebních vzorků, zkouška mechanických a termických vlastností vyrobených vzorků, vyhodnocení naměřených dat a zdůvodnění zjištěných výsledků. Zkoušeným materiálem byl kompozit složený z přírodních plniv (drcené ořechové skořápky, kokosová, bavlněná a banánová vlákna) a polyetylenové matrice, která byla použita v základním stavu a plazmově modifikovaném stavu. Cílem experimentální části bylo stanovit, v jaké kombinaci použitého plniva a stavu matrice bylo dosaženo příznivější adheze (zda plazmová modifikace matrice vedla ke zlepšení adheze).

II. Teoretická část

1. Kompozitní materiály

Kompozitní materiály patří v současné době mezi perspektivní materiály se širokou škálou užití. Na rozdíl od jiných, již dokonale vědecky popsanych a známých materiálů, skýtají kompozity stále veliký prostor pro výzkum, neboť jejich potenciál nebyl doposud plně využit. Některé druhy těchto materiálů již úspěšně nahrazují dříve používané méně efektivní materiály a je pravděpodobné, že tento vývoj bude pokračovat.

Kompozitní materiál je obecně složen ze dvou a více chemicky rozdílných složek (fází). Základní složka materiálu je tvořena maticí, která zastává funkci pojiva a ovlivňuje houževnatost výsledného materiálu. V této matici jsou s určitou pravidelností nebo náhodně rozmístěna vlákna nebo částice odlišného materiálu (výztuže). Tato složka poskytuje materiálu své nejlepší mechanické vlastnosti, kterými bývá obvykle tvrdost, či pevnost. Výhodou kompozitních materiálů je tedy možnost kombinace nejlepších vlastností obou složek. Dosahuje se tak synergického efektu (obr. 1), při němž jsou kombinovány pozitivní vlastnosti jednotlivých složek a získává se tak kompozitní materiál s lepšími vlastnostmi, než mají jeho jednotlivé složky samostatně. Při přípravě kompozitních materiálů je pravidlem snaha o dosažení co nejsilnějšího synergického efektu, zejména u nejdůležitějších vlastností.

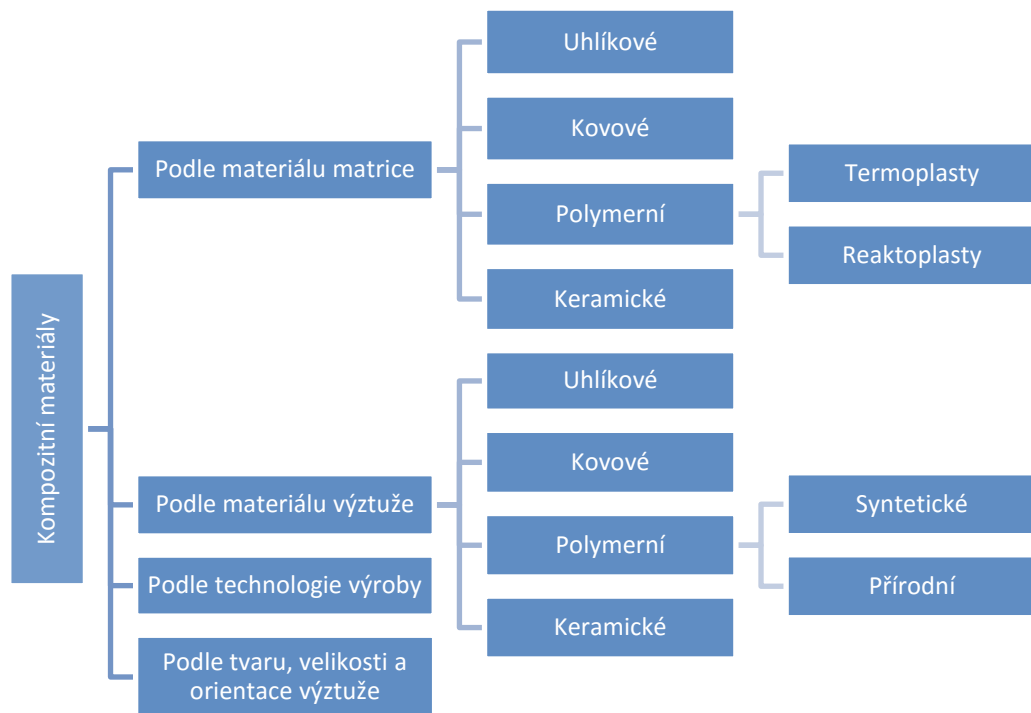


Obr. 1: Průběh synergického efektu [9]

Příkladem kombinace vlastností může být nízká houževnatost výztuže, která je kompenzována houževnatostí matrice a naopak nedostatek tvrdosti matrice nahrazuje tvrdost výztuže. Výsledné mechanické vlastnosti jsou tedy dány kombinací vlastností

jednotlivých složek a mohou být do jisté míry připraveny na míru požadované součásti. Jisté ovlivnění mechanických vlastností však způsobuje pevnost spoje výztuže a pojiva a možný vznik delaminace jednotlivých fází.

Kompozitní materiály lze rozdělit dle mnoha parametrů. Nejčastějším dělením je dle materiálů použitých fází, tzn. materiálu matrice a výztuže. Další dělení může být např. dle tvaru, velikosti a orientace výztuže v matrici, nebo dle volby technologie výroby. Základní možnosti rozdělení jsou uvedeny na obr. 2.



Obr. 2: Schéma - základní rozdělení kompozitních materiálů

U kompozitních materiálů s polymerní matricí je výhodou relativně vysoká pevnost v kombinaci s vysokou houževnatostí a nízkou hmotností. Příkladem kombinovaného kompozitu s polymerní matricí může být konstrukce pneumatiky, jež je složena z více vhodně zvolených materiálů.

U kompozitních materiálů s kovovou matricí patří mezi výhodné kombinace různých materiálů např. řezné nástroje ze slinutých karbidů. Zde se uplatňuje vysoká tvrdost karbidů wolframu (výztuž) s dostatečnou houževnatostí kobaltu (pojivo). Tyto materiály by jednotlivě nebyly vhodné ke konstrukci obráběcího nástroje, jejich kombinace je však pro tento výrobek výborná. Další využití kompozitních materiálů lze nalézt např.

při výrobě kluzných ložisek za použití porézních materiálů, nebo při konstrukci vrstvených nádob v potravinářském a chemickém průmyslu.

Hlavní oblasti použití kompozitních materiálů jsou dnes v automobilovém, potravinářském nebo chemickém průmyslu, letectví a kosmonautice nebo při výrobě obráběcích nástrojů. Široký rozsah vlastností kompozitních materiálů umožňuje jejich využití v nejširších oblastech použití, nejen ve strojírenství, ale i pro sportovní vybavení.

V následujících podkapitolách jsou probrány jednotlivé složky kompozitních materiálů.

1.1. Matrice

Matrice je poddajnější spojitá fáze kompozitu, jež zastává několik úloh. Zajišťuje spojení výztuže v kompaktní celek a zastává tedy funkci pojiva. Zprostředkovává přenos sil na dispergovanou fázi. Odděluje vzájemně jednotlivé částice nebo vlákna dispergované fáze od sebe a zabraňuje tak spojitému šíření trhliny. Matrice by si měla udržet svoji funkci i po prvních poruchách vláknové výztuže. Matrice rovněž chrání sekundární fázi před účinky vnějšího prostředí [1, 2].

Příprava kompozitních materiálů je nejnějnější, pokud lze matici převést do kapalného stavu. Technologii přípravy kompozitního materiálu ovlivňují základní vlastnosti kapalného stavu, povrchová energie a viskozita. Podmínkou pro dobré spojení matrice s výztuží, tedy pro její dobrou „smáčivost“ je nutné, aby měla kapalná matrice co nejmenší povrchovou energii pro výztuž s vysokou povrchovou energií [1].

1.1.1. Polymerní matrice

Polymerní matrice může být tvořena termoplastem (např. polypropylen, polyamid, polykarbonát), reaktoplastem (např. nenasycené polyestery, epoxidové pryskyřice), či zesíťovaným elastomerem (např. styren-butadien, akrylonitril-butadien). Mezi všeobecné vlastnosti polymerních matric patří jejich nízká hustota, houževnatost, korozivzdornost, dobré dielektrické vlastnosti a při použití se skleněnými, křemennými, či polymerními vlákny elektrická nevodivost. Při použití s uhlíkovými vlákny dosahují dobré propustnosti rentgenového záření [2].

Reaktoplastové matrice

Matrice je ve většině případů tvořena viskózní tekutinou s relativně krátkými molekulami. Molekuly jsou vytvrzovány pomocí chemické reakce, jež je způsobena dodáním katalyzátoru a iniciátoru. Průběh reakce je obtížně kontrolovatelný a může docházet ke vzniku vedlejších zplodin. Vzniklé chemické vazby a třídímenzionální polymerní síť zabraňují možnosti dalšího přetváření reaktoplastu [2].

Nejlevnějšími reaktoplastovými matricemi jsou nenasycené polyesterové pryskyřice (UP). Jejich viskozitu lze ovlivnit podílem reaktivního rozpouštědla, jímž je nejčastěji styren, dále pak ztužujícími přísadami a plnivý. Volbou vytvrzovacího systému a vytvrzovací teploty lze ovlivnit dobu vytvrzování v širokém rozmezí. Dosažením krátké doby vytvrzování umožňuje využít polyesterové pryskyřice i v hromadné výrobě. Z hlediska užití jsou však chemicky a tepelně odolnější vinylesterové pryskyřice (VE). Nejlepších mechanických vlastností a vysoké chemické a tepelné odolnosti dosahují epoxidové pryskyřice (EP). Nehořlavé pryskyřice jsou laminační fenolformaldehydové (PF), které při kontaktu s ohněm vykazují malý vývin toxických zplodin a kouře. Jejich užití je tak např. pro interiéry letadel či vozů metra. Nejvyšší tepelné odolnosti dosahují pryskyřice na bázi imidových polymerů (bismaleimidy (BMI), polyimidy (PI)) [2, 3].

Termoplastové matrice

Termoplastové matrice umožňují opakované přetváření díky jejich struktuře, jež je tvořena dlouhými lineárními řetězci spojenými mezimolekulárními silami a fyzikálním zapletením řetězců. Umožňují také velmi produktivní výrobu, neboť dosahují kratší doby výrobního cyklu, na rozdíl od reaktoplastů, které je nutné vytvrdit. Po výrobě vstřikováním do formy, či po tvarování kompozitní desky za tepla stačí termoplastovou matici pouze ochladit pod teplotu tvarové stálosti za tepla [2, 3].

Nejlevnější termoplastové matrice jsou polypropylenové (PP). Pro tvarově náročné a mechanicky namáhané díly (jako např. sací potrubí automobilových motorů, pouzdra a kryty agregátů a ručního nářadí) se používají dražší polyamidy (PA6, PA6.6, PA6.10, PA4.6, PA12) a lineární polyestery (PET, PBT). Pro značně tepelně a mechanicky namáhané díly je používán chemicky a tepelně odolný polyfenylsulfid (PPS), vstřikovací typy polyimidů (polyamidoimid (PAI) a polyetherimid (PEI)),

polyetherketony (PEEK, PEK, PEKK) a polyimidy (PI). Podmínkou však je, aby pracovní teplota součástí nepřesáhla 300 °C [2, 3].

Trendem ve vývoji kompozitních materiálů s polymerní matricí je snaha o přechod z reaktoplastových matric na matrice termoplastové. Důvodem je lepší zpracování matric a možnost recyklovatelnosti velkosériově vyráběných dílů. Kompozity s reaktoplastovou matricí jsou zpracovávány vytvrzováním, proto lze recyklovat pouze vlákna. Reaktoplastové prepregy mají dále omezenou skladovatelnost. Zpracování termoplastových kompozitů je založeno na fyzikálním procesu roztavení, či částečném natavení a následném tuhnutí při chladnutí. Termoplastové matrice umožňují dlouhodobou skladovatelnost a mají velmi dobrou houževnatost. Impregnace vláken termoplasty je však obtížnější než u reaktoplastů. Pro chemicky vysoce odolné kompozity jsou používány termoplastové semikrystalické matrice [2].

1.1.2. Kovové matrice

Kovovou matricí tvoří nejčastěji lehké slitiny hliníku, hořčíku, či titanu. Matricí však mohou tvořit i slitiny železa, niklu, kobaltu, či mědi. Limitující podmínkou použití jsou opět pracovní teploty, které by u slitin hliníku neměly přesáhnout přibližně 400 °C, u slitin titanu 600 °C a u slitin na bázi železa, niklu a kobaltu 1000 až 1150 °C [1, 2].

Mezi všeobecné vlastnosti kovových matric patří elektrická a tepelná vodivost, tepelná odolnost, nehořlavost, pevnost ve smyku, tvárnost, abrazivní odolnost a možnosti povlakování, spojování a tvarování. Při porovnání s polymerní matricí dosahují výrazně vyšších výrobních nákladů [2].

První kompozit s kovovou matricí (z hliníku) byl vyztužen bórovými vlákny, zpracovanými metodou CVD na wolframovém vlákně. Povrch vláken bylo nutné napařit vrstvou SiC či B₄C, aby při styku vláken s roztaveným hliníkem nedošlo k narušení jejich povrchu. Výsledkem bylo dosažení lepší smáčivosti vláken roztaveným kovem, neboť upravená vlákna mají větší povrchové napětí [1].

1.1.3. Keramické matrice

Keramickou matricí jsou nejčastěji karbidy a nitridy křemíku, oxidy křemíku a zirkonu. Pro kompozity s keramickými matricemi jsou vhodné jehličkovité částice nebo

whiskery. S rostoucím objemovým podílem vláken se však matrice stává pórovitou. Limitující podmínkou tak je maximální objemový podíl vláken do 50% [1, 2].

Mezi všeobecné vlastnosti keramických matric patří vysoká tepelná a chemická odolnost, vysoká křehkost, malé poměrné prodloužení, špatný přenos zatížení do vláken a dobrá pevnost v tahu i za teplot, při kterých již kovové matrice neodolávají [2].

1.1.4. Uhlíkové matrice

Matrice je tvořena uhlíkem v různém stavu strukturní uspořádanosti. Použití matrice je v kombinaci s uhlíkovými výztužemi. Užití kompozitů s uhlíkovou matricí je zejména pro součástky namáhané extrémními teplotami např. pro disky a třecí prvky brzd letadel, či pro tepelné izolace raketoplánů. Uplatnění nacházejí také v lékařském odvětví pro implantáty [2].

1.2. Výztuže

Výztuž v kompozitním materiálu zastává zpevňující funkci. Na rozdíl od matrice je pevnější, tvrdší a nespojitou fází. Vlákná dosahují mnohem větší pevnosti než stejný materiál v kompaktní podobě. Se zmenšujícím se průřezem roste pevnost vláken. Tento jev je způsoben přirozenými defekty, které jsou u vláken malých průměrů rovněž malé. Defekty jsou navíc příznivě orientované svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. Pevnost vlákna je také závislá na jeho délce. Vyráběná vlákna jsou nejčastěji kruhového průměru od 5 do 20 μm . Menší průměry se z technologických a zdravotních důvodů nepoužívají, jelikož u kompozitů s velmi tenkými vlákny je obtížné prosycení matricemi a je také riziko jejich průniku do plic při zpracování a manipulaci [1, 4].

Používaná vlákna jsou skleněná, uhlíková, polymerní, kovová, či keramická. V některých případech se však můžeme setkat i s využitím vláken přírodních. Vyrobená vlákna jsou dodávána převážně ve formě textilií, či navinutá na válcové cívce (roving).

V případě kompozitních materiálů s polymerní matricí nejsou používána kovová či keramická vlákna. Důvody jsou finanční a také fakt, že se jedná o vlákna s větší hustotou. Naopak pro kompozity s kovovou či keramickou matricí nelze použít vlákna s malou chemickou a tepelnou odolností. Vlákná jsou proto dělena na vlákna určená pro polymerní matrice (skleněná, uhlíková, polymerní a přírodní), nebo na vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, kovová a keramická) [1].

Výztuže lze dále rozdělit dle charakteristických vlastností (viz kap. 1.2.1 až 1.2.3)

1.2.1. Dělení dle rozměru výztuže

Makrokompozity

Velikosti příčného rozměru výztuže se pohybují v řádu mm až cm, jejich užití je zejména ve stavebním průmyslu (železobeton, polymerbetony s drceným kamenivem a pryskyřicí). Za makrokompozity lze považovat i plátované kovy.

Mikrokompozity

Velikosti příčného rozměru výztuže (vlákna, či částice) jsou řádově v μm . Na rozdíl od kovů a kovových slitin mají mikrokompozitní materiály příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě. Jejich uplatnění je zejména ve strojírenství.

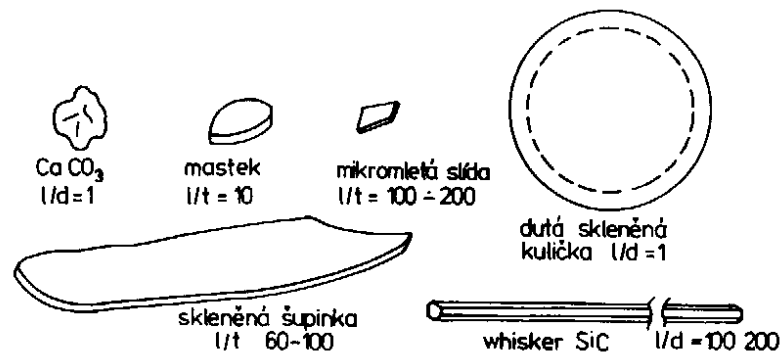
Nanokompozity

Rozměry výztuže (částice, vlákna) jsou zde řádově v nm. Problémem u nanokompozitů je správná dispergace výztuže v matrici.

1.2.2. Dělení dle tvaru výztuže

Částicové

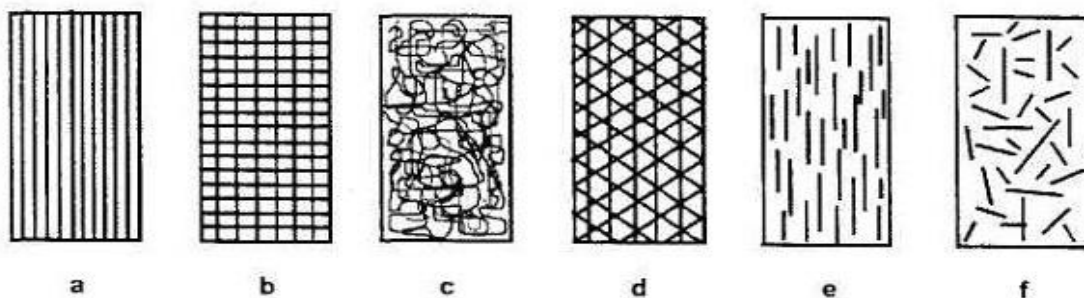
Částicové plnivo je přidávané zejména do polymerních matric za účelem zvýšení tuhosti. Částice lze rozdělit dle tvaru a velikosti viz obr. 3. Sférické částice by neměly dosahovat příliš velkých rozměrů, neboť by negativně ovlivňovaly pevnost. Rovněž však nesmějí být příliš jemné, neboť by bylo obtížné dosáhnout jejich rovnoměrné dispergace. Za nejvhodnější částice jsou považovány tzv. velké částice o rozměrech 1 až 10 μm . Výrazného zpevnění a vyztužení matrice lze dosáhnout pomocí anizometrických částic (tvar jehlic, disků, destiček), jež jsou označovány jako tzv. aktivní částice [1, 5].



Obr. 3: Přehled částic používaných pro vyztužení polymerních matric [1]

Vláknové

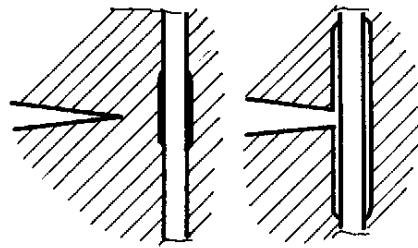
Představiteli jsou krátká, dlouhá či kontinuální vlákna. Tato vlákna lze dále rozdělit dle jejich orientace uspořádání v kompozitu, které může být jednoosé, dvouosé (křížově položené jednosměrné prepregy nebo tkaniny), víceosé (víceosá vyztuž z kontinuálních vláken, sešité jednosměrné vrstvy nebo tkaniny), či neuspořádané (rohože, nahodilá orientace kontinuálních nebo krátkých vláken). Jednotlivé možnosti uspořádání jsou uvedené na obr. 4 [1, 5].



Obr. 4: Příklady uspořádání vláknové vyztuže v kompozitech: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá vyztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna nahodile orientovaná [1]

Pro dosažení potřebné tloušťky stěn kompozitních součástí se obvykle vytváří laminát z elementárních vrstev. Vlastnosti laminátu jsou závislé na orientaci vláken v jednotlivých vrstvách. Je-li orientace vláken v elementární vrstvě jednosměrná, laminát je anizotropní. Při navrhování laminátů je tedy nutné, aby byly symetrické kolem střední roviny nebo střední vrstvy. U symetrických laminátů totiž nedochází při tahovém namáhání k přídavným ohybovým, či torzním deformacím. Mimo jiné je také zaručena tvarová stabilita laminátu při změnách teploty prostředí [1].

Vláknové kompozity jsou charakteristické tím, že se neprojevují negativní mechanické vlastnosti složek u výsledného materiálu. Obsahuje-li kompozit křehká vlákna v křehké matrici, dosahuje totiž dobré odolnosti proti křehkému lomu. Na rozdíl od homogenního materiálu může kompozit obsahovat větší četnost poruch vláken a matrice, které přesto nevedou k lomu. Důvodem je rozdílný mechanismus šíření trhlin. Šíří-li se trhlina v matrici ve směru kolmém k osám vláken, dochází k otupování vrcholků trhlin. Po vzájemném působení s vláknem se trhlina šíří po mezifázovém rozhraní [1].



Obr. 5: Mechanismus interakce trhliny matrice s vláknem [1]

1.2.3. Dělení dle materiálu výztuže

Vlákna používaná v kompozitních materiálech mohou být skleněná, uhlíková, polymerní, kovová, či keramická. Současným trendem však je stále větší využití vláken přírodních, zejména v automobilovém průmyslu.

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou amorfním materiálem o silikátovém základu (SiO_2) s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B. Jejich charakteristikou jakožto amorfního materiálu jsou vlastnosti shodné v podélném a příčném směru, tedy izotropní vlastnosti. Skleněná vlákna se rozdělují dle skloviny, ze které jsou vyrobeny. Ve strojírenství jsou nejpoužívanější vlákna ze skloviny E, S a C. Vlákna ze skloviny E jsou tzv. bezalkalické vápenato-hlinito-křemičité sklo Eutal, z něhož také plyne označení jako sklo E [4]. Toto sklo má dobré mechanické vlastnosti a je elektricky nevodivé. Dalším druhem jsou vlákna ze skloviny S, jejíž označení je z anglického slova „strength“. Vlákna ze skla S mají větší podíl SiO a Al_2O_3 , neobsahují B_2O_3 a v porovnání s vlákny ze skla E dosahují lepších mechanických vlastností. Označení vláken ze skloviny C je odvozeno z anglického výrazu „corrosion“. Tato vlákna mají vyšší podíl alkálií. Jedná se o vlákna s dobrou chemickou odolností. Ve vodním prostředí se však alkálie rychle vyluhují. Pro elektrická zařízení jsou používána dielektrická vlákna ze skloviny D.

V lékařských a laboratorních přístrojích se můžeme setkat s vlákny ze skloviny L, jež obsahuje oxid olova, který zabraňuje průchodu rentgenového záření. Přehled použití skleněných vláken, jejich složení a mechanické vlastnosti jsou uvedené v tab. 1. Nutné je zdůraznit, že hodnoty uvedené v tabulce jsou orientační, neboť se informace z jednotlivých zdrojů liší [4, 9].

Tab. 1: Přehled použití skleněných vláken, jejich složení a mechanické vlastnosti [4, 9]

Označení	Použití	Složení [%]	Pevnost [MPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm ³]
E	Elektrické izolace	55 SiO ₂ , 11 Al ₂ O ₃ , 6 B ₂ O ₅ , 18 CaO, 5 MgO	3000	3	2,58
S	Vysokopevnostní kompozity	65 SiO ₂ , 25 Al ₂ O ₃ , 10 MgO	5000	5	2,45
C	Chemické aplikace	65 SiO ₂ , 4 Al ₂ O ₃ , 6 B ₂ O ₃ , 3 MgO, 14 CaO, 9 K ₂ O	2000	2	2,54
D	Elektrické zařízení	72 SiO ₂ , 4 Al ₂ O ₃ , 1 CaO, 2 K ₂ O, 0,5 Fe ₂ O ₃	-	-	2,4
L	Radiační, rentgenové štíty	9 SiO ₂ , 3 Al ₂ O ₃ , 19 MgO, 0,3 Fe ₂ O ₃ , 28 PbO	-	-	2,3

Pevnost vláken v tahu je značně ovlivněna stavem povrchu. Vzájemné poškozování vláken při sduřování do pramenů a absorpce vzdušné vlhkosti snižuje pevnost čerstvě vytaženého vlákna až o 50 %. Pro ochranu před vzájemným poškozováním je nutno skleněná vlákna chránit povlaky nanášenými ještě před sduřením vláken do pramene. Pro textilní zpracování technických tkanin je používána lubrikace vosky, či mazivy. Pro kompozitní materiály jsou vlákna ošetřena vazebními činidly, jež zlepšují adhezi mezi maticí a vlákny. Tato činidla jsou např. organické silany (pro vlákna ze skla E), či povlaky speciální epoxidové pryskyřice (pro vlákna ze skloviny S, určené pro dynamicky namáhané kompozity). Možnosti modifikace skleněných vláken budou popsány v samostatné kapitole [4].

Polymerní vlákna

Předností polymerních vláken ze semikrystalického polymeru je nízká hustota. Pro kompozitní konstrukce však musí dosahovat pevnosti a tuhosti srovnatelné s vlákny skleněnými [1].

Nejvhodnější polymerní vlákna jsou z aromatického polyamidu (aramidu), jehož obchodními názvy jsou Kevlar, Twaron, či Technora. Tato vlákna dosahují vysoké pevnosti a tuhosti díky téměř dokonalému uspořádání tuhých lineárních makromolekul v podélném směru. Pevnost ve směru kolmém na osu vlákna je srovnatelná s vlastnostmi běžného polymeru, což je dáno působením slabších mezimolekulárních sil mezi makromolekulami. Výsledkem je tedy snadná plastická deformace při tlakovém namáhání ve směru kolmém na osu vlákna. Přehled mechanických vlastností aramidových vláken je uveden v tab. 2. Při porovnání se skleněnými vlákny dosahují aramidová vlákna výrazně nižší hmotnosti, vyššího modulu pružnosti, vynikající schopnosti absorbovat energii, dobře tlumí vibrace a mají dobrou rázovou houževnatost. Obdobně jako skleněná vlákna jsou odolná proti požáru. Uplatnění polymerních vláken je tedy např. pro neprůstřelné vesty, ochranné oděvy dělníků, sportovní vybavení, nebo pro nahrazení azbestu [4, 5].

Tab. 2: Přehled mechanických vlastností některých typů aramidových vláken v porovnání s vlákny ze standardního polyamidu 66 [4]

Označení	Pevnost [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm ³]
Kevlar 29	2920	71	4	1,44
Kevlar 49	3000	112	2,5	1,44
Kevlar 149	3450	170		1,47
Twaron 900	2800	65	4,3	1,44
Twaron 930	3000	125	2	1,45
Nomex	700	17,3	22,6	1,4
PA66	900	5	13,5	1,14

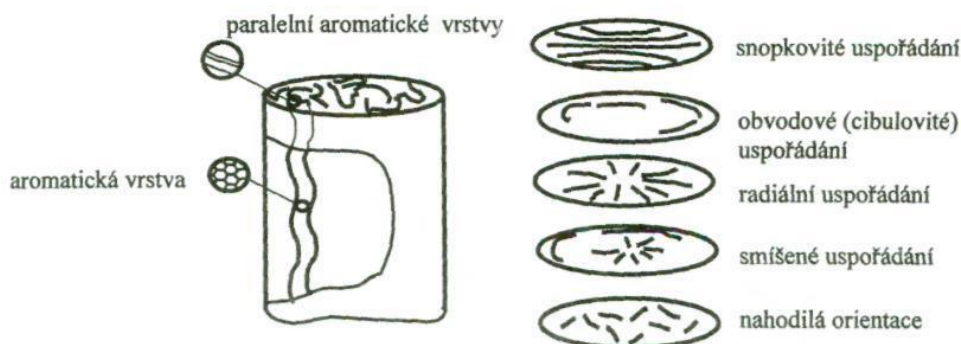
Poly-para-fenylbenzobisoxazolová (PBO) vlákna dosahují ze všech polymerních vláken nejvyšší tepelné odolnosti. Jsou nehořlavá, tvarově stálá (nesmršťují se) a mají velmi dobrou chemickou odolnost. Obchodní název těchto vláken je Zylon. Označení vláken je dále rozděleno dle zkratk AS a HM. Tyto zkratky vycházejí z anglických názvů „average strength“ (průměrná pevnost) a „high modulus“ (vysoký modul). Přehled mechanických vlastností těchto vláken je uveden v tab. 3. Porovnáme-li PBO vlákna s vlákny aramidovými, dosahují až dvojnásobné pevnosti a modulu pružnosti. Využití PBO vláken je obdobné jako u vláken aramidových, zejména v oblasti požární ochrany [4].

Tab. 3: Přehled mechanických vlastností PBO vláken (Zylon) [4]

Označení	Pevnost [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm ³]	Navlhavost [%]
Zylon AS	5800	180	3,5	1,54	2
Zylon HM	5800	280	2,5	1,56	0,6

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou krystalická vlákna s aromatickými rovinami přednostně orientovanými ve směru podélné osy vlákna (viz obr. 6). Jedná se o tzv. turbostratický uhlík, kdy silné vazby uvnitř vrstev a slabší vazby mezi vrstvami způsobí, že jsou krystaly vysoce anizotropní. Jsou-li však krystaly rozptýlené náhodně, jako celek jsou izotropní. Vlastnosti vláken ovlivňuje paralelnost aromatických rovin s osou vlákna, velikost a dokonalost krystalů a obsah vnitřních vad (dutiny, vměstky, trhliny). Uhlíková vlákna mají tedy největší rozsah vlastností. Koeficient teplotní roztažnosti je ve směru osy vlákna záporný. Je-li směr k ose vlákna kolmý, koeficient je kladný. Další směrově závislé veličiny jsou tepelná a elektrická vodivost. Vhodnou orientací vláken lze v širokém rozmezí měnit vlastnosti kompozitu [1].



Obr. 6: Schéma - uspořádání aromatických rovin v uhlíkovém vlákně [1]

Předností uhlíkových vláken je vysoká pevnost, modul pružnosti, tepelná odolnost a vysoká únavová pevnost při současně nízké měrné hmotnosti. Jejich nevýhodou však je nízká rázová odolnost, která je zapříčiněna křehkostí uhlíkového vlákna a elektrochemická koroze, ke které dochází při kontaktu s méně ušlechtilými kovy. Vzhledem k jejich vlastnostem a vysoké ceně jsou vlákna využívána pro prvotřídní kosmické aplikace a aplikace v leteckém, automobilovém a lodním průmyslu, či pro

sportovní vybavení. Pro textilní zpracování je potřebná ohebnost zaručena menšími průměry vláken (nejčastěji 6 až 8 μm) [5].

Výroba uhlíkových vláken je převážně z polyakrylonitrilových (PAN), fenolaldehdydových (Kynol) a ze sulfonovaných polyethylenových vláken. K výrobě nejužších uhlíkových vláken je používáno smol ve formě zbytků po destilaci ropných smol. Tzv. mezifázová smola je velmi tuhou a pevnou látkou, která má aromatické roviny různé molekulové hmotnosti a paralelně uspořádané. Během zvlákňování taveniny smoly dochází k orientaci aromatických rovin podél osy vlákna. Vlákná vyrobená ze smol dosahují vysokých hodnot modulu pružnosti v tahu a jiné mikrotextury, než vlákna z PAN. Rozměrnější deskovité krystaly turbostratického uhlíku jsou vytvářeny početnějšími aromatickými rovinami. Tyto krystaly jsou téměř rovnoběžné s osou vlákna. Vedle deskovitých krystalů turbostratického uhlíku vlákna také obsahují mikroskopické póry ve tvaru polyedrů, turbostratické mikrokrystaly a polykrystalický grafit. Srovnání mechanických vlastností vybraných druhů vláken je uvedeno v tab. 4 [4].

Tab. 4: Přehled mechanických vlastností vybraných uhlíkových vláken [4]

Surovina	Označení vláken	Pevnost [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm^3]
Fenolaldehyd	Kynol	500 - 700	200 - 300	2,0 - 3,0	1,5
PAN	Torayca	1500 - 3000	150 - 300	1,0 - 1,5	1,8 - 2
(Dialead) Uhelné mezifázové smoly (HM)	Průmyslová K63712	2600	640	0,4	2,12
	Průmyslová K63A12	2600	790	0,3	2,15
	Letecká K1352U	3600	500	6	2,05
	Letecká K13D2U	3700	935	0,4	2,12
(Granoc) Ropné smoly	YSH-95-A (UHM)	3530	900	0,3	2,19
	YSH-70-A (HM)	3630	720	0,5	2,14
	YSH-50-A (HM)	3900	520	0,7	2,1

Vlákná jsou také povrchově upravována za účelem zvýšení jejich odolnosti proti vzájemnému poškozování během zpracování a pro lepší soudržnost s polymerními maticemi, viz kapitola 4.

Kovová vlákna

Kovová vlákna jsou z ušlechtilých kovových materiálů, jako jsou např. korozivzdorné, žáruvzdorné oceli a slitiny na bázi niklu. Jejich využití je zejména pro vysokoteplotní aplikace např. tepelné štíty, pro plnění elektricky vodivých plastů a kompozitů, či ve formě tkanin jako filtrační média pro agresivní látky [5].

Keramická vlákna

Keramická vlákna jsou kontinuální vlákna na bázi karbidu křemíku (SiC) či oxidu hlinitého (Al_2O_3). Charakteristikou keramických vláken je jejich ultrajemná mikrostruktura s rozměry krystalů až 1 nm. Předností SiC vláken je dostupnost a nízká cena. Jejich využití je zejména v kombinaci s uhlíkovými, kovovými a keramickými matricemi pro vysokoteplotní aplikace a letecký průmysl. Vynikající aplikací jsou SiC vlákna s Al matricí. Obdobné využití mají Al_2O_3 vlákna. Kovové matrice vyztužené vlákny Al_2O_3 mají zvýšenou korozní odolnost, odolnost proti únavě a odolnost proti vzniku trhlin (zamezují vzniku trhlin, popř. jejich šíření). Vlákna Al_2O_3 jsou na rozdíl od SiC vláken elektricky nevodivá. Mohou se tak uplatnit např. pro kryty radarů [5].

Při porovnání s vlákny skleněnými a polymerními dosahují keramická vlákna vyšší tuhosti [5].

Tab. 5: Přehled mechanických vlastností vybraných keramických vláken [4]

Označení	Složení [%]	Pevnost [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Hustota [g/cm^3]
FP	99 Al_2O_3	1400	385	3,9
FP 166	Al_2O_3 , 15 - 25 ZrO_2	2100 - 2450	385	4,2
SCS - 6	SiC	3900	406	3
Altex	85 Al_2O_3 , 15 SiO_2	1800 - 2600	210 - 250	3,2
Nextel 312	62 Al_2O_3 , 15 B_2O_3 , 15 SiO_2	1750	154	2,7
Tyrano	Si, Ti, C, O	> 2970	> 200	2,4

Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou získávána z obnovitelných přírodních zdrojů, jejichž využití je jako levnější alternativa skleněných vláken. Používaná přírodní vlákna jsou lněná, konopná, jutová, ramiová, palmová, sisalová, banánová, bavlněná a kokosová. Vlákna jsou tvořena makromolekulární látkou zvanou celulóza, která tvoří stěny rostlinných buněk.

Elementární složení celulózy je přibližně ze 45 % C, 49 % O₂ a z 6 % H. Jednotlivé druhy přírodních rostlinných vláken se liší v počtu opakujících se jednotek celulózy. Největšího obsahu celulózy (až 99 %) dosahují vlákna bavlněná. Ostatní rostlinná vlákna jsou tvořena ještě ligninem, pektinem, pryskyřicemi, tříslovinami a jinými látkami [5, 19].

Předností přírodních vláken je nízká hmotnost, dobré tepelné a akusticko-izolační vlastnosti. Nevýhodou však jsou nižší pevnostní vlastnosti, proměnlivá kvalita, absorpce vlhkosti a nízká požární odolnost. Přehled mechanických vlastností přírodních vláken je uveden v tab. 6 [19].

Tab. 6: Přehled mechanických vlastností přírodních vláken [19]

Vlákno	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm³]
Ananas	413 – 1627	34,5 – 82,5	1,6	–
Banán	199 – 780	6,6 – 25,6	3,7	1,9 – 3,2
Bavlna	287 – 800	5,5 – 12,6	7 – 8	1,5 – 1,6
Juta	393 – 773	13 – 26,5	1,2 – 1,5	1,3 – 1,45
Kokos	131 – 175	4 – 6	15 – 40	1,15
Konopí	690	–	1,6	1,5
Len	345 – 1100	27,6	2,7 – 3,2	1,5
Sisal	468 – 640	9,4 – 22	3,7	1,45

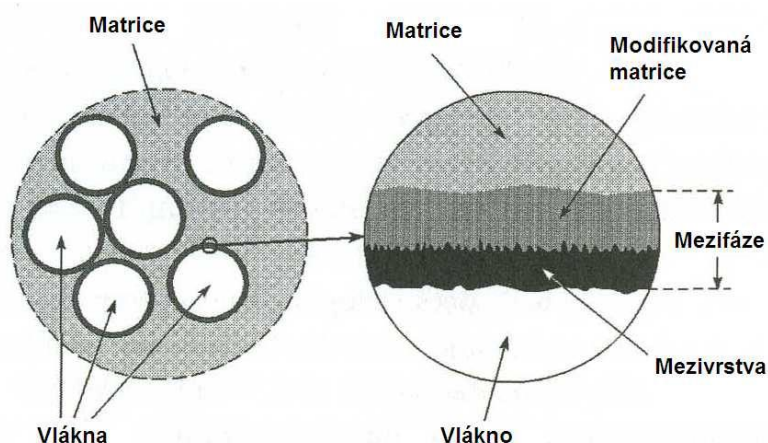
Vzhledem k jejich vlastnostem je aplikace pro pevnostně méně náročné a lehké součásti např. v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředků. Použití přírodních vláken umožňuje úsporu polymeru, recyklovatelnost odpadu, rychlejší výrobní postupy a dosažení přírodního vzhledu výrobků. Porovnání předností přírodních vláken s vlákny skleněnými je uvedeno v tab. 7 [25].

Tab. 7: Porovnání přírodních a skleněných vláken [25]

	Přírodní vlákno	Skleněné vlákno
Hustota	Nízká	Dvojnásobně větší, než u přírodních vláken
Cena	Nízká	Nízká, ale vyšší než u přírodních vláken
Obnovitelnost	Ano	Ne
Recyklovatelnost	Ano	Ne
Spotřeba energie	Nízká	Vysoká
Distribuce	Široká	Široká
CO2 neutralita	Ano	Ne
Abraze strojů	Ne	Ano
Zdravotní riziko při vdechnutí	Ne	Ano
Likvidace	Biodegradabilní	Není biodegradabilní

1.3. Mezifáze

Mezifáze je tenká hraniční vrstva mezi povrchem vlákna a matrice (viz obr. 7). Složení, struktura a vlastnosti této vrstvy mohou být rozdílné v celé její oblasti. Důležitou úlohou mezifáze je přenos napětí mezi jednotlivými složkami, především z matrice na vlákna. Schopnost přenosu napětí je závislá na tloušťce mezifáze, mechanických vlastnostech vlákna a matrice a na vazebných adhezních silách. Mezifáze tedy může výrazně ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti kompozitu. Další úlohou mezifáze je ochrana vlákna před poškozením a vlivy vnějšího prostředí [6].



Obr. 7: Schéma - zobrazení mezifáze kompozitu [6]

Mezifáze lze rozdělit na řízené a neřízené. U kompozitů s neřízenou mezifází jsou použita povrchově neupravená vlákna. Přítomnost vláken může ovlivnit část polymerní

matrice tak, že dojde ke vzniku mezifáze o stejném složení jako matrice, ale o jiné fyzikální mikrostruktuře. Z hlediska adheze mezi vlákny a matricí jsou rozhodujícími parametry tloušťka a struktura mezifáze. Tyto parametry je však obtížné ovlivnit. U neupravených vláken se zpravidla dosahuje špatné adheze. Tento fakt tedy vede k povrchovým úpravám vláken a výzkumu nových možností v této oblasti. Povrchové úpravy vláken jsou prováděny nanášením tenké mezivrstvy (řízená mezifáze), která zlepšuje adhezi a pevnost vazby mezi matricí a vlákny [6].

2. Adheze v kompozitech

Adhezi v kompozitech lze definovat jako schopnost materiálů (vláken a matrice) k sobě přilnout. Nejslabším místem v kompozitech je právě rozhraní mezi matricí a vlákny. Přilnavost jednotlivých složek kompozitu má tedy zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Tomuto místu je proto kladena vysoká pozornost a je předmětem výzkumů. Adhezi ovlivňuje soubor mechanismů, jimiž jsou adsorpce, smáčení, elektrostatická interakce, kovalentní vazba povrchu matrice s vlákny, reakční vazby a nevázané interakce. Důležitá je také morfologie vláken (plniva) a jejich rozmístění v matrici. V případě slabé adheze si jednotlivé vrstvy nepřekáží a mají volnou tepelnou roztažnost. V tuto chvíli však už kompozit neplní svou funkci a je pravděpodobné, že došlo k delaminaci vrstev. Je tedy nutné zajistit kvalitní spojení na rozhraní vláken a matrice [7].

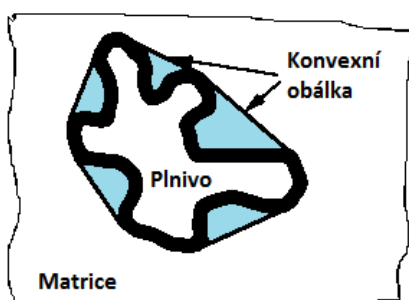
Soudržnost vláken a matrice v kompozitním materiálu je vždy závislá především na možnostech přenosu sil na jejich rozhraní. Tyto síly je možné rozdělit dle jejich zdroje na mechanické zaklínění, fyzikální působení či na chemické a fyzikálně chemické působení [7, 8].

2.1. Mechanické zaklínění

Žádné těleso nemůže být absolutně rovné. Platí to tedy i pro stykové plochy mezi matricí a plnivem. Styková plocha vždy obsahuje různé výstupky a prohloubeniny. Tyto povrchové nedokonalosti při zatížení brání vzájemnému pohybu matrice a plniva. S rostoucí drsností hranic se zlepšuje vzájemný styk a zaklínění je tak větší. Při porušení této soudržnosti by muselo dojít k vzájemnému usmýknutí jednotlivých složek [9].

Mechanické zaklínění mohou výrazně ovlivnit třecí síly, jež působí při vzájemném pohybu matrice a plniva. Tyto síly mohou dosahovat vysokých hodnot, neboť vlivem rozdílné tuhosti matrice a plniva dochází na rozhraní k velkým tlakovým silám. Vlivem tahových sil může docházet ke vzniku mikropórů. Jejich tvorbě však u kvalitních bezpórových matric brání vnější atmosférický tlak [9].

V případě, chceme-li zhodnotit schopnost mechanického zaklínění plniva určitého tvaru. Je možné využít koeficient, který je roven podílu povrchu částice a její konvexní obálky (obr. 8). Roste-li hodnota koeficientu, je dosaženo lepšího zaklínění [9].



Obr. 8: Konvexní obálka částice plniva [9]

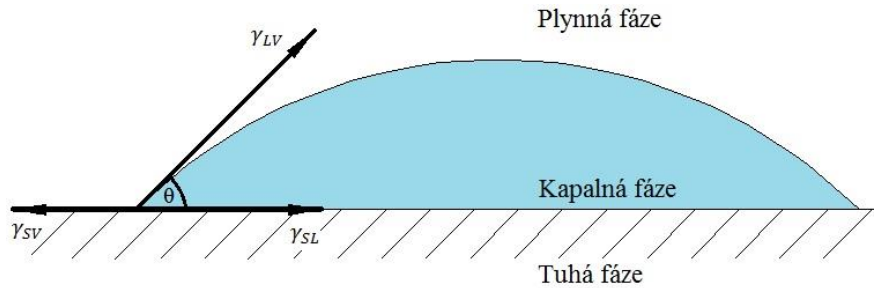
2.2. Fyzikální působení

Fyzikální působení adheze souvisí s van der Waalsovou vazbou mezi jednotlivými částicemi plniva na rozhraní plniva s matricí. Tato vazba může působit do vzdálenosti až 0,5 nm a její teoretická pevnost může dosahovat až 7 GPa. Pokud se podaří dosáhnout vysokých hodnot této teoretické pevnosti, lze vazbu považovat za dostatečně pevnou a vhodnou pro rozhraní. Tato vazba je dále úzce spojena se vzájemnou smáčivostí matrice a plniva [9].

Smáčivost jednotlivých složek kompozitních materiálů lze vyjádřit pomocí povrchového napětí, či povrchové energie. Při výrobě kompozitu je matrice zpravidla kapalná látka a plnivo tuhá. Základní schéma smáčivosti je znázorněno na obr. 9. Je zde znázorněna její základní charakteristika, tzv. úhel smáčivosti θ . Tento úhel je dán rovností horizontálních sil popsanou Youngovou rovnicí [10, 11]:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta$$

Kde γ je povrchová energie. Indexy S, L, V vyjadřují jednotlivé fázové stavy podle anglických názvů, tedy S – solid jako tuhá fáze, L – liquid jako kapalná fáze a V – vapor jako plynná fáze.



Obr. 9: Úhel smáčivosti θ a povrchové energie γ_{LV} , γ_{SL} a γ_{SV} pro kapku kapalně fáze na fázi tuhé [11]

Nulová hodnota úhlu θ představuje ideální smáčivost, kdy kapalná látka vytvoří souvislou tenkou vrstvu na tuhé látce. Povrchová energie plniva je rovna, nebo větší než povrchová energie matrice. Základní veličinou povrchové energie je adhezní práce W_a , která je definována Duprého rovnicí [11]:

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$$

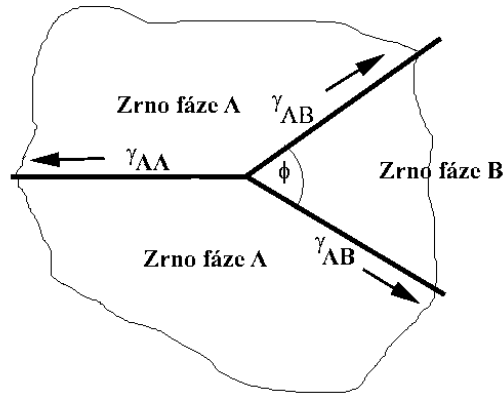
Mezním stavem smáčivosti je hodnota úhlu 90° . S rostoucí hodnotou úhlu nad 90° se jedná již o látky nesmáčivé. Hodnota úhlu 180° představuje přesný opak dokonalé smáčivosti, tedy dokonalou nesmáčivost. Kapalná látka v tomto případě vytvoří kulový tvar, který se dotýká jedním bodem na tuhé látce. Tento stav však nastává pouze za předpokladu ideálně hladkého rozhraní [9].

Ve skutečnosti rozhraní obsahuje povrchové nedokonalosti (již zmíněné v předešlé podkapitole 2. 1.), které mění úhel smáčivosti. Pro přiblížení reálného stavu se proto zavádí faktor drsnosti „D“, který je poměrem velikosti skutečného povrchu k velikosti ideálního povrchu. Platí tedy vztah [9]:

$$\cos(\theta_{drsné}) = D \cdot \cos(\theta_{ideální})$$

Dalším pravidlem je, že u smáčivých látek drsnost zlepšuje adhezi (zmenšuje se úhel smáčivosti) a naopak u látek nesmáčivých drsnost adhezi zhoršuje (zvětšuje se úhel smáčivosti) [9].

Teorie smáčivosti všeobecně uvažuje o existenci všech fází, tzn. plynné, kapalné a tuhé. U kompozitních materiálů jde pouze o vztah mezi kapalnou fází (matricí) a tuhou fází (plnivem). Rovnováha povrchových napětí je v tomto stavu uvedena na obr. 10 [9].



Obr. 10: Rovnováha povrchových napětí uvnitř dvoufázového kompozitu [9]

V případě, stýkají-li se tři zrna, musí platit vztah:

$$\gamma_{AA} = 2 \cdot \gamma_{AB} \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Pro stejnou smáčivost zrn A – A i A – B musí platit úhel smáčivosti 120° . Je-li zrno A – B smáčivější, úhel smáčivosti dosahuje hodnoty menší, než je 120° . Fáze pak má tendenci zaplnit všechny póry. V opačném případě špatné smáčivosti zrna A – B je úhel větší než 120° a fáze má naopak tendenci vytvářet póry na ostrých prohloubeninách rozhraní [9].

Vzhledem k tomu, že je vzájemná smáčivost vláken a matrice velice důležitou vlastností pro výrobu kvalitního kompozitu, je nutné se na ní také zaměřit. Smáčivost jednotlivých složek lze porovnat pomocí přímého měření, kdy aplikujeme kapky ze sady kapalin na povrch pevné látky. U kapalin známe velikost povrchového napětí a u tuhé látky povrchové napětí zjišťujeme. Kapky jednotlivých kapalin dále zkoumáme a porovnáваме, zda se mezi nimi vyskytují rozdíly ve smáčivosti. Z těchto rozdílů lze vytvořit pomyslnou hranici a kapaliny následně rozdělit na smáčivé a nesmáčivé. Z toho je možné dále odvodit tzv. kritické povrchové napětí, které lze definovat pro každou tuhou látku. Toto kritické napětí udává, že kapaliny s menším povrchovým napětím tuhou látku smáčejí. Pokud mají povrchové napětí naopak větší, tuhou látku nesmáčejí.

Pro příklad jsou níže uvedené tabulky 8 a 9 s hodnotami povrchového napětí běžných kapalin a přibližného kritického povrchového napětí tuhých látek [9].

Tab. 8: Povrchové napětí běžných kapalin ve standardních podmínkách [9]

Kapalina	Ether	Lih	Benzen	Olej	Glycerin	Voda	Rtuť
γ [N/m]	15	20	30	33	64	73	480

Tab. 9: Přibližné kritické povrchové napětí pevných látek [9]

Látka	Plast	Sklo	Keramika	Kov	Organické látky
γ_k [N/m]	20 - 30	80 - 100	100 – 1 000	400 – 2 000	500 – 5 000

Z uvedených tabulek je zřejmé, že rtuť smáčí pouze několik látek, naopak ether smáčí většinu. Voda smáčí většinu skel, plasty však nesmáčí [9].

V kompozitech jsou většinou používána vlákna, která mají velmi malou adhezi k matici. Jedná se zejména o vlákna uhlíková a skleněná. Z tohoto důvodu jsou za účelem zlepšení smáčivosti vlákna povrchově upravována, již při jejich výrobě. U skelných vláken se jedná nejčastěji o nanášení vhodné látky tzv. lubrikace vláken. U uhlíkových vláken je zlepšení smáčivosti obtížnější [9].

2.3. Chemické působení

Reakce matrice a vláken na rozhraní může vést k chemické adhezi. Tyto chemické vazby jsou velice přínosné, neboť mohou dosáhnout teoretické pevnost až 70 GPa do vzdálenosti 0,3 nm. K chemickým vazbám dochází, pouze pokud vzájemně difundují vlákna a matrice. Na rozhraní dojde ke vzniku difúzní mezivrstvy s velmi silnou adhezí [9].

Dalším předpokladem vzniku chemické vazby je vzájemná chemická reakce matrice a vláken. Mezivrstva je pak tvořena chemickou sloučeninou [9].

I přes pozitivní vliv chemické vazby na adhezní síly se zde také vyskytují vlivy, které mohou naopak negativně ovlivnit vlastnosti kompozitu. Jedná se o zkřehnutí a snížení pevnosti vlivem difuze mezivrstvy. V této mezivrstvě pak bude přednostně docházet k tvorbě a šíření poruch v kompozitu. V případě silné difuze může dojít k poškození

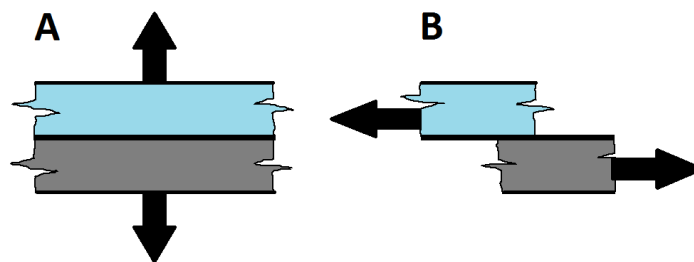
větší plochy vlákna a snížení tak jeho pevnosti. Vlákna jsou proto rozdělována na vlákna pro polymerní matrice, nebo na vysokoteplotní aplikace. Vlákna pro vysokoteplotní aplikace jsou opatřena mezivrstvou tvořící difuzní bariéru. Příkladem mohou být borová vlákna a SiC difuzní bariéra tzv. Borsic [9].

3. Měření adheze v kompozitech

Na základě předchozího rozdělení adheze lze stanovit vzájemnou smáčivost vláken a matrice i jejich povrchová napětí. Stanovení a vyhodnocení je však dle vztahu adhezních sil k jednotlivým složkám kompozitu velmi obtížné. K vyhodnocování adheze existuje celá řada metod, jak lze zjišťovat adhezní síly přímo na rozhraní. Pro úplné vyhodnocení vlastností rozhraní je nutné určit kritické tečné a normálové napětí, při kterém dojde k porušení rozhraní. Měřicí metody lze rozdělit na přímé měření adheze, nepřímé měření adheze a na měření přímo na kompozitech [9].

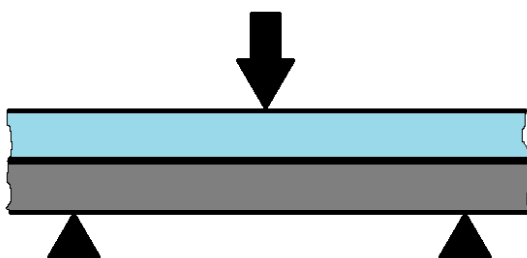
3.1. Přímé měření adheze

V případě, že je možné vyrobít rovinné rozhraní mezi jednotlivými složkami kompozitu, lze adhezní napětí určit přímo ze statických zatěžovacích zkoušek. Pro určení normálového napětí by bylo nutné kompozit zatěžovat příčným tahovým napětím (obr. 11 A). Pro určení tečného napětí pak zatěžovat v rovině podélné (obr. 11 B) [9, 12].



Obr. 11: Měření normálového (A) a tečného (B) adhezního napětí [9]

Tečné adhezní napětí lze také určit pomocí tříbodového ohybu (obr. 12). Podmínkou však je, aby rozhraní bylo v neutrální rovině ohybu. V této rovině dosahuje smykové napětí nejvyšších hodnot. Po překročení kritického smykového napětí na rozhraní dochází k porušení tečným napětím, tzv. delaminaci vzorku [9].



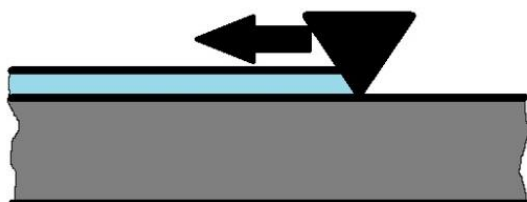
Obr. 12: Měření třibodového ohybu [9]

3.2. Porovnávací měření adheze

Porovnávací metody měření nestanovují přímo hodnotu adhezního napětí, ale umožňují pouze porovnávat kvalitu adheze na rozhraní. Nejčastějšími porovnávacími metodami jsou vrypový (scratch) test, mřížkový a odlupovací (peel) test [9].

3.2.1. Vrypový (scratch) test

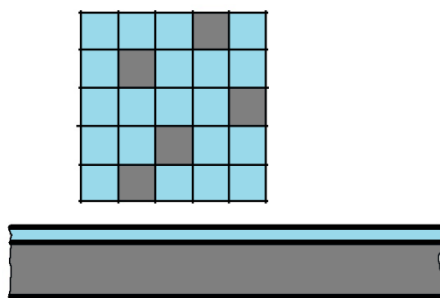
Vrypový test slouží k porovnávání adheze u kompozitů tvořených tenkou povrchovou vrstvou jednoho materiálu a spodní silnou vrstvou materiálu druhého. Vryp je vytvořen tažením diamantového hrotu, jenž odpovídá Rockwellovu indentoru pro měření tvrdosti (obr. 13). Během testu je postupně zvyšována přitlačná síla na hrotu, dokud nedojde k utržení celé vrstvy od spodního materiálu. Naměřená síla je následně měřítkem velikosti adheze. Je nutné zdůraznit, že tato porovnávací metoda není vhodná pro měkké polymerní matrice [9].



Obr. 13: Princip vrypového testu [9]

3.2.2. Mřížkový test

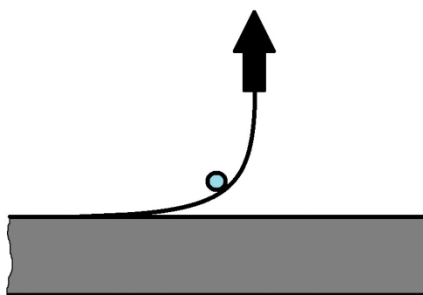
Mřížkový test je obdobou vrypového testu. Testy však mají rozdílné průběhy. Mřížkový test probíhá vytvořením vrypů po deseti, ve dvou kolmých směrech tak, aby bylo dosaženo kompletního prorytí vrstvy. Vzdálenost jednotlivých vrypů bývá nejčastěji 1 mm. Na prorytou vrstvu se nalepí a následně strhne samolepící páska (obr. 14). Měřítkem kvality adheze je zde procento neodtržených čtverečků od povrchu [9].



Obr. 14: Princip vrypového čtverečkového testu [9]

3.2.3. Odlupovací (peel) test

Odlupovací test je porovnávací metoda, kdy je měřena síla odlupu. Tento test je možné uskutečnit pouze, pokud je jeden z materiálů méně tuhý, aby umožnil značný ohyb. Test probíhá odlupováním materiálu přes přípravek, který zajišťuje konstantní poloměr ohybu v průběhu celého testu (obr. 15). Měřítkem adheze je zde odlupovací síla vztahovaná na jednotku délky hranice odloupení [9].



Obr. 15: Princip odlupovacího testu [9]

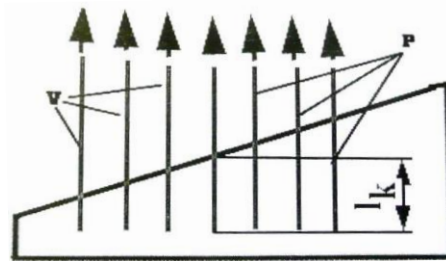
3.3. Měření adheze přímo na kompozitech

Při měření přímo na kompozitech lze určit adhezní napětí, které již má vypovídající hodnotu o velikosti adheze. Jejich určení však lze provést pouze za velmi zjednodušených předpokladů. Jedná se tedy především opět o porovnávací zkoušky [9].

3.3.1. Vytrhávací (pull-out) test

Vytrhávací zkouška je jednou ze základních zkoušek pro měření adheze ve vláknových kompozitech. Zkouška umožňuje dle způsobu provedení buď zjišťování kritické délky vlákna, či hodnocení soudržnosti vláken a matrice. Při zjišťování kritické délky vlákna je zkušební vzorek tvořen řadou vláken zalitých do matrice s rostoucí hloubkou zalití, tzn. rostoucí velikostí plochy rozhraní. Vlákna jsou pak jednotlivě zatěžována, dokud nedojde k jejich porušení (obr. 16). Při zkoušce platí, že vlákna zalitá nejméně

(s nejkratší délkou rozhraní) jsou vytrhávána a naopak, vlákna zalitá nejvíce (s nejdelší délkou rozhraní) jsou přetrhávána. U zalitých vláken, u kterých je pravděpodobnost vytržení a přetržení stejná, je jejich délka označována jako kritická délka vlákna. Tato délka je důležitou charakteristikou pro rozlišení mechanismu porušení různých vláken. Je však také měřítkem adheze. Při konstantních podmínkách platí, že s klesající kritickou délkou roste adheze a naopak [9].

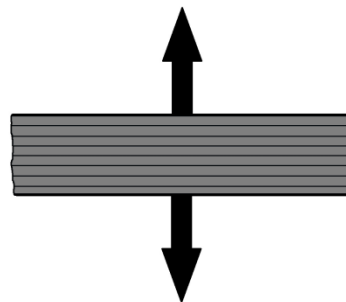


Obr. 16: Princip vytrhávacího testu [9]

V - vytržená vlákna, P - přetržená vlákna, l_k – kritická délka

3.3.2. Příčný test kompozitu

Příčný test kompozitu je používán pro vláknové kompozity se spojitě uspořádanými vlákny. Zkouška probíhá zatížením kompozitu tahovou silou ve směru kolmém na vlákna (obr. 17). Z naměřené meze pevnosti lze následně odhadnout velikost normálové adhezní síly. K lomu materiálu dochází vzájemným odtržením jednotlivých složek kompozitu, tedy vláken a matrice [9].

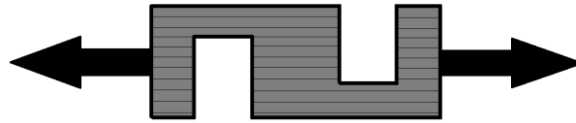


Obr. 17: Princip příčného testu [9]

3.3.3. Podélný test s výřezy

Podélný test s výřezy je opět používán pro vláknové kompozity se spojitě uspořádanými vlákny. Zkušební vzorek je zde specifického tvaru s výřezy. Během zkoušky je vzorek zatížen tahovou silou, tentokrát však ve směru vláken (obr. 18). Z naměřené meze

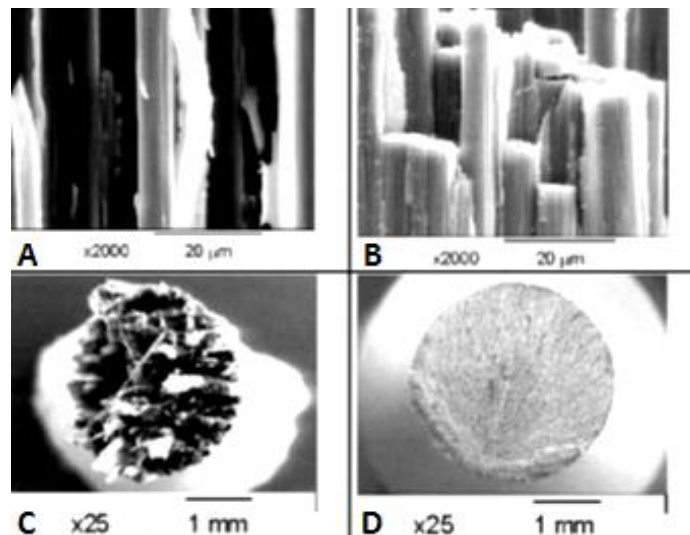
pevnosti lze následně odhadnout velikost tečné adhezní síly a k lomu zde dochází usmýknutím rozhraní vláken a matrice [9].



Obr. 18: Princip podélného testu s výřezy [9]

3.3.4. Posouzení dle charakteru lomové plochy

Kvalitu rozhraní mezi vlákny a matricí lze vyhodnocovat i dle charakteru lomové plochy. Na obr. 19 je uveden příklad porovnání lomových ploch po tahovém namáhání ve směru vláken kompozitu. Vyhodnocovaný kompozit je složen z grafitových vláken a Al-Mg matrice s různým procentem hořčíku, které ovlivňuje kvalitu rozhraní [9].



Obr. 19: Porovnání lomových ploch kompozitů [9]

Na obr. 19 A je vidět lomová plocha Mg matrice, kde došlo k příčnému lomu po vlákních a bylo dosaženo malé adheze. Na obr. 19 B bylo při použití MgAl4 matrice dosaženo silné adheze a křehkého rozhraní. To vedlo k příčnému lomu s přetrháním vláken. Na obr. 19 C byla použita matrice MgAl1. U této matrice bylo dosaženo střední adheze a během zatížení došlo k příčnému lomu s vytažením vláken. Na obr. 19 D byla opět použita MgAl4 matrice, u které bylo obdobně dosaženo silné adheze a křehkého rozhraní, které vedlo ke křehkému příčnému lomu [9].

4. Modifikace pro zlepšení adheze

V předešlých kapitolách bylo již zmíněno, že za účelem zlepšení mezifázové adheze mezi vlákny a matricí je nutné fyzikálně, či chemicky modifikovat povrch výztuže nebo matrici. Kompozity tak dosahují lepších mechanických vlastností a mají vyšší užitné vlastnosti. Modifikace výztuže má dále ochranné účely před vzájemným poškozováním vláken. Možnosti modifikace výztuží a polymerní matrice jsou následující.

4.1. Modifikace skleněných vláken

Skleněná vlákna jsou modifikována nanášením ochranných povlaků, již při jejich výrobě. Jedná se o tzv. „sizing“, který zabraňuje abrazivnímu poškozování vláken a snižování tak jejich pevnosti při dalším zpracování. Tloušťka ochranného povlaku závisí na jeho hmotnostním podílu, který bývá 0,3 až 1,5 % hmotnostního podílu vlákna. Pro povlakování se používají lubrikační látky (např. olej, vosk, škrob, želatina, či polyvinylalkohol) a vazebné prostředky, které mají dobrou afinitu jak ke skleněným vláknům tak polymerní matrici [4].

Ochranné povlaky mají pozitivní hydrofobizační účinek tzn., že snižují adsorpci vody. Dalším pozitivem je antistatické působení, kdy vlákna méně přitahují prach. Vazebné prostředky pro silikátová skla jsou nejčastěji organokovové sloučeniny „chromkomplexy“ a organosilany. Chemická struktura a mechanismus silanů jsou však komplikované. Při nanášení ve vodném roztoku nevytvářejí na povrchu vláken souvislý film, ale tvoří pouze mikroskopické kapičky na povrchu. Tento fakt je tedy důvodem, proč silany nezabraňují působení vody. Ztěžují pouze difuzi molekul vody do kompozitu podél vláken. Difunduje-li voda k vláknům skrz polymerní matrici, dojde k hydrolyzaci vazby vazebného prostředku k povrchu skla. Tato hydrolyza umožňuje smykové posuvy skleněných vláken vůči matrici. Rostoucí množství adsorbované vody však může vést k úplnému porušení rozhraní vláken a matrice [4].

V praxi jsou povrchové úpravy skelných vláken nejčastěji rozdělovány dle tvrdosti vazebného prostředku, která je dána jeho chemickou strukturou. Povrchová úprava tedy může být měkká, polotvrdá, či tvrdá. Tvrdá úprava je prováděna pomocí methakrylsilanu, či chromkomplexu. Měkká úprava pak vinylsilanem, či aminosilanem, který zajišťuje rychlou smáčivost vláken polyesterovou pryskyřicí [4].

4.2. Modifikace uhlíkových vláken

Povrchová úprava uhlíkových vláken je realizována podobně jako vlákna skleněná. Účelem modifikace je odstranění látek (nečistot) z povrchu vláken, které brání spojení s matricí. Modifikace také omezuje adsorpci plynů na povrchu vláken a zvyšuje reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matrici. Obdobně jako u skleněných vláken modifikace chrání před vzájemným abrazivním poškozením [4].

Uhlíková vlákna jsou nejčastěji povlakována polymery na bázi epoxidů, či polyimidů, jež zabráňují adsorpci látek a chrání před vzájemným abrazivním poškozením. U standardních vláken PAN, která mají aromatické roviny rovnoběžné s povrchem, je vhodné zvýšit povrchovou aktivitu vlákna zdrsněním povrchu. Nejčastěji je používán mokrá způsob, který je založen na chemickém působení oxidačních látek (HNO_3 , H_2CrO_4 , NaClO). Další možností je elektrolytický způsob, jenž je založený na anodické oxidaci vláken v elektrolytu. Pokud mají vlákna příhodnější mikrotexturu, je možné použít i suchý způsob pomocí termické oxidace [4].

Pro zvýšení schopnosti kompozitu pohlcovat energii např. při rázových namáháních, jsou používány lubrikační látky ve formě polyvinylalkoholu, či silikonového oleje. Tyto lubrikační látky usnadňují vytahování vláken z matrice. Při lomu tak nedochází k poškození vláken, jelikož proces vytahování vláken spotřebovává více energie, než je energie spotřebovaná na vznik lomu na povrchu vláken. Negativní vlastností zmíněných lubrikačních látek je výrazné zhoršení soudržnosti vláken a matrice. Výhodnou modifikací vláken pro zvýšení houževnatosti a zachování dostatečné soudržnosti vláken a matrice je povlakování kaučukem, který zvyšuje tření při vytahování vláken. Pro zvýšení korozní odolnosti mohou být uhlíková vlákna také modifikována niklem, pomocí metody CVD. Poniklování uhlíkových vláken zajišťuje dále feromagnetické vlastnosti a stínění elektromagnetických interferencí [4].

4.3. Modifikace přírodních vláken

4.3.1. Fyzikální metody

Fyzikální metody modifikace přírodních vláken nemění jejich chemické složení. Mohou však změnit strukturní a povrchové vlastnosti vláken a tím ovlivnit mechanické spojování s polymery. Používané metody jsou protahování, kalandrování, tepelné zpracování a výroba hybridních přízí [26].

Elektrický výboj

Odlišným fyzikálním způsobem modifikace je využití elektrického výboje (korónový, studená plazma). Ošetření povrchu vláken pomocí korónového výboje je jednou z nejzajímavějších technologií pro aktivaci povrchové oxidace. Při tomto procesu dochází ke změně povrchové energie celulóзовých vláken. V případě aktivace povrchu dřeva je zvyšováno množství aldehydických skupin. V závislosti na druhu a charakteru použitého plynného prostředí může být při použití studené plazmy dosaženo různých povrchových modifikací. Je tedy možné provést povrchové zesíťování, zatímco povrchová energie může být zvýšena, či snížena a mohly být tvořeny reaktivní volné radikály. Jednotlivé druhy plazmové modifikace budou rozebrány v samostatné kapitole, neboť je pomocí této modifikace zpracována většina vláken, v závislosti na druhu použitého plynného prostředí [26].

Elektrické výbojové metody jsou známy pro svou vysokou účinnost u „neaktivních“ polymerních substrátů, jakou jsou PE, PP, PS aj. Tyto metody byly úspěšně uplatněny pro modifikaci celulóзовých vláken, pro snížení viskozity taveniny celulózo-polyetylenových kompozitů a zlepšení mechanických vlastností celulózo-polypropylenových kompozitů [26].

Mercerizace

Používaná metoda je také tzv. mercerizace. Jedná se o starou metodu modifikace celulóзовých vláken, používanou zejména pro bavlněné látky. Metoda je založena na alkalickém ošetření vláken, které je závislé na koncentraci alkalického roztoku, jeho teplotě, době deposice, napětí materiálu a na přídavných aditivech. Mercerizaci je možné použít i na ostatní přírodní vlákna, kde zlepšuje vlastnosti v tahu a absorpční charakteristiky [26].

4.3.2. Chemické metody

Silně polarizovaná celulózová vlákna jsou svou povahou neslučitelná s hydrofobními polymery. Pokud jsou dva materiály neslučitelné, je možné jejich slučitelnost ovlivnit zavedením třetího materiálu, který má přechodné vlastnosti mezi původními dvěma materiály [26].

Silanová vazební činidla

Silanová vazební činidla mohou přispívat k hydrofilním vlastnostem rozhraní vláken a matrice. Zvláště pokud jsou použity aminové funkční silany (např. epoxidy a uretanové silany), jako základ pro reaktivní polymery. Tímto základem lze poskytnout větší funkčnost aminu, než může případně reagovat s pryskyřicí v mezifázi. Aminy, které nemohou reagovat, jsou hydrofilní a jsou zodpovědné za špatnou voděodolnost vazby. Účinným způsobem použití hydrofilních silanů, je jejich směs s hydrofobními silany (např. fenyltrimetoxysilan). Smíšené silanové základy mají zvýšenou tepelnou stabilitu, která je typická pro aromatické silikony [26].

Chemické vazby

Chemické vazby jsou důležitou modifikací pro zlepšení mezifázové adheze. Povrchy vláken jsou modifikovány pomocí sloučenin, jež tvoří můstky chemických vazeb mezi vlákny a matricí. Mezi účinné metody chemické modifikace patří např. roubovací kopolymerizace, modifikace sloučeninami (obsahující skupiny metanolu), modifikace s izokyanáty, či použití triazinových spojovacích činidel a kondenzačních činidel (organosilany) [26].

Roubovací kopolymerizace je modifikace, při níž dochází k reakci iniciované volnými radikály molekul celulózy. Celulóza mísená s vodným roztokem s vybranými ionty je vystavena vysokému energetickému záření. To vede k praskání molekul celulózy a k tvorbě radikálů. Radikály jsou následně míseny s vhodným roztokem, který je slučitelný s polymerní matricí (např. vinilové monomery, akrylonitril, metylmetakrylát, polystyren). Výsledný kopolymer pak dosahuje charakteristických vlastností pro oba materiály, tedy vláknité celulózy a roubovaného polymeru. Např. modifikace celulóзовých vláken polypropylen-maleinanhydrid (MAH – PP) kopolymeru poskytuje kovalentní vazby přes rozhraní. Po modifikaci je zvýšena povrchová energie vláken na úroveň blízkou povrchové energii matrice. Je tak dosaženo lepší smáčivosti a vyšší mezifázové adheze. Roubovací kopolymerizace je účinná metoda, nicméně velice složitá [26].

Modifikací kompozitů s dřevěnými vlákny a PVC, či PS matricí izokyanáty je dosaženo zlepšení mechanických vlastností. Izokyanáty mohou být modifikována jak vlákna, tak polymerní matrice. Použit může být polymetylen-polyfenyl-izokyanát (PMPPIC)

v základním stavu, či formou roztoku v plastifikátoru. PMPPIC je chemicky spojen s celulózovou maticí pomocí silných kovalentních vazeb [26].

4.4. Plazmová modifikace vláken

Novodobým trendem povrchových úprav skleněných, uhlíkových, polymerních i přírodních vláken je plazmová modifikace.

Plazma je ionizovaný plyn, který je složený z iontů, elektronů, popř. i neutrálních atomů a molekul. Plazma vzniká odtržením elektronu z elektronového obalu atomů plynu, popř. roztržením molekul (ionizace) při dodání energie nebo vzájemnými srážkami. Dodávaná energie je nejčastěji elektrického původu, kdy elektrony narážejí do neutrálních částic. Plazma se vytváří reaktorem při frekvencích střídavého proudu okolo 15 MHz. V závislosti na použitém plynném prostředí, lze ovlivnit výsledné účinky plazmy [4, 15].

4.4.1. Plazmové čištění

Čištěním vláken se odstraňují nečistoty ve formě olejů, prachu, oxidů a chemických činidel z jejich povrchu. Očištěním je dosahováno zvýšení povrchové energie, a tedy zlepšení adheze. Čištění je prováděno za nízkých teplot, je tedy vhodnou aplikací i pro teplotně citlivé materiály. Jako plynné prostředí jsou používány inertní plyny He, Ar, Ne, díky kterým je dosahováno velmi kvalitní a homogenní plazmy [4, 15, 27].

4.4.2. Plazmové leptání

Leptáním vláken se zdrsňují či úplně odstraňují povrchové vrstvy vláken. Vytvářeny jsou reliéfy pro další úpravu povlakováním. Negativním jevem této modifikace je, že je často doprovázena poklesem pevnosti vláken. Leptání je závislé na složení plazmatu, stavu modifikovaného materiálu a pracovních podmínkách (proud, průtok plynu, pozice modifikovaného materiálu). Pro aplikaci leptání a zdrsňování povrchů jsou nejčastěji používány kyslíkaté plyny O₂, CO, CO₂, SO₂ či H₂O. Pro udržení stabilního výboje je používáno médium helium. Metastabilní aktivní částice zvyšují účinnost leptání a hrají důležitou roli při excitačních, ionizačních a disociačních jevech [4, 15, 27].

4.4.3. Plazmové povlakování

Plazmovým povlakováním se mění funkčnost povrchu materiálu (např. chemická bariéra, korozní odolnost, elektrická vodivost atd.), zatímco mechanické vlastnosti

materiálu se nemění. Povlakování může být provedeno buď plazmovým naprašováním (APS – air plasma spray), či plazmovým napařováním (PECVD – plasma enhanced chemical vapor deposition). Pro tvorbu hydrogenovaných uhlíkatých filmů jsou používány uhlovodíkové plyny (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 a C_6H_6), které tvoří také výjimečně mikrotvrdé, antireflexivní a pro páry nepropustné povlaky. Pro zvýšení hydrofobie povrchu jsou používány F_2 a HF média. Pro zlepšení adheze očištěných vláken s matricí, jsou používány dusíkaté a fluoridové plyny (nejčastěji N_2 , NH_3). Pro tvorbu polymerního povlaku jsou do proudu plazmy přidávány vhodné monomery. Jedná se především o organosilikáty Si, které se mohou díky přítomnosti křemíku vázat i na sklo. Funkčními skupinami křemíku pak lze v podstatě libovolně měnit jejich vlastnosti [4, 15, 27].

Při plazmovém zpracování s využitím NH_3 , popř. s atmosférickou směsí NH_3 a Ar bylo zjištěno dvojnásobné zvýšení smykové pevnosti rozhraní uhlíkového vlákna a epoxidové matrice. Plazmovou polymerizací je možné na uhlíkových vláknech vytvořit přilnavý polymerní povlak, jenž umožní vysokou afinitu k polymerní matrici. Po povlakování byl také zjištěn nárůst tahové pevnosti. Tento nárůst je dán zacelením povrchových defektů vytvořeným povlakem. Kompozity s takto modifikovanými vlákny dosahují vysoké smykové pevnosti rozhraní vláken a matrice. Dále byla zjištěna vysoká mezilamelární (interlamelární) smyková pevnost. Obsahuje-li kompozit i mezifázi tvořenou polymerem, roste odolnost kompozitu proti podélným trhlinám na rozhraní vláken a matrice [4].

4.5. Plazmová modifikace polymerní matrice

Plazmová modifikace je užívána zejména pro modifikaci vláken. V experimentální části této práce je však pomocí plazmové modifikace zpracovaná polyetylenová matrice ve formě prášku. Účelem modifikace matrice je zlepšení adheze s přírodními a skleněnými vlákny. Zda modifikace matrice opravdu zlepšila adhezi vláken a matrice bude předmětem výzkumu a vyhodnocení zkušebních vzorků v experimentální části.

Podstatou plazmové modifikace polymerů je přidání či ubrání povrchové vrstvičky nebo povrchového náboje, změna chemické struktury povrchu a fyzikálních povrchových vlastností [15].

4.5.1. Plazmová aktivace

Plazmová aktivace spočívá v tvorbě, či roubování chemicky funkčních skupin na povrchu substrátu. Dosaženo je specifických povrchových vlastností změnou povrchové energie. Důležitou roli hraje složení plazmatu, které ovlivňuje povrchové vlastnosti modifikovaného materiálu. Použitím argon/kyslíkové plazmy vede k roubování polárních a hydrofilních skupin (kyslíkové skupiny), které zvyšují povrchovou energii modifikovaného materiálu. Tato aktivace je tedy vhodná pro úpravu vláken a další úpravy polymerních součástí (např. povlakování, pokovování, lepení, spojování, barvení a tisknutí). Použití Ar/CF₄ plazmy vede k fluorizaci povrchu, což vede k antiadhezním vlastnostem. Použití atmosférické plazmy je vhodné zejména pro teplotně citlivé polymery a další materiály. Aktivace povrchů zůstává stabilní po dlouhou dobu a modifikované substráty tak mohou být skladovány. Nicméně, manipulace se substráty mezi dvěma stupni povrchových úprav může vést k poškození jejich povrchu. Snahou je proto zařadit plazmové modifikace přímo do procesu výroby [4, 15, 27].

4.6. Modifikace polymerní matrice roubováním

Principem roubování je navazování různých funkčních skupin na řetězce polymerních materiálů. Jedná se o často využívanou metodu povrchové úpravy polymerních materiálů. Modifikace polyolefinů (PE, PP) je u kompozitů prováděna za účelem snížení mezifázového napětí a zlepšení adheze mezi nepolární matricí a polárními vlákny. Modifikace polyolefinů je nejčastěji prováděna roubováním monomerů obsahujících polární skupiny na polymerní řetězce polyolefinů. Roubování je možné provádět reakcemi v roztoku, tavenině, či pevné fázi. Nejpoužívanějšími monomery jsou nenasycené dikarboxylové kyseliny, jejich anhydridy, estery a deriváty (maleinanhydrid, alkylmaleáty, maleimidy, kyselinu itakonovou a její deriváty) [28].

Modifikace polyolefinů polárními monomery je řízena mechanismem radikálového roubování. Tuto radikálovou polymeraci lze rozdělit na iniciaci, propagaci a terminaci. Při iniciaci dochází k termickému rozkladu iniciátoru, obsahujícího nestabilní O-O vazbu a vzniku primárního radikálu. Tento radikál dále působí na polymerní řetězec a vede ke vzniku makroradikálu odštěpením vodíku z terciálního, či sekundárního uhlíku. Při další fázi propagace dochází k reakci molekuly monomeru s aktivním centrem polymerního řetězce a vzniku roubu. Rychlost roubování a výsledná délka roubu jsou ovlivněny reaktivitou monomeru a makroradikálu, dále schopností

monomeru polymerovat. V konečné fázi terminace dochází k zániku aktivních center [28].

III. Experimentální část

5. Popis a cíl experimentální části

Tato část diplomové práce popisuje provedení experimentu, který byl zaměřen na vyhodnocení adheze mezi různými druhy použitého plniva a polyethylenové matrice v základním stavu a plazmově modifikovaném stavu. Cílem bylo vyhodnotit, v jaké kombinaci plniva a matrice je dosaženo nejpříznivější adheze a zda měla plazmová modifikace matrice pozitivní vliv na adhezi, eventuálně na jiné vlastnosti.

Pro úspěšné provedení experimentu bylo nutné navrhnout a vyrobit zkušební vzorky. Tyto vyrobené vzorky podrobit zkoušce mechanických a termických vlastností, pomocí tahové zkoušky a DSC zkoušky. Z lomových ploch přetržených vzorků následně vyhodnotit adhezi plniva a matrice na stereomikroskopu, elektronovém a digitálním mikroskopu.

6. Použité materiály

6.1. Matrice

6.1.1. DOWLEX 2629.10UE

Jako matrice kompozitních vzorků byl použit prášek DOWLEX 2629.10UE v základním stavu a v plazmově modifikovaném stavu. Jedná se o lineární nízkohustotní polyetylen (PE – LLD) ve formě prášku, který je určený pro zpracování rotačním litím či vstřikováním. Materiál je navržen pro aplikace ve venkovním prostředí, vyžadující odolnost proti tvorbě trhlin a rázovou pevnost v kombinaci s nízkou deformací a dobrou zpracovatelností. Zvláštními vlastnostmi prášku jsou odolnost proti povětrnostním podmínkám, UV stabilita a zvýšená tepelná odolnost. Prášek je také ekologicky ohodnocen pro kontakt s potravinami (schváleno FDA 21 CFR). Varianta prášku s plazmovou modifikací by měla vést ke zlepšení adheze s použitým plnivem. V tab. 10 jsou uvedené vlastnosti materiálu z dostupného materiálového listu [16].

Tab. 10: Vlastnosti DOWLEX 2629.10UE [16]

Zpracování / Fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Test Standard
ISO Data			
Hustota	935	kg/m ³	ISO 1183
ASTM Data			
Hustota	935	kg/m ³	ASTM D 792
Reologické vlastnosti			
ISO Data			
Index toku taveniny (MFI)	4	g/10min	ISO 1133
MFI teplota	190	°C	-
MFI zatížení	2,16	kg	-
Mechanické vlastnosti			
ISO Data			
Mez kluzu	17,5	MPa	ISO 527-2
Přetvoření při přetržení	650	%	ISO 527-2
Modul pružnosti, 23 °C	645	MPa	ISO 178
Shore D tvrdost, 15s	54	-	ISO 868
Tepelné vlastnosti			
ISO Data			
Teplota průhybu při zatížení 0,45 MPa	52	°C	ISO 75-1/-2
ASTM Data			
Teplota tání	124	°C	ASTM D 3418
Teplota dle Vicata	119	°C	ASTM D 1525
Teplota krystalizace (DSC)	110	°C	ASTM D 3418

Plazmová úprava prášku proběhla v reaktoru ST650. Prášek byl uložen do komory reaktoru o průměru 650 mm a výšce 200 mm. Následně byl prášek modifikován pomocí pulzního budícího napětí o frekvenci 5 kHz a směsí pracovního plynu složenou z kyslíku a vzduchu. Tlak pracovního plynu byl 100 Pa.

6.1.2. Mikroten

Pro porovnání adheze skleněných vláken a ocelových třísek i s jiným druhem matrice byl použit mikroten. Mikroten je obchodní značkou vysokohustotního polyetylenů (HDPE). Jedná se o vysoce krystalický polymer s vyšší tepelnou odolností, dobrými mechanickými vlastnostmi a dobrou odolností proti vlhkosti. Za přítomnosti mastných kyselin či pracích prášků má při mechanickém napětí sklon ke korozi. Ve výrobcích tak mohou vznikat trhliny. Vlivem UV záření degraduje. Materiál splňuje ekologické podmínky pro styk s potravinami. Nejčastějšími výrobky z HDPE jsou folie, jež jsou charakteristicky šustivé. Použití je dále pro obaly pracích prostředků, izolační lepenky,

varné sáčky, víka lahví, kojenecké lahve, vodovodní potrubí, plynové rozvody a palivové nádrže automobilů [17].

6.2. Plnivo

Primárním plnivem kompozitu byla přírodní vlákna kokosová, banánová, bavlněná a drcené ořechové skořápky. Pokusy byly provedeny i se skleněnými vlákny a kuličkami a s ocelovými třískami.

6.2.1. Bavlna

Bavlněná vlákna jsou získávána ze semen bavlníků. Tvar vláken se podobá zkroucené stužce. V příčném řezu mají vlákna fazolovitý průřez. Chemické složení bavlny závisí na druhu bavlny, stupni zralosti a podmínkách pěstování. Průměrné složení je 94,0 % celulózy; 1,3 % proteinu; 1,2 % pektinu; 0,6 % vosků; 0,3 % cukrů; stopy pigmentu a 1,4 % ostatních látek. Mechanické vlastnosti vláken jsou ovlivněny tloušťkou celulózových vrstev. Tloušťka a počet celulózových vrstev jsou závislé na době růstu [19].

Specifickými vlastnostmi bavlněných vláken je ztráta pevnosti a postupné žloutnutí vlivem působení slunečního záření. Při ohřevu na teplotu 120 °C dochází ke žloutnutí vláken, při teplotě 150 °C vlákna hnědnou a při 400 °C vzplanou. Vlákna však vykazují dobré elektroizolační a tepelně izolační vlastnosti. Uplatnění vláken je pro bytové textilie, zdravotní potřeby a průmyslové využití [19].

Vlákna dodaná pro experiment byla ve formě shluků klastrů. Z těchto shluků byly na stereomikroskopu změřeny přibližné rozměry vláken. Průměr vláken se pohyboval v rozmezí 0,015 až 0,03 mm a délka přibližně 0,5 mm. Shluky klastrů vláken značně ztížily výrobu kompozitu a nebylo možné dosáhnout uspořádané orientace vláken.

6.2.2. Kokos

Kokosová vlákna jsou získávána ze střední vrstvy oplodí kokosových ořechů. Vlákna dosahují vysoké odolnosti proti otěru a působení vlhkosti. Vyhodnocování mechanických vlastností kokosových vláken je však obtížné, neboť určení plochy průřezu a délky vláken je obtížné. Současné užití kokosových vláken je pro čalounění, těsnění, izolace, lodní lana, sítě a kartáče [19].

Vlákná dodaná pro experiment byla ve formě lisovaných granulí. Tyto granule bylo nutné rozdrtit a drť následně separovat pomocí síta o velikosti 0,5 mm. Tímto způsobem byla separována vlákna o průměru přibližně 0,2 mm a délce 0,5 mm, určená pro vyztužení matrice.

6.2.3. Banán

Banánová vlákna jsou získávána ze stonku banánovníků. Charakteristická jsou svou variabilitou průřezu a mechanickými vlastnostmi, s důrazem na lomovou morfologii. Přibližné složení banánových vláken je z 31,3 % celulózy; 15 % hemicelulózy; 15,1 % ligninu; 4,5 % extraktů a 9,7 % vláhy [24].

Banánová vlákna byla k dispozici ve formě shluků klastrů, obdobně jako vlákna bavlněná. Z těchto shluků byl změřen průměr vláken přibližně 0,076 mm a délka 0,7 mm. Shluky klastrů vláken opět ztížily výrobu kompozitu a znemožnily uspořádanou orientaci vláken.

6.2.4. Ořechové skořápky

Ořechové skořápky byly k dispozici již v drceném stavu. V tomto stavu měly částice tvar lupínků o maximálních rozměrech přibližně 0,5 mm. O ořechových skořápkách jakožto konstrukčním materiálu nejsou v současné době dostupné žádné informace o aplikaci a fyzikálních a mechanických vlastnostech. Pro zjištění alespoň některé charakteristiky plniva byla změřena hustota pomocí Gay-Lussacova pyknometru.

Stanovení hustoty drcených ořechových skořápek bylo provedeno zvážením prázdného suchého pyknometru (hmotnost m_1), suchého pyknometru se skořápkami (hmotnost m_2), pyknometru s destilovanou vodou a skořápkami (hmotnost m_3) a propláchnutého pyknometru s destilovanou vodou (hmotnost m_4). Z naměřených hmotností byla následně dopočítána hustota drcených ořechových skořápek pomocí vztahu:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \rho_s}{m_4 - m_3 - m_1 + m_2}$$

Kde ρ_s je hustota 0,998 g/cm³ destilované vody při 20 °C. Naměřené hmotnosti jsou uvedeny v příloze v tab. 20. Z uvedeného vztahu byla vypočítána hustota ořechových skořápek 1,43 g/cm³. Při porovnání zjištěné hustoty s hustotou ostatních přírodních

plniv (viz kapitola 1.2.3) lze ořechové skořápky přirovnat k vláknům jutovým a sisalovým.

6.2.5. Skleněná vlákna, skleněné kuličky

Skleněná kontinuální vlákna byla poskytnuta od firmy LA Composites. Jedná se o vlákna ze skloviny E, opatřená silanovou úpravou povrchu. Průměr vláken byl 0,05 mm a dodána byla ve formě svazku. Při výrobě vzorků bylo nutné svazek vláken nastříhat na zvolenou délku (100 mm a 10 mm). Ze svazku byl oddělen určitý objem vláken, který byl zvážen a následně vkládán do formy s matricí.

Dále byly použity skleněné mikrokuličky od firmy Glass Sphere s.r.o. Kuličky byly o průměru 570 až 700 μm . Jejich aplikace je pro technické i dekorativní účely. Uplatněny mohou být jako plnivo, tryskací médium, součásti filtrů a izolací, či dekorace.

6.2.6. Ocelové třísky

Pro pokus o dosažení kvalitní adheze matrice i s ocelovým plnivem byly využity ocelové třísky z nástrojové oceli.

6.3. Označování vzorků

Vyrobené vzorky byly označovány (XX YY – ZZ) dle použité matrice (XX), stavu matrice (YY) a použitého plniva (ZZ). Např. vzorek označený PE ZS – NF CC znamená polyetylenovou matrici v základním stavu vyztuženou přírodními kokosovými vlákny. Označení plniva, matrice a stavu matrice, ve kterém byla použita, bylo zvoleno následovně:

- PE ZS polyetylen v základním stavu
- PE P plazmově modifikovaný polyetylen pomocí vzduchového pracovního plynu
- PE P1 plazmově modifikovaný polyetylen pomocí kyslíkového pracovního plynu
- M mikroten (HDPE)
- NG – NUT přírodní dřev – drcené ořechové skořápky
- NF – BA přírodní vlákno banánové
- NF – CC přírodní vlákno kokosové

- NF – CO přírodní vlákno bavlněné
- GB skleněné kuličky
- SGF krátká skleněná vlákna (10 mm)
- LGF dlouhá skleněná vlákna (100 mm)
- MF vlákna z minerálního kovu – ocelové třísky

Během experimentu byla primárně využívána matrice PE ZS a PE P. Ke konci experimentu však byla dodána i matrice s plazmovou modifikací pomocí kyslíkového pracovního plynu (PE P1) a mikroten (M). Skleněná vlákna o délce 10 mm byla v této práci označena jako vlákna krátká (SGF), vlákna o délce 100 mm jako vlákna dlouhá (LGF).

7. Návrh a výroba přípravku

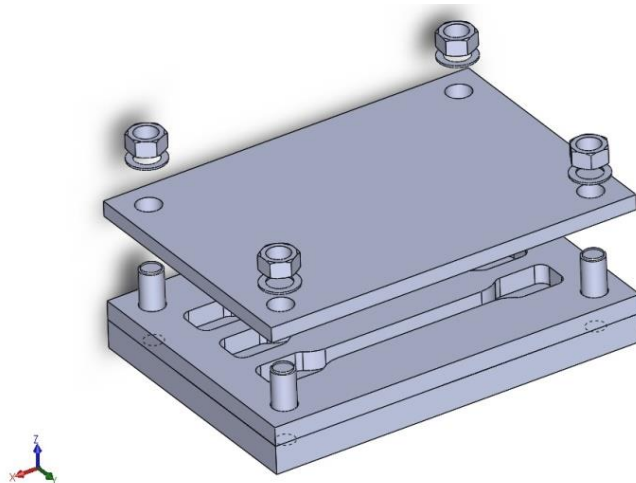
Pro realizaci experimentu bylo nutné navrhnout výrobu zkušebních vzorků. Možnosti výroby vzorků byly omezené, neboť nebyla k dispozici žádná z konvenčních technologií pro zpracování plastů a kompozitů. Možnost výroby vzorku byla pouze spékáním v peci. Pro tuto metodu výroby vzorků musel být navržen jednoduchý přípravek, který by zajistil dosažení požadovaného tvaru vzorků a jejich snadného vyjímání z formy.

7.1. Návrh přípravku

Přípravek pro výrobu zkušebních vzorků byl nejprve navržen a vymodelován v CAD softwaru SolidWorks 2014 SP5. Při návrhu konstrukce přípravku bylo nutné vycházet z výrobní technologie frézování, pomocí které byl přípravek následně vyroben a z rozměrů temperační komory pece, do které byl již vyrobený přípravek vkládán. Tvar a geometrie zkušebních vzorků byly navrženy dle normalizovaných vzorků pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 527, s ohledem na výrobní technologii a nástrojové vybavení školní CNC laboratoře. Snahou bylo také vytvořit přípravek pro výrobu co nejvíce vzorků najednou.

Dle velikosti temperační komory byly zvoleny maximální rozměry přípravku 200 × 140 × 60 mm. V navrženém přípravku lze vyrobit 3 vzorky najednou. Konstrukce přípravku je složena ze tří částí (desek), jenž umožňuje snadné rozebírání formy a vyjímání vyrobených vzorků.

Navržený 3D model přípravku je zobrazen na obr. 20. Spodní deska přípravku tvoří základnu, která je opatřena čtyřmi průchozími závitovými dírami. Do těchto děr jsou zašroubovány závrtné šrouby. Na základní desku je následně umístěna prostřední deska s vyfrézovaným profilem vzorků pro tahovou zkoušku. Deska je opatřena čtyřmi průchozími dírami, skrz které prochází závrtné šrouby. Poslední částí přípravku je vrchní deska, která je opatřena „protikusem“ vystouplým profilem vzorků. Účelem této desky je přitlačení vzorků a dosažení tak jejich rovnoměrného povrchu bez propadlin, či vyboulenin během spékání v peci. Vrchní deska je opět opatřena průchozími dírami pro závrtné šrouby. Z horní části jsou desky utaženy pomocí matic.



Obr. 20: Model sestavy přípravku v softwaru SolidWorks

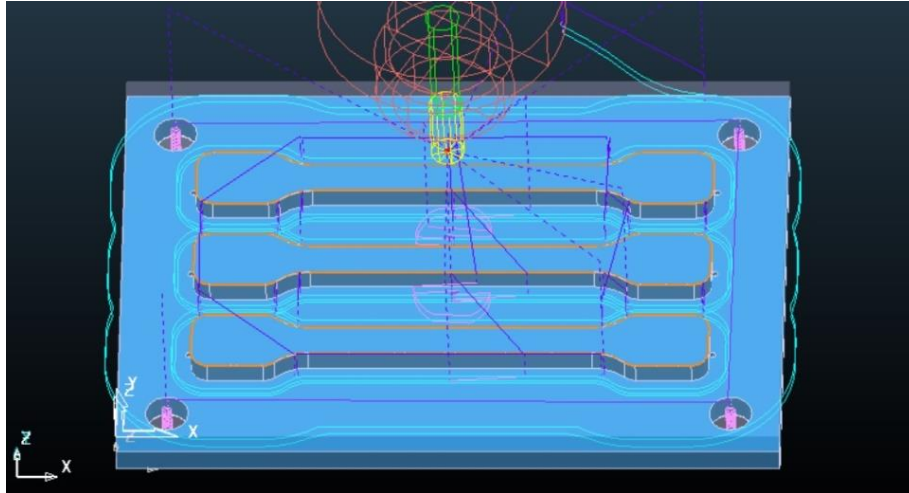
7.2. Materiál přípravku

Po vytvoření 3D návrhu bylo nutné zajistit materiál, ze kterého by byl přípravek vyroben. Původním návrhem byly hliníkové slitiny s dobrou obrobitelností, u kterých lze při frézování dosáhnout kvalitního povrchu i po vzhledové stránce. Dalším pozitivem by byla nižší hmotnost přípravku, která by zaručila jednodušší manipulaci s přípravkem, než při použití konstrukční ocele.

Hliníkové slitiny však byly dostupné pouze v metrových blocích v cenové relaci od 3000 Kč. Z hlediska spotřeby materiálu a finančních důvodů byly proto zvoleny přístříhy z pásů oceli 11 500 o rozměrech 200 × 140 × 15 mm a oceli 11 375 o rozměrech 200 × 140 × 10 mm. Jedná se o běžné konstrukční ocele s dobrou obrobitelností.

7.3. Výroba přípravku

Po nakoupení materiálu byla provedena korekce rozměrů vytvořených 3D modelů. Jednotlivé modely byly následně importovány do CAM softwaru PowerMill 2015, kde bylo provedeno jejich obrobení (obr. 21).



Obr. 21: Obrobení vrchní desky v softwaru PowerMillu

Po vytvoření NC programů následovalo obrobení zakoupených polotovarů na frézovacím centru MAS VMC 500 (obr. 22). Vzhledem k tomu, že frézovací centrum ve školní laboratoři bylo značně vytížené, zarovnání čel u vrchní a střední desky bylo v NC programech zanedbáno a bylo provedeno na magnetické brusce. Zarovnání čela a vyvrtání děr na spodní základové desce bylo také zanedbáno. Díry byly vyvrtány na sloupové vrtačce a vyříznutí závitů bylo provedeno pomocí ručních sadových závitníků.

Upnutí polotovarů na pracovní stůl frézovacího centra bylo realizováno pomocí svěráku, který bylo nutné nejprve vyrovnat úchylkoměrem. K vyrovnávání polotovarů ve svěráku byly využity broušené kvádry z nástrojové (HSS) oceli, tzv. „radeca“. Po vyrovnání svěráku a hranolů byl upnut polotovar. Po jeho upnutí byly před obráběním hranoly vyjmuty, aby nedošlo k jejich obrobení (zničení, popř. zničení nástroje).



Obr. 22: Obrábění střední desky přípravku

Pro dokončení přípravku bylo nutné vysoustružit z tyče hlazené oceli o průměru 12 mm 4 závrtné šrouby o délce 40 mm.

8. Výroba zkušebních vzorků

8.1. Příprava formy

Zhotovený přípravek bylo nutné před výrobou každé dávky zkušebních vzorků očistit brusným papírem od ulpělých zbytků roztavené matrice z předešlé výroby. Pro snadnější vyjímání vzorků byla forma ošetřena separátorem od firmy Loctite Frekote 700 NC. Nanesení separátoru bylo prováděno navlhčeným hadříkem. Po nanesení bylo nutné nechat separační povlak vytvrdnout zhruba po dobu 10 minut. Tento postup se na doporučení výrobce separátoru prováděl jednou až dvakrát.

8.2. Sestavení a plnění formy

Po přípravě jednotlivých částí formy byla na základní desku se závitovými šrouby umístěna střední deska s drážkami. Do těchto drážek byla následně nasypána matrice. Pro odzkoušení a kontrolu podmínek výroby nebyla při prvním pokusu výroby použita vrchní deska pro přitlačení prášku. Forma byla v této fázi utažena maticemi a vložena do pece s programovatelným regulátorem Ht40P, viz obr. 23. Teplotní průběh výroby byl navržen s náběhem na teplotu 160 ± 5 °C. Náběh na zvolenou teplotu trval přibližně

1 hodinu. Během náběhu na zvolenou teplotu došlo k rovnoměrnému prohřátí formy. Po dosažení zvolené teploty následovala výdrž na této teplotě po dobu 2 hodin. Po uplynutí naprogramované doby byl program automaticky vypnut a forma se vzorky byla ponechána v peci, kde pomalu vychladla.



Obr. 23: Výroba prvních vzorků (bez plniva) v peci

Po vyjmutí zhotovených vzorků z pece a následně i z formy, byla zjištěna jejich značná pórovitost a na upínacích částech vzorků byly vybouleniny (viz obr. 24). Snahou při výrobě dalších vzorků bylo tyto vady eliminovat. Toho se částečně docílilo použitím horní přítlačné desky.



Obr. 24: První vzorky bez plniva (vrchní vzorky PE plazmou modifikované, spodní vzorek PE v základním stavu)

Další vyráběné vzorky byly již plněny plnivem zmíněnými v kapitole 6.2. Po výrobě několika méně povedených sérií vzorků byl postup průběžně optimalizován až do podoby, která umožnila reprodukovatelnost výsledků. Tento postup byl prováděn následujícím způsobem.

8.3. Postup plnění formy s výztuží

Výroba vzorků probíhala odměřením 2 g prášku matrice, pomocí digitálních vah Kern 770. Toto odměřené množství bylo následně rovnoměrně nasypáno do drážky a lehce upěchováno. Odměřeno bylo dále 0,5 g plniva (přibližně 12 % hmotnostního podílu výsledného vzorku). V závislosti na druhu plniva (velikosti plniva) bylo plnivo buď rovnou rozprostřeno v drážce (skleněná, banánová, bavlněná vlákna, ocelové třísky), nebo bylo promícháno s 0,5 g matrice a poté rovnoměrně nasypáno do drážky (drcené skořápky, kokosová vlákna). Vrstva s plnivem byla opět lehce upěchována. Na poslední vrstvu bylo odměřeno 2,5 g, či 2 g matrice v závislosti na tom, zda bylo plnivo mícháno s 0,5 g matrice, či nikoliv. Odměřené množství matrice bylo opět nasypáno do drážky a lehce upěchováno. Na připravené vzorky byla položena vrchní přítlačná deska, která byla z vrchu utažena pomocí matic. Forma pak byla opět vložena do pece a spečení vzorků probíhalo za stejných podmínek, jako je uvedeno v předešlé kapitole 8.2. Tímto způsobem byly pro reprodukovatelnost výsledků a možnost jejich porovnání připravovány všechny vzorky.

Je nutné podotknout, že se během výroby nepodařilo zcela odstranit strukturní vady (pórovitost) vzorků. Problémem také bylo výrazné smršťování matrice během chladnutí. Vzhledem k dostupné technologii výroby vzorků nebylo možné nedostatek materiálu během procesu dodat, jako tomu je např. u vstřikování plastů pomocí dotlaku.

9. Testování vyrobených vzorků

Vyrobené vzorky byly nejprve podrobeny zkoušce tahem pro zjištění jejich mechanických vlastností a vytvoření lomových ploch pro přímé vyhodnocení adheze z charakteristiky lomové plochy. Dále byla provedena DSC zkouška pro ověření termických vlastností matrice.

9.1. Tahová zkouška

Tahová zkouška je statická zkouška, při níž je rovnoměrný průběh zatížení (konstantní rychlost polohování). Zkouška spočívá v deformaci zkušebních vzorků tahovým zatížením ve směru jejich hlavní podélné osy až do přetržení, nebo do dosažení zvolené hodnoty prodloužení. Pro urychlení zkoušky bývá tato zvolená hodnota překročena 50 % deformace vzorku. Během zkoušky je pomocí počítače měřena a vyhodnocována závislost zatěžující síly působící na vzorek a prodloužení vzorku (posunutí čelistí). Před

provedením zkoušky je nutné kondicionování vzorků tzn., že vzorky nesmí být vystaveny mechanickému, fyzikálnímu, či chemickému namáhání, které by mohlo výsledky zkoušek ovlivnit. Doporučené prostředí je o teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 10 % [18].

9.1.1. Provedení tahové zkoušky

Pro provedení tahové zkoušky nebyly specifické požadavky na pracovní teplotu, jako např. zkoušení materiálů za zvýšených, či nízkých teplot. Tahová zkouška byla prováděna ve stejném prostředí, jako bylo provedeno kondicionování zkušebních vzorků. Provedení tahové zkoušky bylo tedy při teplotě 22 °C a relativní vlhkosti 48 %. Před upnutím vzorků bylo provedeno měření jejich hmotnosti a rozměrů (šířka a tloušťka) ve středu zkušebního vzorku a 5 mm od konců měřené délky vzorku. Naměřené parametry vzorků před zkouškou jsou uvedeny v tabulkách č. 22 až 27 umístěných v příloze.

Zkouška mechanických vlastností vyrobených vzorků byla provedena na trhacím stroji ZD 10 Walter + Baiag: CH 8224 Löhningen (obr. 25). Počáteční vzdálenost čelistí trhacího stroje byla nastavena na 100 mm. Vložení a upnutí vzorků do čelistí stroje muselo být provedeno tak, aby byla podélná osa zkušebního vzorku shodná s osou zkušebního stroje. Upnutí v čelistech stroje muselo zajistit rovnoměrné a pevné utažení, aby nedošlo k vyklouznutí zkušebního vzorku z čelisti během zkoušky. Podmínkou pevného upnutí také bylo, aby nezpůsobilo deformaci vzorku, nebo jeho úplné rozmáčknutí. Zkušební rychlost byla zvolena 100 mm/min, dle tabulky doporučených zkušebních rychlostí uvedené v normě ČSN EN ISO 527 – 1 [18].

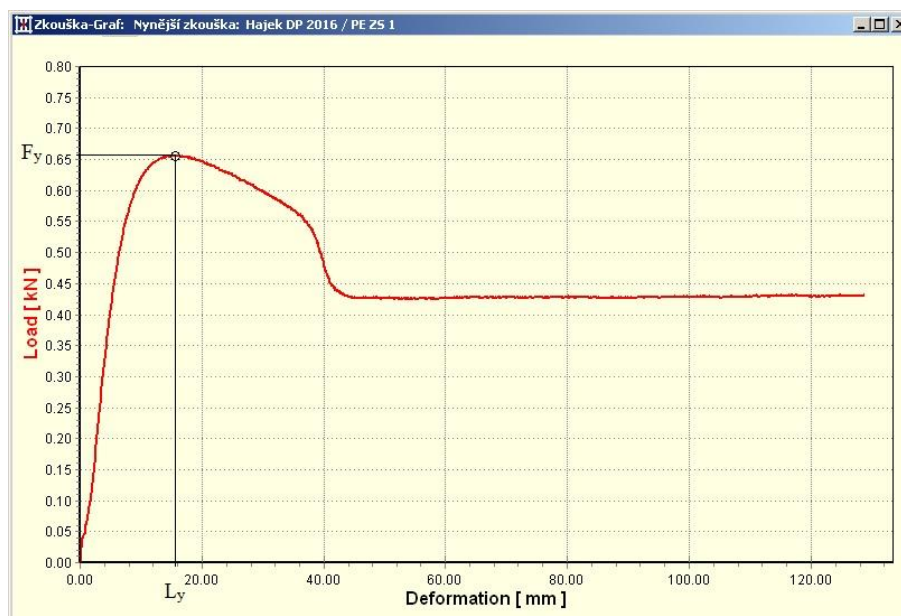


Obr. 25: Trhací stroj ZD 10 Walter + Baiag CH 8224 Löhningen

9.1.2. Výsledky tahové zkoušky

Je nutné opět zdůraznit, že vyrobené vzorky obsahovaly strukturální vady (pórovitost) a vzhledem k výraznému smršťování matrice během chladnutí se nepodařilo vyrobit vzorky splňující doporučenou tloušťku $4,0 \pm 0,2$ mm dle uvedené normy. Zkoušky provedené na zkušebních tělesech se strukturálními vadami a rozměry jinými, než jsou uvedené v normě, vedou k nepřesným výsledkům. Všechny vzorky však byly připravovány stejným postupem a za stejných podmínek. Mohlo tedy být provedeno jejich porovnání.

Průběhy zkoušky byly zaznamenány pomocí počítače, kde byla odečtena zatěžující síla F_y a přírůstek posunutí čelistí L_y (obr. 26). Výsledky tahových diagramů jsou umístěny v příloze. Zpracované výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v následujících tabulkách č. 11 až 16. Modul pružnosti zkušebních vzorků nemohl být vyhodnocen, jelikož nebyl k dispozici průtahoměr.



Obr. 26: Diagram tahové zkoušky vzorku PE ZS bez plniva

Pro výpočet mechanických vlastností byly použity vztahy:

$$\sigma_y = \sigma_m = \frac{F_y}{S}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_m = \frac{L_y}{L_0}$$

Dle charakteru průběhu tahové zkoušky (viz obr. 26) je zatěžující síla na mezi kluzu F_y rovna mezi pevnosti F_m . Platí tedy, že i napětí na mezi kluzu σ_y a jmenovité poměrné prodloužení na mezi kluzu ε_y jsou rovny mezi pevnosti σ_m a jmenovitému poměrnému prodloužení na mezi pevnosti ε_m [18]. Průřez zkušebních vzorků je označen S . Počáteční délka čelistí je označena L_0 . Pro vypovídající hodnotu výsledků byly soubory dat statisticky vyhodnoceny v softwaru Microsoft Excel. Vyhodnocení bylo provedeno výpočtem aritmetického průměru a směrodatné odchylky.

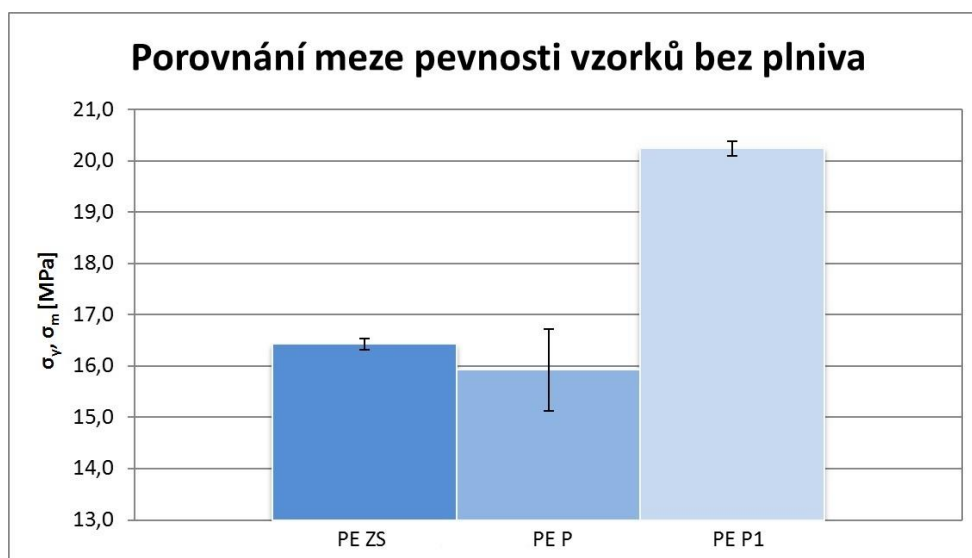
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Aritmetický průměr \bar{x} udává průměrnou hodnotu souboru dat. Směrodatná odchylka σ vyjadřuje, jak moc se od sebe vzájemně liší hodnoty v souboru dat. Je-li směrodatná odchylka malá, bylo dosaženo podobných hodnot. V opačném případě vyjadřuje velké odlišnosti hodnot. Lze tedy říci, že čím menší směrodatné odchylky je dosaženo, tím přesnější a věrohodnější dosažené výsledky jsou.

Tab. 11: Výsledné hodnoty vzorků bez plniva

Vzorek	σ_y [MPa]	ϵ_y [-]
PE ZS	16,4 ± 0,1	0,12 ± 0,05
PE P	15,9 ± 0,8	0,12 ± 0,03
PE P1	20,2 ± 0,1	0,13 ± 0,01



Obr. 27: Porovnání meze pevnosti vzorků bez plniva

Tab. 12: Výsledné hodnoty vzorků s kokosovými vlákny

Vzorek	σ_y [MPa]	ϵ_y [-]
PE ZS – NF CC	14,6 ± 0,9	0,07 ± 0,01
PE P – NF CC	15,2 ± 0,8	0,06 ± 0,01
PE P1 – NF CC	15,9 ± 0,7	0,07 ± 0,01

Tab. 13: Výsledné hodnoty vzorků s drcenými ořechovými skořápkami

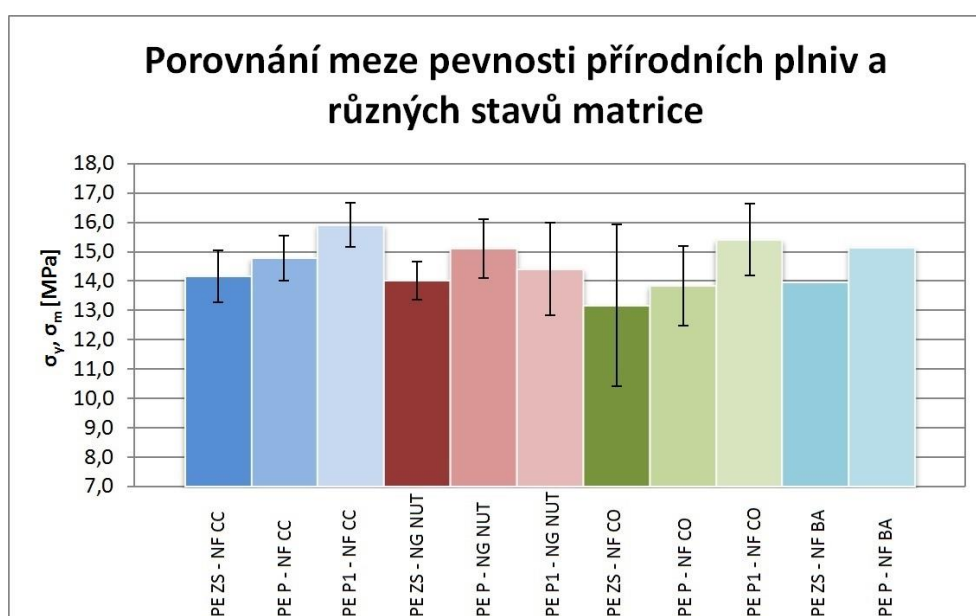
Vzorek	σ_y [MPa]	ϵ_y [-]
PE ZS – NG NUT	15,0 ± 0,6	0,08 ± 0,01
PE P – NG NUT	16,0 ± 1,0	0,08 ± 0,02
PE P1 – NG NUT	15,4 ± 1,6	0,07 ± 0,02

Tab. 14: Výsledné hodnoty vzorků s bavlněnými vlákny

Vzorek	σ_y [MPa]	ϵ_y [-]
PE ZS – NF CO	14,2 ± 1,0	0,07 ± 0,01
PE P – NF CO	13,8 ± 1,4	0,06 ± 0,01
PE P1 – NF CO	15,4 ± 1,2	0,05 ± 0,01

Tab. 15: Výsledné hodnoty vzorků s banánovými vlákny

Vzorek	σ_y [MPa]	ϵ_y [-]
PE ZS – NF BA	14,0	0,08
PE P – NF BA	15,1	0,07



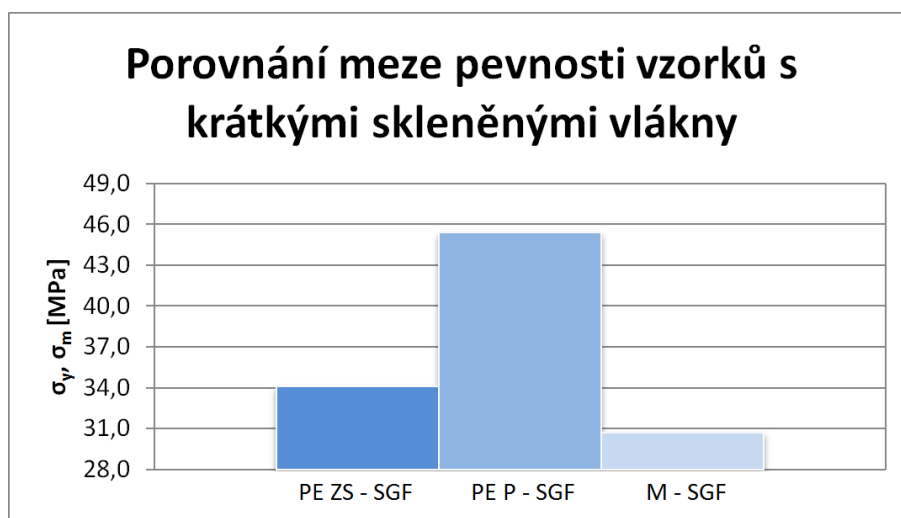
Obr. 28: Porovnání meze pevnosti vzorků s přírodním plnivem a různými stavy matrice

Zkouška tahem měla ukázat rozdílné mechanické vlastnosti dané zlepšením adheze plniva a matrice při použití plazmou modifikované matrice. Z výsledků tahové zkoušky vyplývá, že je mez pevnosti u vzorků s modifikovanou matricí srovnatelná se vzorky s matricí v základním stavu. U všech vzorků s plazmově modifikovanou matricí bylo dosaženo lepších výsledků. Zlepšení je však z hlediska pevnosti nevýrazné (viz obr. 28). Při porovnání základního stavu matrice a plazmově modifikovaných stavů, bylo při použití plazmové modifikace s kyslíkem dosaženo zlepšení u kokosových vláken o 8,9 % a u bavlněných vláken o 8,5 %. Při použití plazmové modifikace se vzduchem bylo dosaženo zlepšení u drcených ořechových skořápek o 6,7 % a u banánových vláken o 7,9 %. Nutné je podotknout, že přidáním přírodního plniva do matrice nebylo

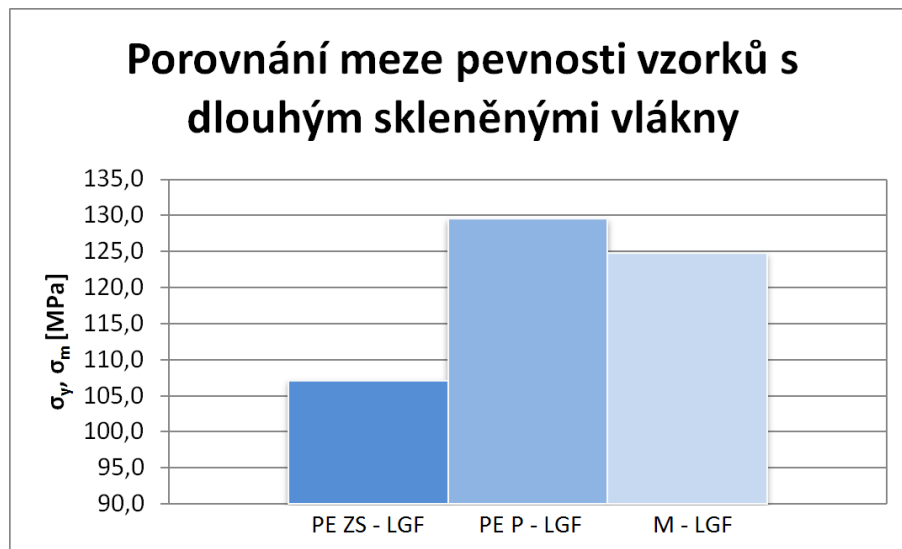
dosaženo zpevnění materiálu. Samotná matrice dosahovala větší pevnosti než kompozit s přírodním plnivem. Aplikace kompozitů s přírodními plnivými je pro méně namáhané součásti, uplatnění nacházejí zejména pro interiéry a exteriéry osobních automobilů a jiných dopravních prostředků.

Tab. 16: Výsledné hodnoty dalších pokusných vzorků s plnivem ve formě skleněných kuliček, skleněných vláken a ocelových třísek

Vzorek	σ_y [MPa]	ϵ_y [-]
PE ZS – GB	14,0	0,09
PE P – GB	13,8	0,12
PE ZS – SGF	34,1	0,04
PE P – SGF	45,4	0,05
PE ZS – LGF	107,1	0,07
PE P – LGF	129,5	0,08
PE ZS – MF	17,8	0,11
PE P – MF	15,5	0,10
M – MF	11,5	0,06
M – SGF	30,8	0,04
M – LGF	124,8	0,13



Obr. 29: Porovnání meze pevnosti vzorků s krátkými skleněnými vlákny a různými stavy matrice



Obr. 30: Porovnání meze pevnosti vzorků s dlouhými skleněnými vlákny a různými stavy matrice

Při pokusech s dalšími plnivými bylo dosaženo již výraznějšího zlepšení mechanických vlastností u vzorků s plazmově modifikovanou matricí pomocí vzduchu a krátkými a dlouhými skleněnými vlákny (obr. 29 a 30). U krátkých skleněných vláken bylo dosaženo zlepšení až o 33,1 %, u dlouhých vláken o 20,9 %. U vzorků s dlouhými vlákny jsou naměřené výsledky ovlivněny počtem a soudržností vláken ve svazku a ne adhezí k matrici. Během tahové zkoušky docházelo k tažení vláken společně s matricí. Zkouška vzorků s dlouhými vlákny byla dále ovlivněna chybou, kdy při zkoušce došlo k přetržení zkušebního vzorku v upínacích čelistech stroje. Porovnány tedy mohly být pouze maximální dosažené hodnoty (obr. 30).

Pro porovnání adheze skleněných vláken a ocelových třísek i s jiným druhem matrice bylo vyrobeno několik vzorků s mikrotenem (HDPE), který je znám svou dobrou adhezí k jiným materiálům. Porovnáme-li rozdíly v HDPE a PE – LLD, makromolekuly HDPE mají menší počet kratších větví, než PE – LLD, čímž dosahuje silnějších mezimolekulárních vazeb a vyšší krystalinity. HDPE by tedy měl dosahovat větší pevnosti v tahu než PE – LLD. Z výsledků mechanických zkoušek ale vyplývá, že při použití HDPE matrice bylo dosaženo horších výsledků, až na výjimku u dlouhých skleněných vláken (obr. 30).

Správnost výsledků všech pokusných vzorků nemohla být ověřena a statisticky vyhodnocena z důvodu omezeného počtu vyrobených vzorků. Výsledky mechanických

vlastností nejsou pro tento výzkum nejdůležitější. Přetržením vzorků byly vytvořeny lomové plochy pro vyhodnocení adheze na mikroskopu.

9.2. Vytrhávací (pull-out) test

Pro další možnost vyhodnocení adheze byl proveden pokus o vytvoření vzorků pro vytrhávací test (zmíněný v kapitole 3.3.1.). K výrobě vzorků byl použit plechový přípravek.

9.2.1. Příprava formy

Přípravek pro výrobu vzorků pro vytrhávací test byl ošetřen separátorem obdobně, jako tomu bylo při výrobě vzorků pro tahovou zkoušku (viz kapitola 8.1.). Přípravek byl dále vypodložen pečícím papírem pro snadnější vyjmutí vzorků z formy a snížení rizika přetržení vláken během vyjímání spečených vzorků z formy. Pečící papír byl také využit pro vytvoření mezery mezi jednotlivými upínacími částmi vzorků.

9.2.2. Výroba vzorků

Výroba vzorků byla provedena nasypáním matrice do přípravku v takovém množství, aby výška nasypané a lehce upěchované matrice byla přibližně 7 mm. Následovalo vložení vláken. Práce s jednotlivými skleněnými vlákny byla značně obtížná. Zároveň bylo vysoké riziko jejich přetržení při manipulaci, vyjímání vzorků z formy či upínání do trhacího stroje. Pro vzorky byly tedy použity svazky vláken. Ze svazku však nebylo možné určit přesný počet vláken. Proto byl odříznut jeden velký svazek o délce 15 mm. Tento svazek byl rozdělen na menší svazky se stejnou hmotností 0,02 g, které byly použity pro jednotlivé vzorky. Po vložení byly svazky vláken zasypany matricí, tak aby bylo po lehkém upěchování dosaženo výšky vzorku přibližně 14 mm.



Obr. 31: Pokusné vzorky pro vytrhávací test

9.2.3. Provedení testu

Vytrhávací test byl proveden na trhacím stroji, na kterém byly provedeny tahové zkoušky v předešlé kapitole 9.1. Upínání vzorků do čelistí stroje bylo problematické a stále bylo vysoké riziko přetržení vláken před provedením zkoušky. Po úspěšném upnutí vzorků byl test ukončen přetržením svazku vláken. Z průběhu zkoušky nebylo možné jednoznačně určit, zda došlo k částečnému vytahování vláken z matrice, nebo jestli nedocházelo k vytahování již přetržených vláken ze svazku. Nicméně vyrobené a přetržené vzorečky umožnily další vyhodnocení lomové plochy. V tomto případě byla i vysoká pravděpodobnost výskytu ulpělých kapek matrice na vláknech. Tvar kapky ulpělé na vláknu by měl výraznou vypovídající hodnotu, zda bylo dosaženo dobré, či špatné adheze.

9.3. Měření hustoty a navlhavosti vzorků

Hustota a navlhavost vzorků byly změřeny až po tahové zkoušce na odříznutých částech přetržených vzorků. Důvodem bylo, že i přítomnost malého množství vody ve struktuře polymeru může vést ke snížení pevnosti a zvýšení tažnosti materiálu, jelikož při zatížení vzorku působí voda jako mazivo a usnadňuje vzájemné posouvání makromolekul a průběh deformace. Vzhledem k tomu, že vyrobené vzorky byly pórovité, bylo vysoké riziko navlhavosti.

9.3.1. Příprava vzorků

Po provedení tahové zkoušky byly ze zkušebních vzorků odříznuty části s lomovou plochou o délce zhruba 10 mm, tyto části byly dále předmětem vyhodnocování

v kapitole 10. Z upínacích částí vzorků bez plniva byly dále vyříznuty malé části matrice (zhruba $5 \times 5 \times 2$ mm) pro DSC zkoušku (kapitola 9.4.). Zbylé části zkušebních vzorků byly využity pro měření hustoty a navlhavosti vzorků.

9.3.2. Měření hustoty

Hustota vyrobených vzorků byla měřena imerzní metodou, pomocí digitálního hustoměru Mirage SD 200L (obr. 32). Měření bylo prováděno zvážením vzorku na vzduchu a uložení hodnoty. V dalším kroku byl vzorek umístěn do ponořené mřížky v destilované vodě, kde byl opět zvážen a hodnota uložena. Z uložených hodnot byla automaticky vypočítána výsledná hustota vzorku. Naměřené hustoty vyrobených vzorků jsou umístěny v příloze v tabulkách č. 22 až 27 s ostatními změřenými charakteristikami jednotlivých vzorků. V tab. 17 jsou uvedeny průměrné hodnoty změřených hustot vzorků.

Tab. 17: Průměrné hodnoty změřených hustot vzorků

Vzorek	ρ [g/cm ³]
PE ZS	0,906 ± 0,037
PE P	0,913 ± 0,007
PE P1	0,926 ± 0,004
PE ZS – NF CC	0,935 ± 0,012
PE P – NF CC	0,945 ± 0,013
PE P1 – NF CC	0,933 ± 0,003
PE ZS – NG NUT	0,929 ± 0,005
PE P – NG NUT	0,935 ± 0,010
PE P1 – NG NUT	0,922 ± 0,005
PE ZS – NF CO	0,895 ± 0,017
PE P – NF CO	0,884 ± 0,024
PE P1 – NF CO	0,916 ± 0,013
PE ZS – NF BA	0,878 ± 0,030
PE P – NF BA	0,860 ± 0,002
PE ZS – GB	1,022 ± 0,031
PE P – GB	1,076 ± 0,023
PE ZS – SGF	0,996 ± 0,001
PE P – SGF	0,988 ± 0,006
PE ZS – LGF	1,005 ± 0,031
PE P – LGF	1,016 ± 0,026
PE ZS – MF	1,004
PE P – MF	1,010
M – MF	1,032
M – SGF	0,965
M – LGF	0,977



Obr. 32: Digitální hustoměr Mirage SD 200L

9.3.3. Měření navlhavosti

Po změření hustoty byly vzorky zváženy a ponořeny do kádinky s destilovanou vodou. V kádince byly ponechány 7 dní. Po uplynutí této doby byly vzorky vyjmuty, osušeny, zváženy a opět ponořeny po dobu dalších 7 dní. Po výsledných 14 dnech byly vzorky vyjmuty a zváženy naposled. Naměřené hmotnosti jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 18: Hodnoty změřené navlhavosti

Vzorek	$m_{1. \text{ den [g]}}$	$m_{7. \text{ den [g]}}$	$m_{14. \text{ den [g]}}$	Navlhavost [%]
PE ZS	2,715	2,721	2,724	0,3
PE ZS	2,120	2,123	2,124	0,2
PE P	1,035	1,041	1,045	1,0
PE P	1,299	1,305	1,307	0,6
PE P	2,548	2,552	2,555	0,3
PE P1	1,845	1,853	1,856	0,6
PE P1	2,341	2,346	2,348	0,3

Z výsledků je patrné, že vzorky jsou navlhavé. Polyetylen však patří mezi nenavlhavé polymery. Změřená navlhavost může být důsledkem pórovitosti vyrobených vzorků.

9.4.DSC zkouška

Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) je metoda, při níž jsou zkoumány termické vlastnosti polymerů a jejich směsí. Tyto vlastnosti byly zkoumány z důvodu ověření,

zda je plazmová modifikace matrice neovlivnila a z důvodu optimalizace podmínek zpracování zkušebních vzorků.

Zkouška spočívá ve vystavení kelímku se zkušebním vzorkem a referenčním kelímkem (etalonem) řízenému teplotnímu režimu (ohřevu a ochlazení) s definovanou rychlostí. Signál související s fázovou změnou ve vzorku je pak zapříčiněn momentální rozdílnou teplotou vzorku a etalonu, kterou se přístroj snaží okamžitě kompenzovat. Metoda umožňuje stanovit stupeň krystalizace na základě zjištěné entalpie tání polymeru. Touto metodou lze obecně určit teplotu tání, skelného přechodu a krystalizace. Průběh měření a vyhodnocení je zpracovávané počítačem [23].

9.4.1. Příprava vzorků

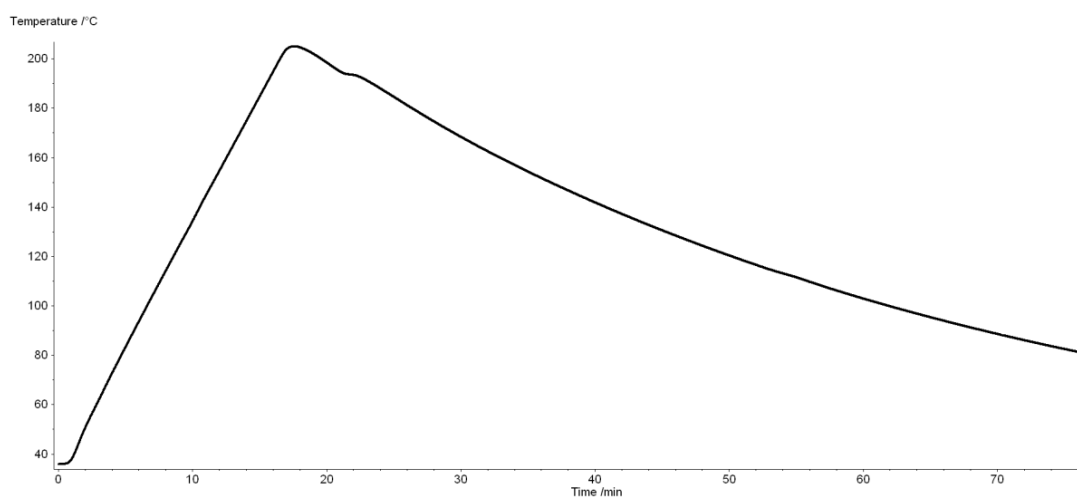
Odříznuté části vzorků bez plniva (již zmíněné v kapitole 9.3.1.) byly vybrušovány do plochého tvaru pomocí brusného papíru a ocelových přípravků tak, aby dosahovaly doporučené hmotnosti 10 až 20 mg a odpovídaly dalším podmínkám pro provedení DSC zkoušky dle normy ČSN EN ISO 11357. Před provedením zkoušky byly vzorky kondicionovány obdobně, jako tomu bylo u vzorků před tahovou zkouškou. Kondicionování proběhlo při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 10 % po dobu jednoho dne. Kondicionované vzorky byly následně pomocí pinzety vloženy do kelímků Netzsch DSC (Al; 25 μ l), ve kterých byly uzavřeny pomocí víka Netzsch DSC (Al). Jako etalon byl použit prázdný kelímek.

9.4.2. Provedení DSC zkoušky

Zkouška byla provedena na přístroji Netzsch STA 409 PG Luxx (obr. 33), v dusíkové atmosféře. Přístroj byl zapnut hodinu před provedením zkoušky, aby dosáhl ustáleného stavu. Připravené kelímky se vzorkem a etalonem byly pinzetou vloženy do přístroje za laboratorní teploty 25 °C. Po ustálení přístroje a vložení kelímků byl nastaven teplotní režim zobrazený na obr. 34.



Obr. 33: Přístroj Netzsch STA 409 PG Luxx

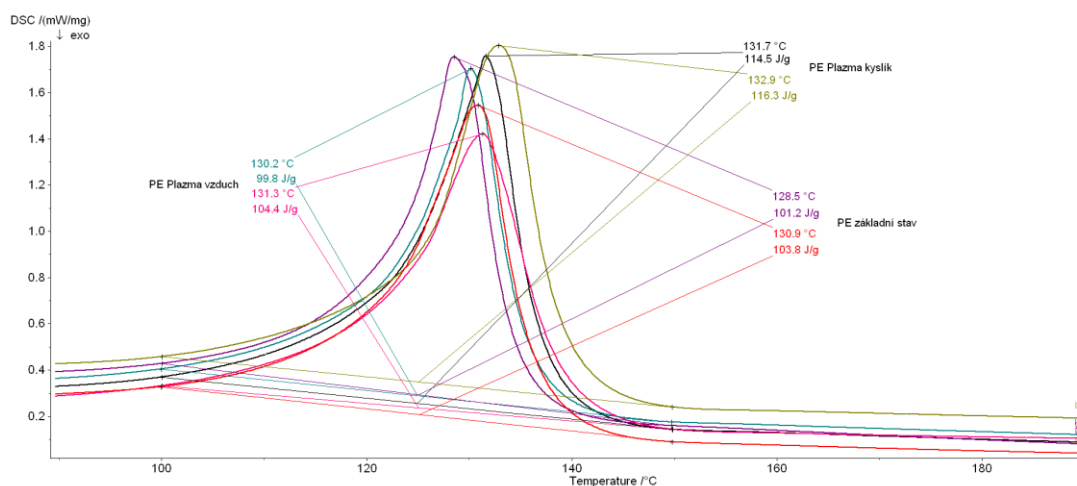


Obr. 34: Teplotní režim DSC zkoušky

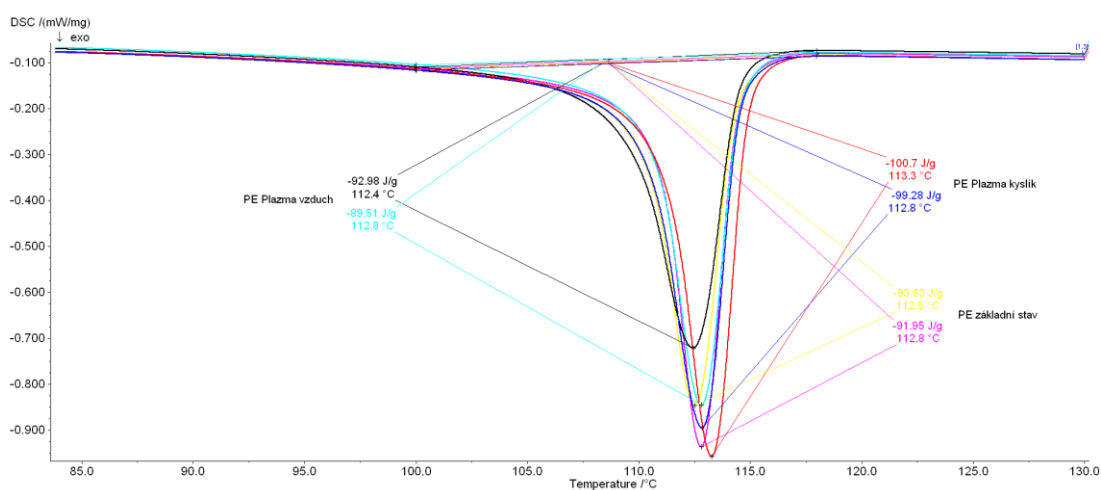
Po ukončení režimu a ustálení teploty na laboratorní byly vzorky pinzetou odebrány z přístroje.

9.4.3. Vyhodnocení DSC zkoušky

Zkouška byla zaznamenána a vyhodnocena pomocí softwaru Netzsch Proteus – thermal analysis. Při vyhodnocování bylo nastaveno měřítko, tak aby pík (z anglického slova „peak“ – odchýlení DSC křivky od základní čáry zkušební vzorku k maximu, popř. minimu a navrácení k základní čáře) pokrýl alespoň 25 % celého měřítka. Entalpie tání byla zjištěna v rozmezí teplot 100 až 150 °C, viz obr. 35. Entalpie krystalizace byla zjištěna v rozmezí teplot 100 až 118°C, viz obr. 36. U každého píku bylo stanoveno jeho maximum, tedy maximální teplota a entalpie. Naměřené maxima a minima jsou uvedeny v tab. 19.



Obr. 35: DSC - vyhodnocení teploty tání (endotermický pík)



Obr. 36: DSC - vyhodnocení teploty krystalizace (exotermický pík)

Tab. 19: Výsledky DSC zkoušky

	T_m [°C]	ΔH_m [J/g]	T_k [°C]	ΔH_k [J/g]
PE ZS	128,5	101,2	112,5	-93,63
	130,9	103,8	112,8	-91,95
PE P	130,2	99,8	112,4	-92,98
	131,3	104,4	112,8	-89,51
PE P1	131,7	114,5	112,8	-99,28
	132,9	116,3	113,3	-100,7

Z výsledků vyplývá, že se u teploty tání vzorky s matricí v základním stavu výrazně neliší od vzorků s plazmovou modifikací. Rozdíly teplot a entalpií jsou minimální. Výraznějšího rozdílu potřebné energie bylo dosaženo u matrice s plazmovou modifikací

pomocí kyslíku, kde byla potřebná energie o 13 J/g vyšší než u ostatních vzorků. To znamená, že u takto modifikované matrice bylo dosaženo vyšší krystalinity, tedy dokonalejšího uspořádání makromolekul.

U stanovení teploty krystalizace se vzorky s matricí v základním stavu a plazmově modifikovaném stavu také výrazně nelišily. Při porovnání entalpií krystalizace bylo opět dosaženo výraznějšího rozdílu u matrice s plazmovou modifikací pomocí kyslíku.

Při porovnání získaných hodnot s hodnotami uvedenými v materiálovém listu DOWLEX 2629.10 se teploty tání obou stavů matrice liší přibližně o 6 °C. Teplota krystalizace se liší o 2 °C. Rozdíl je zapříčiněn tím, že v materiálovém listu jsou uvedeny hodnoty prášku. Naměřené hodnoty vzorků byly jiné, neboť už byl prášek matrice jednou zpracován.

10. Vyhodnocování lomové plochy

Vyhodnocení lomových ploch přetržených vzorků bylo provedeno nejprve na stereomikroskopu. Pro detailnější snímky byl použit elektronový mikroskop. Díky ojedinělé příležitosti bylo možno pořídit i několik snímků na digitálním mikroskopu VHX – 5000 od firmy Keyence.

10.1. Stereomikroskopie

Stereomikroskopie je jednodušší a méně náročnou metodou umožňující studium mikrostruktury zkoumaných objektů. Mikrostruktura je studována pomocí světelného mikroskopu, který zároveň používá jeden objektiv s velkým poloměrem a dva okuláry. Dochází tak k tvorbě dvou nezávislých rovnoběžných optických kanálů, které procházejí objektivem. Optické kanály tvoří optickou cestu, kterou prochází světelný paprsek [20].

Stereomikroskopy jsou charakteristické menším zvětšením, většími pracovními vzdálenostmi a výraznou hloubkou ostrosti. V praxi platí, že s rostoucím zvětšením klesá hloubka ostrosti [20].

Vyhodnocení lomových ploch zkušebních vzorků proběhlo na stereomikroskopu Nikon SMZ 1500 a v softwaru NIS Elements (obr. 37), ve kterém byl promítán obraz ze stereomikroskopu. V softwaru byly následně pořízeny a upraveny snímky. Úprava

snímku spočívala v nastavení zaostření, kontrastu, jasu a přidáním měřítka, popř. poznámek přímo do pořízených snímků.



Obr. 37: Stereomikroskop Nikon SMZ 1500 připojený k počítači se softwarem NIS Elements

10.1.1. Lomové plochy ze zkoušky tahem

Ze snímků lomových ploch nebyl při porovnání matrice v základním stavu a plazmově modifikovaném stavu pozorovatelný výraznější rozdíl v adhezi. Z lomových ploch vyrobených vzorků tedy nebylo možné jasně určit, zda při použití plazmově modifikované matrice opravdu došlo ke zlepšení adheze s vlákny.

Známky dobré adheze jsou u vzorků s kokosovými vlákny viditelné pouze u matrice s plazmovou modifikací pomocí kyslíku (obr. 38). Na snímku je v červeně znázorněné oblasti č. 1 vidět vytažení části vlákna společně s matricí. V oblasti č. 2 je vidět vytažení ulpělé matrice na vlákne. Na ostatních uvedených snímcích (obr. 39 a 40) jsou viditelné pouze známky špatné adheze (oblast č. 3 vytahování matrice okolo vláken, či krátery u vytažených vláken v oblasti č. 4).



Obr. 38: Snímek lomové plochy kompozitu s kokosovými vlákny a matricí s plazmovou modifikací pomocí kyslíku



Obr. 39: Snímek lomové plochy kompozitu s kokosovými vlákny a matricí s plazmovou modifikací pomocí vzduchu



Obr. 40: Snímek lomové plochy kompozitu s kokosovými vlákny a matricí v základním stavu

U snímků s drcenými ořechovými skořápkami jsou viditelné známky dobré adheze u všech stavů matrice, neboť jsou na skořápkách vidět ulpělé částčky matrice, které byly dále vytahovány (obr. 41, 42, 43). Znamky dobré adheze jsou viditelné zejména u obou stavů plazmové modifikace matrice (obr. 41, 42). Na snímcích jsou tyto oblasti označeny č. 1. Jsou zde vidět vytahované skořápky společně s matricí. Na obr. 43 jsou u matrice v základním stavu viditelné krátery (oblast č. 2), jež jsou naopak známkou špatné adheze.



Obr. 41: Snímek lomové plochy kompozitu s drcenými ořechovými skořápkami a matricí s plazmovou modifikací pomocí kyslíku



Obr. 42: Snímek lomové plochy kompozitu s drcenými ořechovými skořápkami a matricí s plazmovou modifikací pomocí vzduchu

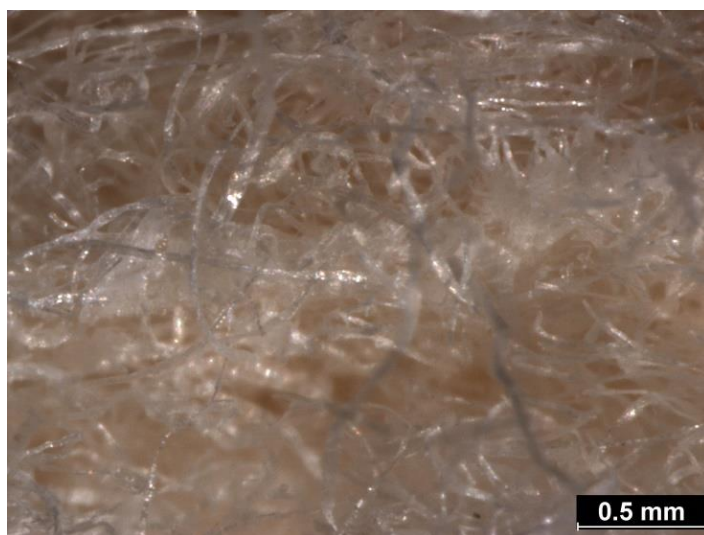


Obr. 43: Snímek lomové plochy kompozitu s drcenými ořechovými skořápkami a matricí v základním stavu

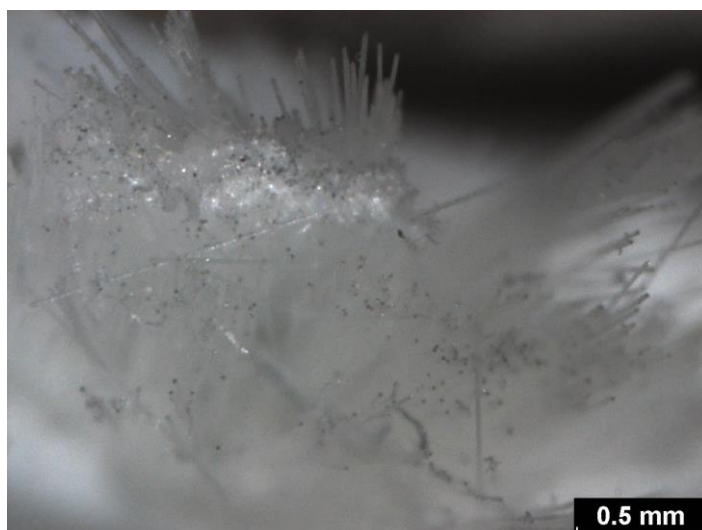
U vzorků s bavlněnými, banánovými a skleněnými vlákny bylo na stereomikroskopu obtížné nalézt a zachytit místa, kde by bylo možné adhezi vláken a matrice vyhodnotit (obr. 44, 45, 46).



Obr. 44: Snímek lomové plochy kompozitu s bavlněnými vlákny a matricí s plazmovou modifikací pomocí kyslíku



Obr. 45: Snímek lomové plochy kompozitu s banánovými vlákny a matricí v základním stavu

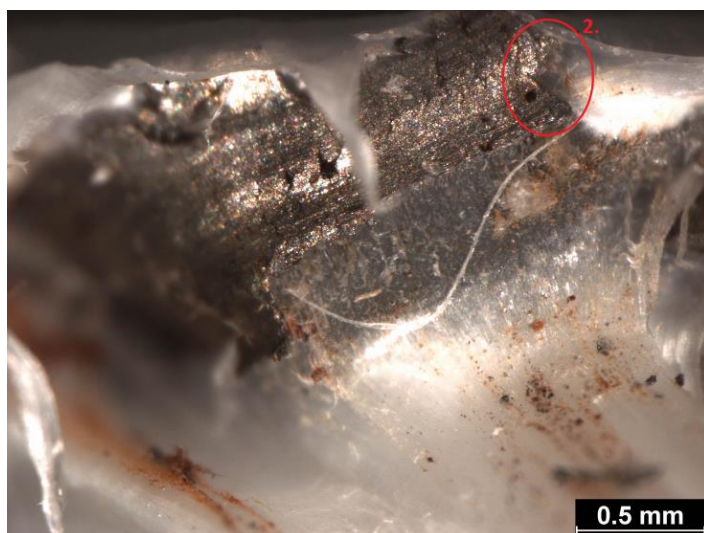


Obr. 46: Snímek lomové plochy kompozitu se skleněnými vlákny a matricí s plazmovou modifikací pomocí vzduchu

Pokusy byly také provedeny se vzorky plněnými ocelovými třískami. U těchto vzorků jsou vidět pouze známky špatné adheze (obr. 47 a 48). Na obou snímcích je č. 2 označena oblast, kde docházelo k vytahování matrice okolo třísek. Jsou zde vidět také krátery, jež svědčí o špatné adhezi. Na obr. 47 je v oblasti č. 1 vidět vytahovaná matrice. Nelze však říci, zda je matrice vytahována zpod třísky, či z ulpělé matrice ze strany třísky. Pokud by matrice byla vytahována ze strany třísky, byla by to jediná známka dobré adheze, ze všech pořízených snímků s tímto plnivem.



Obr. 47: Snímek lomové plochy kompozitu s ocelovými třískami a matricí s plazmovou modifikací pomocí vzduchu



Obr. 48: Snímek lomové plochy kompozitu s ocelovými třískami a matricí v základním stavu

Pro porovnání adheze u ocelových třísek a skleněných vláken i s jiným druhem matrice, bylo vyrobeno několik vzorků s mikrotenem (HDPE), který je znám svou dobrou adhezí k jiným materiálům. U skleněných vláken bylo opět obtížné nalézt a zachytit místa pro vyhodnocení adheze, jak už bylo zmíněno výše. U ocelových třísek jsou na snímku (obr. 49) viditelné pouze známky špatné adheze, ve formě kráterů okolo ocelové třísky. Tak tomu bylo i v předchozích případech s PE – LLD matricí v základním stavu a plazmově modifikovaném stavu.

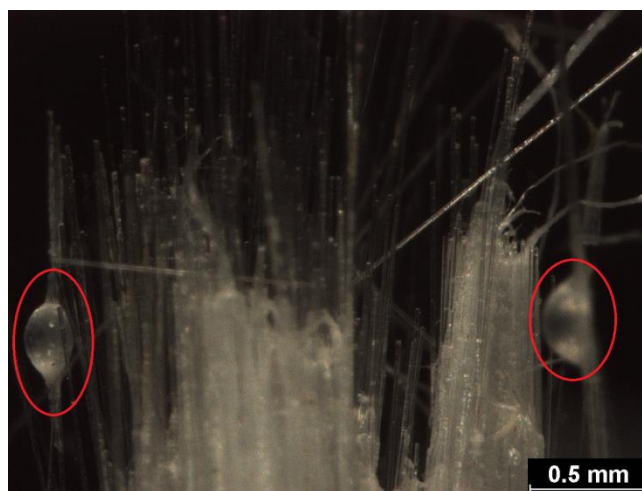


Obr. 49: Snímek lomové plochy kompozitu s ocelovými třískami a mikrotenovou matricí

10.1.2. Lomové plochy z vytrhávacího test

U pokusných vzorků z vytrhávacího testu se podařilo zachytit snímky s kapkami matrice ulpělé na vlákne. Z těchto snímků bylo možné dle tvaru kapky určit, zda bylo dosaženo dobré adheze u skleněných vláken a matrice a v jakém stavu matrice bylo dosaženo lepší adheze.

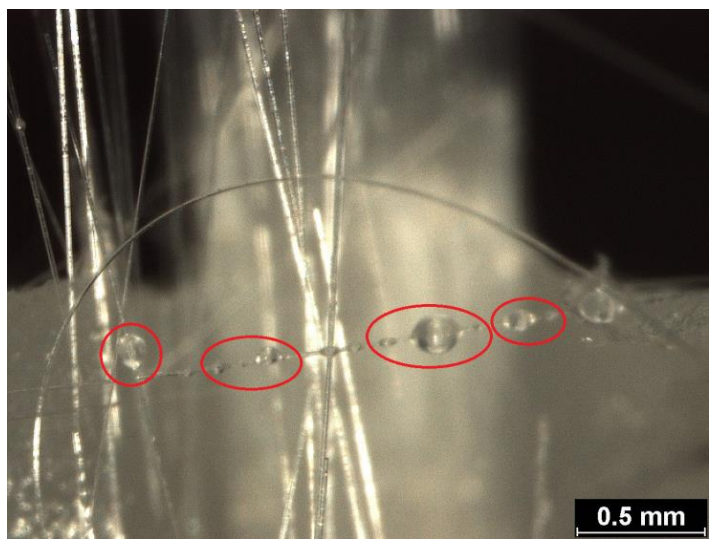
Ze snímků (obr. 50, 51, 52) je viditelné, že kapky matrice jak v základním stavu, tak v plazmově modifikovaném stavu dosahují dobré adheze. Při porovnání jednotlivých snímků lze pozorovat, že u matrice v základním stavu dosahují kapky nepatrně ploššího tvaru na skleněném vlákně (menšího úhlu smáčivosti). Na základě těchto výsledků lze tedy konstatovat, že plazmová modifikace matrice v tomto případě nevedla ke zlepšení adheze.



Obr. 50: Snímek skleněných vláken a ulpělých kapek matrice v základním stavu



Obr. 51: Snímek skleněných vláken a ulpělých kapek matrice v plazmově modifikovaném stavu pomocí vzduchu



Obrázek 52: Snímek skleněných vláken a ulpělých kapek matrice v plazmově modifikovaném stavu pomocí kyslíku

Všechny pořízené snímky ze stereomikroskopu jsou umístěny v příloze na disku.

10.2. Elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie je náročnější, avšak daleko detailnější metodou pro studium mikrostruktury zkoumaných objektů. Mikrostruktura je studována ve vakuu pomocí elektronového svazku, který vzniká emisí elektronů z katody, jež jsou dále urychlovány k anodě. Svazek je zaostřován vhodně upraveným elektrickým, magnetickým nebo

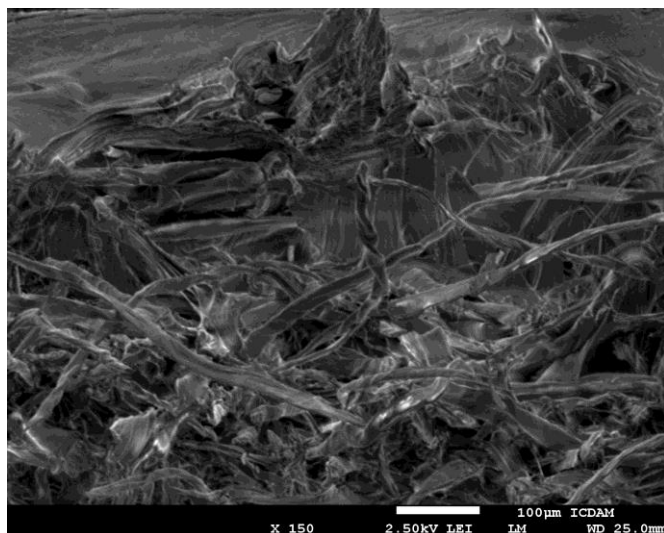
elektromagnetickým polem, aby bylo dosaženo požadovaného zvětšení. Elektronový svazek vytváří obraz interakcemi s pozorovaným preparátem [21].

Vyhodnocení vzorků proběhlo na skenovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSN 7600F. U skenovacích elektronových mikroskopů dopadají elektrony na pozorovaný preparát a interakcí s hmotou vyraží ze vzorku elektrony. Tyto elektrony jsou pomocí vhodného potenciálu přitahovány na detektory, které vytváří signál upravený pro zpracování v zobrazovacím systému. Zobrazovacím systémem může být obrazovka, na které se vytváří příslušný obraz vzniklý rastrováním elektronového paprsku po snímané ploše. Výsledným obrazem je snímek, který zachycuje povrchovou strukturu preparátu [21].

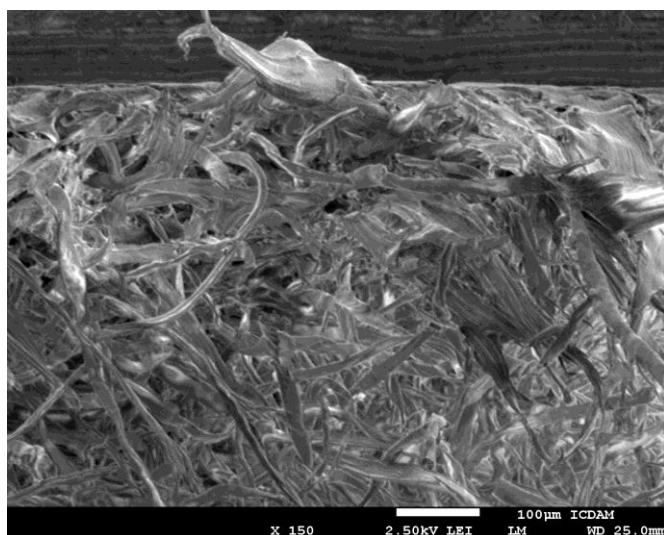


Obr. 53: Elektronový mikroskop JEOL JSN 7600F [Jeol]

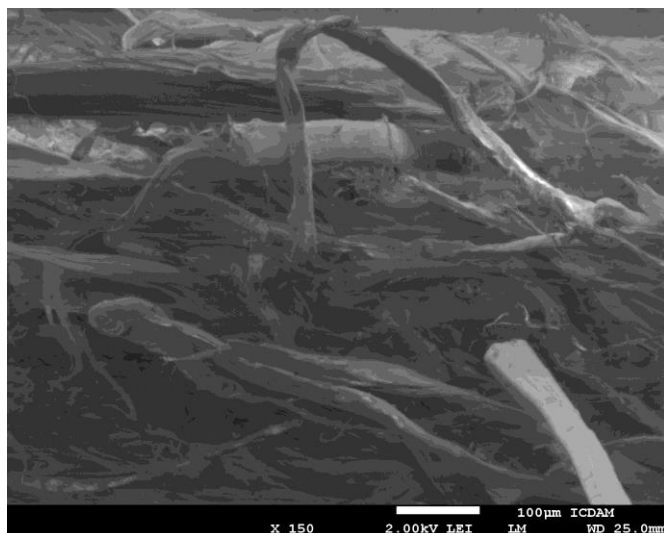
Elektronová mikroskopie byla použita u vzorků, u kterých bylo obtížné nalézt a zachytit místa pro vyhodnocení adheze vláken a matrice, pomocí stereomikroskopu. Zkoumány tedy byly vzorky s bavlněnými a banánovými vlákny. Pořízené snímky z elektronové mikroskopie však nepřispěly u těchto vzorků k prokázání adheze. Na snímcích není nikde viditelná známka spojení vlákna a matrice pro vyhodnocení.



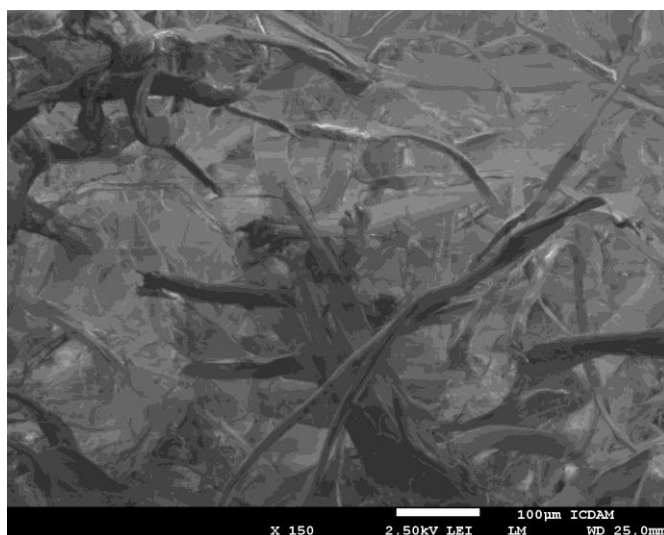
Obr. 54: Snímek lomové plochy kompozitu s bavlněnými vlákny a matricí v základním stavu



Obr. 55: Snímek lomové plochy kompozitu s bavlněnými vlákny a matricí s plazmovou modifikací pomocí vzduchu



Obr. 56: Snímek lomové plochy kompozitu s banánovými vlákny a matricí v základním stavu



Obr. 57: Snímek lomové plochy kompozitu s banánovými vlákny a matricí s plazmovou modifikací pomocí vzduchu

10.3. Digitální mikroskopie

Použitý digitální mikroskop Keyence VHX – 5000 je vybaven CMOS kamerou (Complementary Metal Oxide Semi conductor = technologie využívající doplňující polovodiče oxidu kovu), která je schopna pořizovat až 50 snímků za sekundu. Jedná se tak o mikroskop s nejvyšší frekvencí pořizování snímků na trhu. Mikroskop je schopen okamžitě zachytit jakoukoliv oblast zkoumaného objektu v kompletním zaostření, bez nutnosti uživatelského nastavování zaostření. Poskytuje vysoké rozlišení, vysokou hloubku ostrosti zobrazení a integrované 2D a 3D měření v systému. Díky vysokým datovým tokům a grafickému rozhraní je možné pokročilé ovládání mikroskopu. Plně

zaostřené snímky je tak možné získávat během jedné sekundy. Uživatel se jednoduše přesune do požadované oblasti zobrazení a mikroskop automaticky provede skenování v celém rozsahu ohniskových vzdáleností a vytvoří zcela zaostřený obraz [22].

Při měření vysoce reflexivních objektů mají konvenční mikroskopy potíže při zobrazování s nízkým kontrastem. Mikroskop VHX 5000 je schopen zvýšit/snížit kontrast nasycených, či nenasycených oblastí na cíl pomocí algoritmu s vysokým dynamickým rozsahem. Tato funkce může být kombinována se zobrazovacím režimem s velmi vysokým rozlišením, které používá krátké vlnové délky světla a technologii posunu pixelů pro zvýšení rozlišení až o 25%. Takto může být vysoce reflexivní objekt zobrazen v ostrém kontrastu a detailu [22].

Mezi další výjimečné funkce mikroskopu patří možnost naklápění snímací kamery. Toto naklopení umožňuje pořizování snímků pod různými úhly, bez nutnosti složité manipulace s objektem. S využitím pokročilého systému mikroskopu lze tímto způsobem vytvářet 3D snímky, měřit profily 3D ploch nebo vyhodnocovat výškové rozdíly zvolených bodů.



Obr. 58: Digitální mikroskop Keyence VHX - 5000 [Keyence]

10.3.1. Lomové plochy z tahové zkoušky

Na snímcích z digitálního mikroskopu byla zachycena místa, kde bylo možné dobře vyhodnotit adhezi. Na těchto místech bylo možné pozorovat známky dobré i špatné adheze. U vzorků s kokosovými vlákny a drcenými ořechovými skořápkami převládaly známky dobré adheze, jak u základního stavu matrice, tak u plazmově modifikované matrice. Na pořízených snímcích se však ojediněle vyskytují i známky špatné adheze.

Při porovnání snímků s oběma stavy matric nelze jednoznačně říci, u jakého stavu matrice bylo dosaženo lepší adheze. U vzorků s bavlněnými, banánovými a skleněnými vlákny bylo obdobně, jako u stereomikroskopu obtížné zachytit místa, kde by bylo možné adhezi vláken a matrice vyhodnotit, neboť vlákna z matrice vyčnívala ve velkých délkách.

U vzorků s kokosovými vlákny (obr. 59 a 60) lze v označených oblastech č. 1 vidět dobré spojení vlákna matrice, v podobě ulpělé matrice na vláknech, která byla dále vytahována. V oblasti č. 2 je vidět kokosové vlákno kompletně pokryté matricí. Znamky špatné adheze jsou označeny v oblastech č. 3, kde je možné vidět krátery u kořene vlákna a matrici vytahovanou okolo vlákna).



Obr. 59: Snímek lomové plochy kompozitu s kokosovými vlákny a matricí v základním stavu



Obr. 60: Snímek lomové plochy kompozitu s kokosovými vlákny a matricí s plazmovou modifikací pomocí vzduchu

U vzorků s drcenými ořechovými skořápkami (obr. 61 a 62) jsou vidět opět převládající známky dobré adheze, u obou stavů matrice. V oblastech č. 1 je vidět, že jsou skořápky celé pokryté matricí, která je dále vytahována. Možné je zde také vidět, že jsou skořápky vytahovány společně s matricí. U kořene skořápek se tak netvoří krátery. Jedinou známkou špatné adheze zde byl kráter v oblasti č. 2 (obr. 62).



Obr. 61: Snímek lomové plochy kompozitu s drcenými ořechovými skořápkami a matricí v základním stavu



Obr. 62: Snímek lomové plochy kompozitu s drcenými ořechovými skořápkami a matricí s plazmovou úpravou pomocí vzduchu

IV. Závěr a diskuze

Tato práce se zabývala problematikou adheze u kompozitů s polymerní matricí. Jako matrice byl použit polyetylen v základním stavu a plazmově modifikovaném stavu. Cílem bylo vyhodnotit, v jaké kombinaci plniva a stavu matrice bylo dosaženo nejpříznivější adheze a zda plazmová modifikace matrice přispěla ke zlepšení adheze.

Pro výrobu kompozitních vzorků musel být navržen a vyroben přípravek, pomocí kterého bylo vyrobeno celkem 76 vzorků. Vyrobené vzorky až na jejich tloušťku splňují doporučené rozměry dle normy ČSN EN ISO 527. Tloušťka vzorků byla ovlivněna množstvím použité matrice při přípravě vzorků. Během výroby vzorků nastávaly problémy s porozitou. Tento problém se během dalších zpracování nepodařilo odstranit. Pro odstranění porozity by do budoucna bylo vhodné zajistit konvenční technologii výroby vzorků (např. lisování za tepla, či vstřikování). Technologie vstřikování by také umožnila doplnění materiálu během procesu chladnutí (vyrovnání úbytku materiálu vlivem smrštění). Při stávající výrobě v omezených podmínkách laboratoře by bylo vhodné provést pokus s přivedením vývěvy k peci, tzn. spečení vzorků ve vakuu. Vzhledem k vysoké viskozitě roztaveného polymeru však nelze jednoznačně určit, zda by i tato varianta byla účinná.

Použitá bavlněná a banánová vlákna byla k dispozici pouze ve formě shluků klastrů. Zpracování vláken bylo při výrobě vzorků obtížné a do značné míry byly shluky také zdrojem pórovitosti, neboť se ve shlucích držel vzduch. Pro další pokusy by bylo vhodnější použít kontinuální banánová a bavlněná vlákna, nebo tkaniny z nich. O ořechových skořápkách jakožto konstrukčním materiálu nejsou známy žádné informace o aplikaci a fyzikálních a mechanických vlastnostech. Pro zjištění alespoň některé charakteristiky plniva, byla změřena hustota pomocí Gay-Lussacova pyknometru. Při porovnání výsledné hustoty s ostatními přírodními plnivy, mají ořechové skořápky přibližně stejnou hustotu jako vlákna jutová a sisalová.

Před testováním vzorků byly změřeny jejich základní charakteristiky (rozměry a hmotnost). Po změření těchto charakteristik byla provedena tahová zkouška. Výsledky byly do jisté míry ovlivněny strukturními vadami a tloušťkou vzorků, která nesplňovala doporučenou hodnotu. Vzorky však byly vyrobeny stejným způsobem a za stejných podmínek. Mohlo tak být provedeno jejich porovnání.

Po shrnutí získaných výsledků se prokázalo, že u vzorků bez plniva byla plazmovou modifikací pomocí kyslíku zvýšena pevnost o 23,2 %. Z DSC zkoušky těchto vzorků byla také změřena vyšší entalpie tání i krystalizace. U těchto vzorků je tedy dosaženo dokonalejšího uspořádání makromolekul. Výsledky plazmové modifikace pomocí vzduchu byly téměř shodné s matricí v základním stavu.

Z porovnání vzorků s plnivem se prokázalo, že při použití plazmové modifikace pomocí kyslíku bylo dosaženo zvýšení pevnosti u kokosových vláken o 8,9 % a u bavlněných vláken o 8,5 %. Při použití plazmové modifikace se vzduchem byla pevnost zvýšena u drcených ořechových skořápek o 6,7 % a u banánových vláken o 7,9 %. Nutné je podotknout, že přidáním přírodního plniva do matrice nebylo dosaženo zpevnění materiálu. Samotná matrice dosahovala větší pevnosti než kompozit s přírodním plnivem.

Při pokusech s dalšími plnivy bylo dosaženo již výraznějšího zlepšení mechanických vlastností u vzorků s plazmově modifikovanou matricí pomocí vzduchu a skleněnými vlákny. U krátkých skleněných vláken bylo dosaženo zvýšení pevnosti až o 33,1 %, u dlouhých vláken o 20,9 %. U vzorků s dlouhými vlákny jsou naměřené výsledky ovlivněny počtem a soudržností vláken ve svazku a ne adhezí k matrici. Během tahové zkoušky docházelo k tažení vláken společně s matricí. Zkouška vzorků s dlouhými vlákny byla dále ovlivněna chybou, kdy při zkoušce došlo k přetržení zkušebního vzorku v upínacích čelistech stroje. Porovnány tedy mohly být pouze maximální dosažené hodnoty. Vzhledem k tomu že byl vyroben pouze omezený počet těchto vzorků, nemohla být ověřena a statisticky vyhodnocena správnost dosažených výsledků.

Po provedení tahové zkoušky byla změřena hustota a navlhavost vzorků. Z výsledků vyplývá, že jsou vzorky navlhavé. Polyetylen však patří mezi nenavlhavé polymery. Změřená navlhavost může být důsledkem pórovitosti vyrobených vzorků.

Při vyhodnocování lomových ploch z tahové zkoušky na stereomikroskopu a elektronovém mikroskopu nebyly pozorovatelné výraznější rozdíly v adhezii základního stavu matrice a plazmově modifikovaného stavu. Kvalitní snímky, kde bylo možné porovnat adhezi jednotlivých stavů matrice, byly zhotoveny pouze u kokosových vláken a drcených ořechových skořápek. Na snímcích obou stavů matrice převládaly známky dobré adheze, nalezena však byla i místa s nedokonalou adhezí. Nebylo tedy

možné jednoznačně určit, zda bylo dosaženo lepší adheze u matrice v základním stavu, či plazmově modifikovaném stavu.

Pomocí dalšího přípravku byl ještě proveden pokus o vyrobení vzorků pro vytrhávací zkoušku, která by umožnila přímé měření adheze na kompozitech. Po přetržení byly vzorky vyhodnoceny na stereomikroskopu. Vyhodnocení těchto vzorků umožnilo výraznější porovnání adheze jednotlivých stavů matrice, neboť byly na skleněných vláknech ulpělé kapky matrice. Ze snímků bylo viditelné, že kapky matrice jak v základním stavu, tak v plazmově modifikovaném stavu dosahují dobré adheze. Při bližším porovnání jednotlivých snímků však bylo možné postřehnout, že u matrice v základním stavu kapky dosahovaly nepatrně ploššího tvaru na skleněném vláknu (menšího úhlu smáčivosti). Na základě těchto výsledků lze tedy konstatovat, že plazmová modifikace matrice v tomto případě nevedla ke zlepšení adheze.

Shrnutí výsledků

Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo, že plazmové modifikace matrice vedly ke zlepšení mechanických vlastností vyrobených vzorků. Zlepšení však z hlediska pevnosti nebylo výrazné. Z lomových ploch nebylo možné jednoznačně určit v jakém stavu matrice a použitého plniva bylo dosaženo lepší adheze. Ze vzorků pro vytrhávací test, kde byly kapky matrice ulpělé na skleněných vláknech, byly známky dokonalejší adheze (menší úhel smáčivosti) u matrice v základním stavu.

V. Seznam použité literatury

- [1] Umi.fs.cvut.cz [online]. [cit. 2015-8-19]. *Kompozitní materiály*. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [2] JANOVEC, J. CEJP, J. a STEIDL, J., *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [3] KOŘÍNEK, Z. Kompozity: Matrice. In: *Kompozity* [online]. [cit. 2015-08-20]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>
- [4] KOŘÍNEK, Z. Kompozity: Vlákna. In: *Kompozity* [online]. [cit. 2015-08-22]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [5] HULL, D., CLYNE, T. W. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, Cambridge 1996, xvi, 326p. ISBN 0-521-38855-4
- [6] BÁBÍK, A. *Polymerní kompozity s vyššími užitnými vlastnostmi*. Brno, 2013. Ph.D. teze. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.
- [7] ŠUBA, O. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [8] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 80-737-2279-8.
- [10] BÁBÍK, A., JANEČEK, P., LASOTA, T., BURŠA, J. a ČECH, V. Vliv povrchových úprav na mechanickou odezvu dlouhými vlákny vyztuženého polymerního kompozitu. *Polymerní kompozity 2010*, str. 94–99. ISBN 978-80-7043-872-5.
- [11] KIM, J-K., MAI Y-W. *Engineered interfaces in fiber reinforced composites*. 1st ed. New York: Elsevier Sciences, 1998. ISBN 00-804-2695-6.
- [12] ALIABADI, M., GUAGLIANO, M. *Fracture and damage of composites*. Billerica, MA: WIT, 2006, xiii, 288 p. Advances in fracture mechanics (WIT Press), v.8. ISBN 1853126691.

- [13] ŠÍŠKA, M. *Studium adheze uhlíkových kompozitů z tkaniny KORDCARBON*. Zlín, 2014. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Soňa Rusňáková, Ph.D.
- [14] PROCHÁZKA, M. Plazmová polymerizace. In: *Chempoint* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/plazmova-polymerizace>
- [15] HUDEČEK, O., SEDLÁČEK, T. *Povrchové úpravy plastových výrobků plazmou* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: http://www.plastr.cz/files/new35/144-Povrchove_upravy_plastovych_vyrobku_plazmou.pdf.
- [16] *Materiálový list: DOWLEX™ 2629.10UE*. The Dow Chemical Company, 2006.
- [17] *Polymery* [online]. Zlín. Seminář. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. [cit. 2016-06-11]. Dostupné z: http://www.utb.cz/file/36195_1_1/.
- [18] ČSN EN ISO 527. *Plasty: stanovení tahových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [19] *Přírodní rostlinná vlákna* [online]. Liberec. Studijní podklady. Technická univerzita v Liberci. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NEM.htm.
- [20] NOTHNAGLE, P. E., CHAMBERS, W., a DAVIDSON, M. W. *Introduction to Stereomicroscopy* [online]. [cit. 2016-06-26]. Dostupné z: <http://www.microscopyu.com/articles/stereomicroscopy/stereointro.html>
- [21] ŠAFÁŘOVÁ, K. *Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie* [online]. Olomouc: Centrum pro výzkum nanomateriálů [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: http://nanosystemy.upol.cz/upload/18/safarova_sem.pdf
- [22] *VHX-5000 Series Digital Microscope Catalogue* [online]. Keyence [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: https://www.keyence.com/landing/microscope/vhx5000_overview.jsp
- [23] ČSN EN ISO 11357. *Plasty - Diferenční snímací kalorimetrie (DSC)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [24] MUKHOPADHYAY, S., FANGUEIRO, R., ARPAÇ, Y. a ŞENTÜRK, Ü. Banana Fibers – Variability and Fracture Behaviour. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2008 (Volume 3, Issue 2), 39 - 45 [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: <http://www.jeffjournal.org/papers/Volume3/Mukhopadhyay3.2.pdf>
- [25] SANJAY, M. R., ARPITHA, G. R. a YOGESHA, B. Study on Mechanical Properties of Natural - Glass Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review. 4th International Conference on Materials Processing and Characterization. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2015 (Volume 2, Issues 4 – 5), 2959 - 2967 [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478531500509X>
- [26] ADEKUNLE, K. F. Surface Treatments of Natural Fibres - A Review: Part 1. *Open Journal of Polymer Chemistry* [online]. **2015**(5), 41-46 [cit. 2016-07-14]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.4236/ojpcchem.2015.53005>
- [27] TENDERO, C., TIXIER, C., TRISTANT P., DESMAISON, J. a LEPRINCE, P. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta* [online]. 2006 (Part B 61), 2 – 30 [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0584854705002843>
- [28] ŠIDO, J. *Radikálové roubování PE/PP kopolymeru*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Mgr. František Kučera, Ph.D.
- [29] CHUNG, Deborah, D. L. *Composite materials science and applications*. 2nd ed. London: Springer, 2010. ISBN 978-184-8828-315.

VI. Seznam použitých zkratk

APS	plazmové naprašování (air plasma spray)
CAD	počítačem podporované projektování (computer aided design)
CAM	počítačová podpora výroby (computer aided manufacturing)
CNC	číslicové řízení počítačem (computer numeric control)
CVD	chemické povlakování (chemical vapor deposition)
DSC	diferenční snímací kalorimetrie
PECVD	CVD pomocí plazmatu (plasma enhanced CVD)
VBD	výměnné břitové destičky

Zkratky materiálů

ABS	akrylonitril-butadien-styren
BMI	bismaleimidy
EP	epoxidové pryskyřice
HSS	rychlořezná ocel (high speed steel)
PA	polyamid
PAI	polyamidoimid
PAN	polyakrylonitril
PBT	polybutylentereftalát
PBO	poly-para-fenylbenzobisoxazol
PC	polykarbonát
PE	polyetylen
PE – LLD	lineární nízkohustotní (linear low density) polyetylen
HDPE	vysokohustotní (high density) polyetylen

PEEK, PEK, PEKK	polyeterketony
PEI	polyeterimid
PET	polyetylentereftalát
PF	laminační fenolformaldehydové pryskyřice
PI	polyimidy
PMPPIC	polymetylen-polyfenyl-izokyanát
PP	polypropylen
MAH – PP	polypropylen roubovaný maleinanhydridem
PPS	polyfenylsulfid
PVC	polyvinylchlorid
SK	slinutý karbid
SRB	styren-butadien
UP	nenasycené polyesterové pryskyřice
VE	vinylesterové pryskyřice

Chemické vzorce

Al	hliník
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
Ar	argon
B	bor
B ₄ C	karbid bóru
B ₂ O ₃	oxid boritý
C	uhlík

Ca	vápník
CH ₄	metan
C ₂ H ₂	acetylen
C ₂ H ₄	etylen
C ₂ H ₆	etan
C ₆ H ₆	benzen
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
F	fluor
H	vodík
H ₂ CrO ₄	kyselina chromová
He	helium
HF	fluorovodík
HNO ₃	kyselina dusičná
H ₂ O	voda
Mg	hořčík
N ₂	dusík
NaClO	chlornatan sodný
Ne	neon
NH ₃	amoniak (čpavek)
O ₂	kyslík
Pb	olovo

Si	křemík
SiC	karbid křemíku
SiO	oxid křemnatý
SiO ₂	oxid křemičitý
SO ₂	oxid siřičitý

Veličiny

θ	úhel smáčivosti [1°]
γ_{SV}	povrchová energie (solid-vapor) [N/m]
γ_{SL}	povrchová energie (solid-liquid) [N/m]
γ_{LV}	povrchová energie (liquid-vapor) [N/m]
W_a	adhezní práce [J]
D	faktor drsnosti [-]
m	hmotnost [g]
m_c	celková hmotnost vzorku [g]
m_f	hmotnost vláken [g]
w_f	hmotnostní podíl vláken [%]
ρ	hustota vzorku [g/cm^3]
S	průřez vzorku [mm^2]
F_y	zatížení na mezi kluzu [kN]
F_m	zatížení na mezi pevnosti [kN]
L_y	přrůstek posunutí čelistí na mezi kluzu [mm]
L_m	přrůstek posunutí čelistí na mezi pevnosti [mm]

L_0	počáteční vzdálenost čelistí [mm]
ε_y	jmenovité poměrné prodloužení na mezi kluzu [-]
ε_m	jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti [-]
σ_y	mez kluzu v tahu [MPa]
σ_m	mez pevnosti v tahu [MPa]
HM	vysoký modul (high modulus) [MPa]
UHM	ultra vysoký modul (ultra high modulus) [MPa]
\bar{x}	aritmetický průměr [-]
σ	směrodatná odchylka [-]
ΔH_m	entalpie tání [J/g]
ΔH_k	entalpie krystalizace [J/g]
T_m	teplota tání [°C]
T_k	teplota krystalizace [°C]
f_z	posuv na zub [mm/zub]
n	otáčky vřetena [ot/min]
v_c	řezná rychlost [m/min]
v_f	posuv za minutu [mm/min]

Označení vzorků

GB	skleněné kuličky
SGF	krátká skleněná vlákna
LGF	dlouhá skleněná vlákna
M	mikroten (HDPE)

MF	vlákna z minerálního kovu – ocelové třísky
NG – NUT	přírodní dřev – drcené ořechové skořápky
NF – BA	přírodní vlákno banánové
NF – CC	přírodní vlákno kokosové
NF – CO	přírodní vlákno bavlněné
PE P	polyetylen v plazmově modifikovaném stavu se vzduchovým pracovním médiem
PE P1	polyetylen v plazmově modifikovaném stavu s kyslíkovým pracovním médiem
PE ZS	polyetylen v základním stavu

VII. Slovníček používaných pojmů

Slovní pojmy používané v problematice kompozitních materiálů [8, 13].

Adheze	schopnost dvou různých materiálů spolu přilnout
Adsorpce	proces, při němž tekutina vytváří vazby s pevnou látkou
Anizotropie	směrová závislost materiálových vlastností
Delaminace	lokální rozdělení vrstev kompozitu (laminátu)
Disperze	obecný název pro nespecifikovaný druh výztuže
Hydrofilní	molekuly, či povrchy, jež pozitivně interagují s vodou
Hydrofobní	molekuly, či povrchy, jež neinteragují s vodou
Izotropie	směrová nezávislost materiálových vlastností
Koheze	soudržnost molekul nebo iontů materiálu
Kohezní energie	energie potřebná k oddělení částic materiálu
Kompozit	materiál skládající se ze dvou a více materiálů s rozdílnými vlastnostmi
Laminát	označení pro kompozit plošného tvaru, který vzniká spojením více lamin nezávisle na stavu výroby
Matrice	materiál, do něhož jsou vkládány vyztužující vlákna, jejím úkolem je zaručení geometrického tvaru, soudržnost a ochrana vláken, zavedení a přenos sil
Ortotropie	druh anizotropie vyznačující se třemi vzájemně kolmými rovinami symetrie
Pojivo	látka nanášená na rohož, jejímž účelem je zpevnění a udržení vláken v soudržném stavu
Mezifáze	rozhraní mezi vlákny a matricí

Mezivláknové porušení	porušení probíhající mezi vlákny, které prochází celou tloušťkou jednosměrné vrstvy
Pramen	je spojení přibližně 200 vláken bez kroucení
Prepreg	předimpregnovaná vlákna (polotovar)
Příze	kroucená nebo nekroucená vlákna pro textilní zpracování
Smykové napětí adhezní	smykové napětí mezi fázemi
Smykové napětí kohezní	smykové napětí vlastního materiálu
Synergie	výsledný účinek vlastností je větší, než prostý součet vlastností jednotlivých složek
Rohož	plošná výztuž, jež je tvořena z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných pramenů vláken spojených pojivem
Roving	pramen, vytvořený sdružením určitého počtu základních pramenů bez jejich kroucení
Tkanina	je tvořena ze vzájemně se křížících, propletených systémů vláken
Vlákno	materiál, který je vkládán do matrice za účelem zvýšení pevnosti

VIII. Přílohy

Naměřené hmotnosti drcených ořechových skořápek

Pro stanovení alespoň některé charakteristiky drcených ořechových skořápek byla pomocí pyknometru stanovena jejich hustota (viz kap. 6.2.4.). Naměřené hmotnosti jsou uvedeny v tab. 20.

Tab. 20: Naměřené hmotnosti a vypočítaná hustota ořechových skořápek

	1. měření	2. měření	3. měření
m_1 [g]	20,627	20,622	20,622
m_2 [g]	21,752	21,747	21,746
m_3 [g]	46,549	46,549	46,548
m_4 [g]	46,209	46,208	46,208
ρ [g/cm ³]	1,430	1,431	1,431

Obrábění v softwaru PowerMill

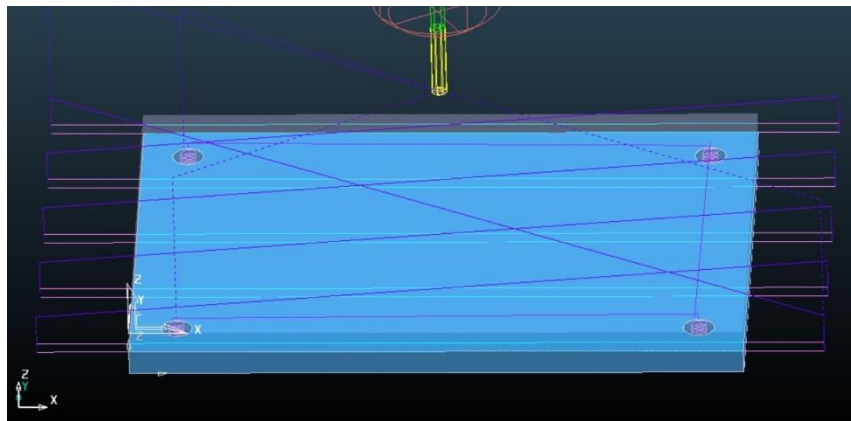
Před tvorbou NC programů a vyrobením přípravku bylo nutné stanovit řezné podmínky pro použité školní nástroje. Při volbě řezných podmínek bylo nutné vycházet z parametrů nástrojů, které jsou uvedeny jejich výrobcem. Řezné podmínky však nebyly dle těchto parametrů navrženy na optimální hodnoty obrábění, ale na požadavek co nejvyšší životnosti nástrojů. Použité nástroje a jím přiřazené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 21.

Tab. 21: Podmínky pro ocel: Skupina 1. Automatové a konstrukční oceli DIN 1.0037, DIN 1.0050 (<600 MPa)

Nástroj (Fréza)	Válcová	Válcová	Válcová	Drážkovací	Válcová
Průměr [mm]	50	12	10	10	5
Materiál	SK	SK	HSS	HSS	HSS
Počet zubů	5	4	4	2	4
Délka ostří [mm]	-	26	45	22	24
Krok (max) [mm]	40	12	10	1	5
Krok dolů (max) [mm]	5	6	5	5	2,5
f_z [mm/zub]	0,060	0,059	0,036	0,028	0,016
v_f [mm/min]	229	632	187	73	160
n [ot/min]	764	2679	1300	1300	2500
v_c [m/min]	120	101	41	41	39
Vyložení (min) [mm]	-	26	45	25	25
Poznámky (označení)	VBD	Guhring 3630	Zps 121518.100	Zps 221418.100	Zps 121518.050

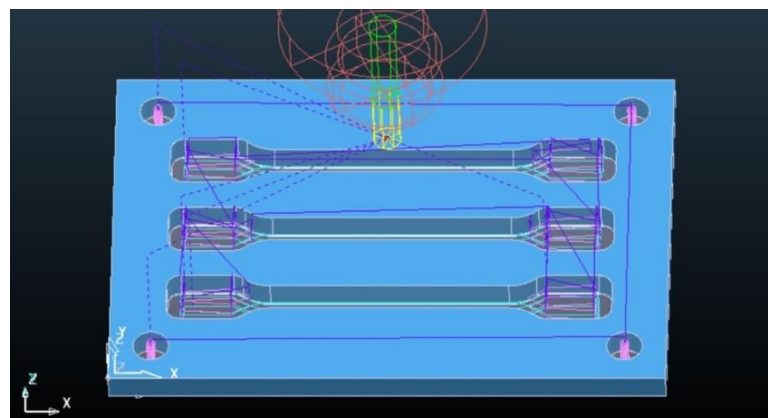
Z uvedených řezných podmínek je zřejmé, že nástroje ze slinutých karbidů umožňují výrazně vyšší řezné podmínky. Snahou tak bylo co největší využití těchto nástrojů a minimalizování strojního času.

Obrobení spodní základové desky o tloušťce 15 mm spočívalo v zarovnání čela a vyvrtání děr (obr. 63). Pro zarovnání čela byla použita strategie „hrubování modelu“ pomocí řádkování a válcová fréza o průměru 50 mm. V další operaci byly vyfrézovány díry pomocí strategie „dokončení profilu geometrie“ a válcové frézy o průměru 5 mm.



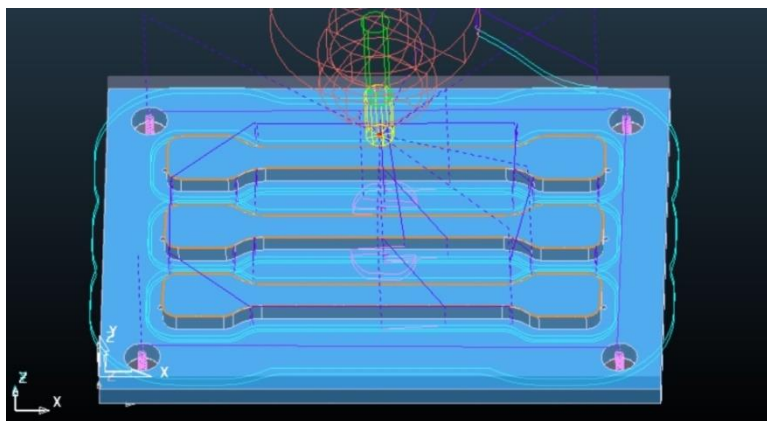
Obr. 63: Obrobení spodní desky v PowerMillu

U prostřední desky (obr. 64) o tloušťce 10 mm byla nejprve provedena operace frézování širších částí drážek pomocí strategie „hrubování modelu“ a válcové frézy o průměru 12 mm. Pomocí strategie „zbytkové hrubování“ a detekce zbytkového materiálu z předešlé operace byly následně dokončeny celé drážky. V této operaci byla použita drážkovací fréza o průměru 10 mm. V poslední operaci byly pomocí téhož nástroje obrobena díry strategií „dokončení profilu geometrie“.



Obr. 64: Obrobení střední desky v PowerMillu

U vrchní desky (obr. 65) o tloušťce 15 mm byla v první operaci obrobena kontura přípravku pomocí strategie „hrubování modelu“ a válcové frézy o průměru 50 mm. V další operaci bylo opět využito detekce zbytkového materiálu a bylo provedeno „zbytkové hrubování modelu“ s válcovou frézou o průměru 12 mm. Dokončení kontury polotovaru bylo provedeno stejnou strategií jako předchozí operace, ale pomocí drážkovací frézy o průměru 10 mm. Tímto nástrojem byly nakonec vyfrézovány i průchozí díry strategií „dokončení profilu geometrie“.



Obr. 65: Obrobení vrchní desky v PowerMillu

Kompletní 3D data (modely a NC programy) jsou umístěny v příloze na disku.

Naměřené hodnoty vyrobených vzorků

V tabulkách č. 22 až 27 jsou uvedeny naměřené hodnoty vzorků získané před, během a po provedení tahové zkoušky. Jedná se o průřez vzorku (S), celkovou hmotnost (m_c), hmotnost výztuže (m_f), hmotnostní podíl výztuže (w_f), hustotu (ρ), zatěžující sílu (F_y) a prodloužení (L_y).

Tab. 22: Naměřené hodnoty vzorků bez plniva

Vzorek	$b \times h$ [mm]	S [mm ²]	m_c [g]	ρ [g/cm ³]	F_y [kN]	L_y [mm]
PE ZS	10,0 × 4,0	40,0	7,055	0,932	0,660	16,00
PE ZS	10,8 × 3,2	34,6	7,065	0,879	0,565	8,80
PE P	10,4 × 2,8	29,1	5,434	0,908	0,490	12,30
PE P	10,2 × 3,4	34,7	6,232	0,921	0,531	9,50
PE P	10,0 × 4,4	44,0	7,516	0,911	0,688	15,00
PE P1	10,3 × 2,1	21,6	4,203	0,923	0,440	13,00
PE P1	10,2 × 2,2	22,4	4,396	0,929	0,452	12,00

Tab. 23: Naměřené hodnoty vzorků s kokosovým vláknem

Vzorek	b × h [mm]	S [mm ²]	m _c [g]	m _f [g]	w _f [%]	ρ [g/cm ³]	F _y [kN]	L _y [mm]
PE ZS – NF CC	9,1 × 3,7	33,7	7,018	1,60	23	0,915	0,420	6,50
PE ZS – NF CC	10,2 × 2,6	26,5	5,324	0,50	9	0,932	0,380	7,00
PE ZS – NF CC	10,2 × 2,2	22,4	4,245	0,50	12	0,943	0,328	6,28
PE ZS – NF CC	10,2 × 2,3	23,5	4,422	0,50	11	0,940	0,320	6,10
PE ZS – NF CC	10,2 × 2,3	23,5	4,337	0,50	12	0,945	0,370	7,60
PE P – NF CC	9,1 × 3,2	29,1	5,758	1,60	28	0,967	0,376	5,10
PE P – NF CC	10,3 × 2,6	26,8	5,258	0,50	10	0,941	0,410	7,50
PE P – NF CC	10,3 × 2,1	21,6	4,261	0,50	12	0,935	0,350	5,70
PE P – NF CC	10,3 × 2,0	20,6	3,989	0,50	13	0,939	0,295	4,40
PE P – NF CC	10,2 × 2,2	22,4	4,000	0,50	13	0,942	0,340	6,80
PE P1 – NF CC	10,2 × 2,1	21,4	4,038	0,50	12	0,935	0,340	6,60
PE P1 – NF CC	10,2 × 2,1	21,4	4,087	0,50	12	0,937	0,320	6,00
PE P1 – NF CC	10,2 × 2,1	21,4	3,953	0,50	13	0,930	0,333	6,80
PE P1 – NF CC	10,1 × 2,0	20,2	3,944	0,50	13	0,934	0,330	6,00
PE P1 – NF CC	10,2 × 2,2	22,4	4,335	0,50	12	0,929	0,379	7,60

Tab. 24: Naměřené hodnoty vzorků s drcenými ořechovými skořápkami

Vzorek	b × h [mm]	S [mm ²]	m _c [g]	m _f [g]	w _f [%]	ρ [g/cm ³]	F _y [kN]	L _y [mm]
PE ZS – NG NUT	10,2 × 3,8	38,8	6,893	1,80	26	0,930	0,395	5,56
PE ZS – NG NUT	10,2 × 2,9	29,6	5,658	0,52	9	0,932	0,439	9,70
PE ZS – NG NUT	10,3 × 2,2	22,7	4,224	0,50	12	0,923	0,320	6,72
PE ZS – NG NUT	10,2 × 2,2	22,4	4,302	0,50	12	0,936	0,350	8,00
PE ZS – NG NUT	10,2 × 2,3	23,5	4,360	0,50	11	0,924	0,359	9,00
PE P – NG NUT	9,4 × 4,0	37,6	7,654	1,80	24	0,947	0,435	4,30
PE P – NG NUT	10,2 × 2,8	28,6	6,197	1,00	16	0,944	0,490	9,00
PE P – NG NUT	10,3 × 2,2	22,7	4,222	0,50	12	0,934	0,372	10,20
PE P – NG NUT	10,3 × 2,0	20,6	4,134	0,50	12	0,926	0,320	5,70
PE P – NG NUT	10,3 × 2,1	21,6	3,948	0,50	13	0,926	0,321	7,00
PE P1 – NG NUT	10,3 × 2,0	20,6	3,933	0,50	13	0,927	0,328	7,00
PE P1 – NG NUT	10,3 × 2,0	20,6	4,008	0,50	12	0,917	0,328	6,90
PE P1 – NG NUT	10,3 × 2,0	20,6	3,832	0,50	13	0,911	0,218	3,50
PE P1 – NG NUT	10,3 × 2,0	20,6	3,830	0,50	13	0,919	0,342	8,50
PE P1 – NG NUT	10,3 × 2,1	21,6	4,180	0,50	12	0,925	0,282	4,20

Tab. 25: Naměřené hodnoty vzorků s bavlněnými vlákny

Vzorek	b × h [mm]	S [mm ²]	m _c [g]	m _f [g]	w _f [%]	ρ [g/cm ³]	F _y [kN]	L _y [mm]
PE ZS – NF CO	10,4 × 3,9	40,6	5,532	1,00	18	0,662	0,320	5,50
PE ZS – NF CO	10,2 × 2,5	25,5	5,073	0,50	10	0,908	0,368	6,00
PE ZS – NF CO	10,1 × 3,0	30,3	5,644	0,30	5	0,874	0,428	8,40
PE ZS – NF CO	10,2 × 2,2	22,4	4,186	0,50	12	0,901	0,300	6,50
PE ZS – NF CO	10,2 × 2,3	23,5	4,349	0,50	11	0,911	0,372	6,20
PE ZS – NF CO	10,3 × 2,4	24,7	4,379	0,50	11	0,879	0,330	5,50
PE P – NF CO	10,2 × 3,8	38,8	7,061	1,50	21	0,845	0,485	5,80
PE P – NF CO	10,1 × 2,8	28,3	5,616	0,30	5	0,896	0,444	7,60
PE P – NF CO	10,2 × 2,1	21,4	3,664	0,50	14	0,878	0,261	6,60
PE P – NF CO	10,3 × 2,2	22,7	4,142	0,50	12	0,903	0,330	5,80
PE P – NF CO	10,2 × 2,2	22,7	4,194	0,50	12	0,910	0,332	6,30
PE P – NF CO	10,3 × 2,1	21,6	3,929	0,50	13	0,873	0,290	4,80
PE P1 – NF CO	10,2 × 2,1	21,4	3,953	0,50	13	0,912	0,358	5,70
PE P1 – NF CO	10,3 × 2,0	20,6	3,927	0,50	13	0,906	0,308	5,00
PE P1 – NF CO	10,3 × 2,0	20,6	3,991	0,50	13	0,938	0,309	4,00
PE P1 – NF CO	10,3 × 2,0	20,6	3,834	0,50	13	0,915	0,341	5,40
PE P1 – NF CO	10,2 × 2,1	21,4	3,979	0,50	13	0,909	0,296	5,00

Tab. 26: Naměřené hodnoty vzorků s banánovými vlákny

Vzorek	b × h [mm]	S [mm ²]	m _c [g]	m _f [g]	w _f [%]	ρ [g/cm ³]	F _y [kN]	L _y [mm]
PE ZS – NF BA	10,4 × 3,9	40,6	5,535	1,50	27	0,844	0,275	4,10
PE ZS – NF BA	10,2 × 2,8	28,6	5,565	0,50	9	0,917	0,399	7,80
PE ZS – NF BA	10,2 × 2,7	27,5	5,211	0,50	10	0,872	0,340	7,00
PE P – NF BA	10,4 × 4,6	47,8	6,170	1,70	28	0,861	0,232	3,60
PE P – NF BA	10,3 × 3,0	30,9	5,963	0,65	11	0,858	0,468	7,40

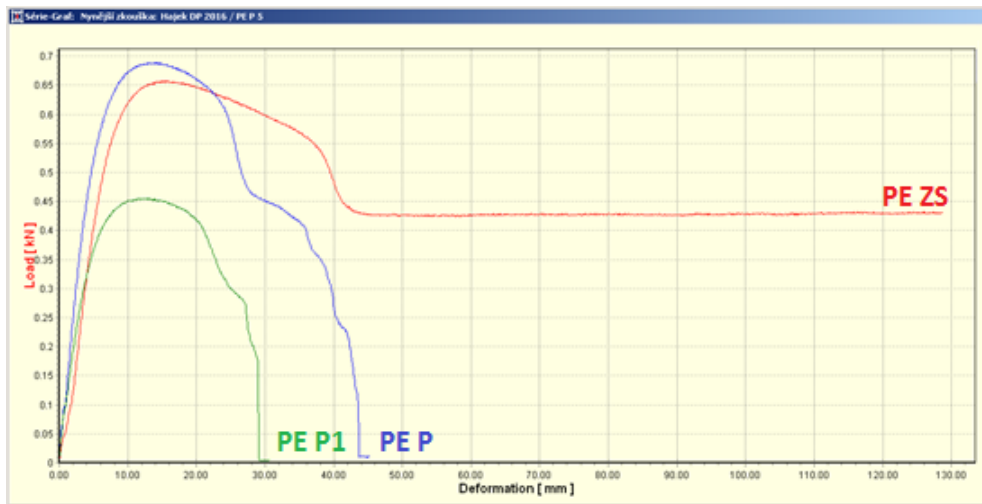
Tab. 27: Naměřené hodnoty dalších pokusných vzorků s plnivem ve formě skleněných kuliček, skleněných vláken a ocelových třísek

Vzorek	b × h [mm]	S [mm ²]	m _c [g]	m _f [g]	w _f [%]	ρ [g/cm ³]	F _y [kN]	L _y [mm]
PE ZS – GB	10,4 × 3,8	39,5	7,349	-	-	0,991	0,362	5,80
PE ZS – GB	10,3 × 2,9	29,9	6,438	1,60	25	1,053	0,418	9,40
PE P – GB	10,2 × 3,7	37,7	8,365	-	-	1,098	0,402	8,00
PE P – GB	10,3 × 3,0	30,9	6,588	1,60	24	1,053	0,425	12,00
PE ZS – SGF	10,2 × 2,2	22,4	4,408	0,50	11	0,996	0,749	4,30
PE ZS – SGF	10,2 × 2,0	20,4	4,110	0,50	12	0,995	0,710	3,90
PE P – SGF	10,2 × 2,1	21,4	4,415	0,50	11	0,982	0,965	4,70
PE P – SGF	10,2 × 1,8	18,4	3,968	0,50	13	0,994	0,84	4,40
PE ZS – LGF	10,2 × 2,2	22,4	4,366	0,50	11	0,974	2,300	7,39
PE ZS – LGF	10,0 × 2,1	21,0	4,307	0,50	12	1,036	2,25	6,8
PE P – LGF	10,2 × 1,9	19,4	3,994	0,50	13	0,990	2,510	7,70
PE P – LGF	10,2 × 2,1	21,4	4,072	0,50	12	1,042	1,64	6,00
PE ZS – MF	10,2 × 2,7	27,5	5,931	0,70	12	1,004	0,490	11,00
PE P – MF	10,2 × 2,6	26,5	5,339	0,70	13	1,010	0,410	9,50
M – MF	10,3 × 2,2	22,7	4,531	0,50	11	1,032	0,26	6,20
M – SGF	10,2 × 2,2	22,4	4,598	0,50	11	0,965	0,69	4,24
M – LGF	10,2 × 2,2	22,4	4,503	0,50	11	0,977	2,8	13,00

Diagramy tahové zkoušky

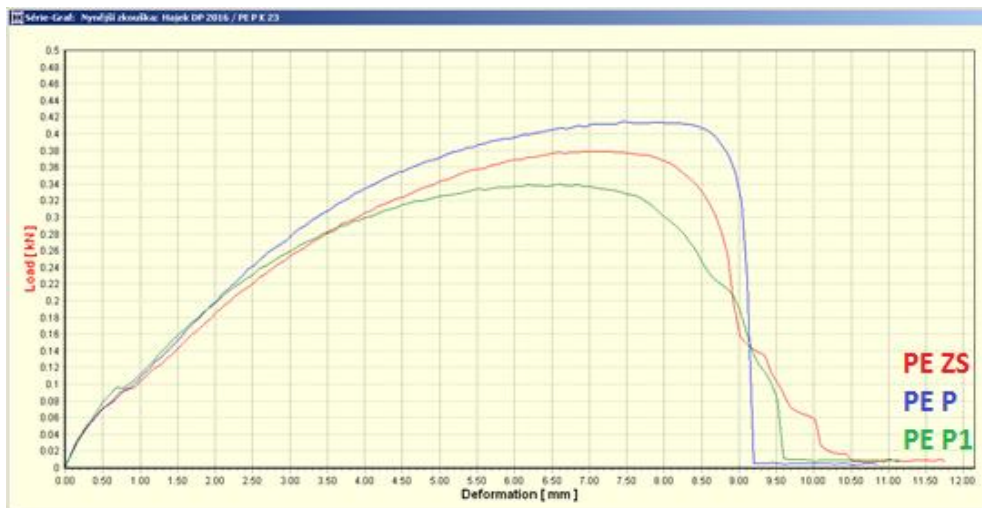
Vzhledem k tomu, že bylo vyrobeno a zkoušeno celkem 76 vzorků, jsou zde uvedeny pouze porovnání nejlepších výsledků od každé kombinace plniva a matrice. Všechny diagramy z tahové zkoušky jsou umístěny v příloze na disku.

Porovnání vzorků bez plniva



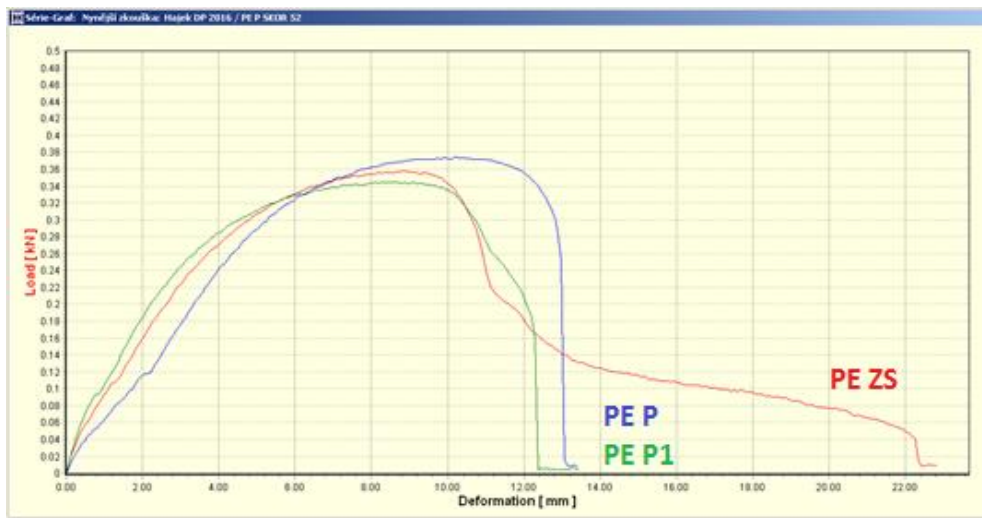
Obr. 66: Tahový diagram vzorků bez plniva

Porovnání vzorků s kokosovými vlákny



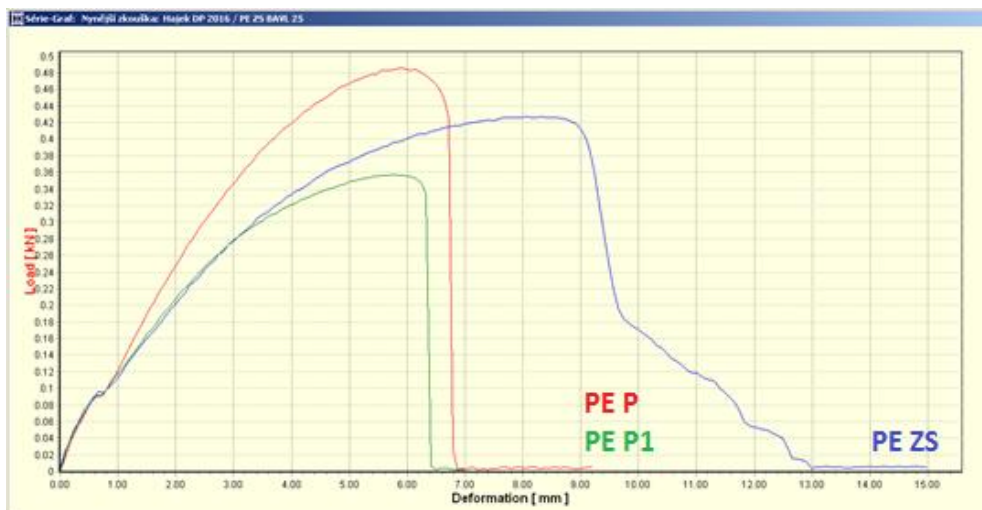
Obr. 67: Tahový diagram vzorků s kokosovými vlákny

Porovnání vzorků plněných drcenými ořechovými skořápkami



Obr. 68: Tahový diagram vzorků s drcenými ořechovými skořápkami

Porovnání vzorků plněných bavlněnými vlákny

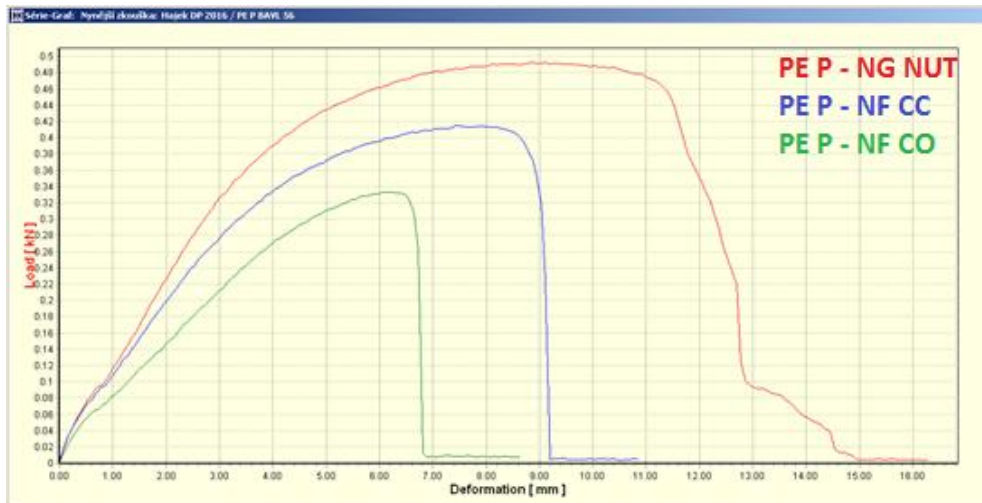


Obr 69: Tahový diagram vzorků s bavlněnými vlákny

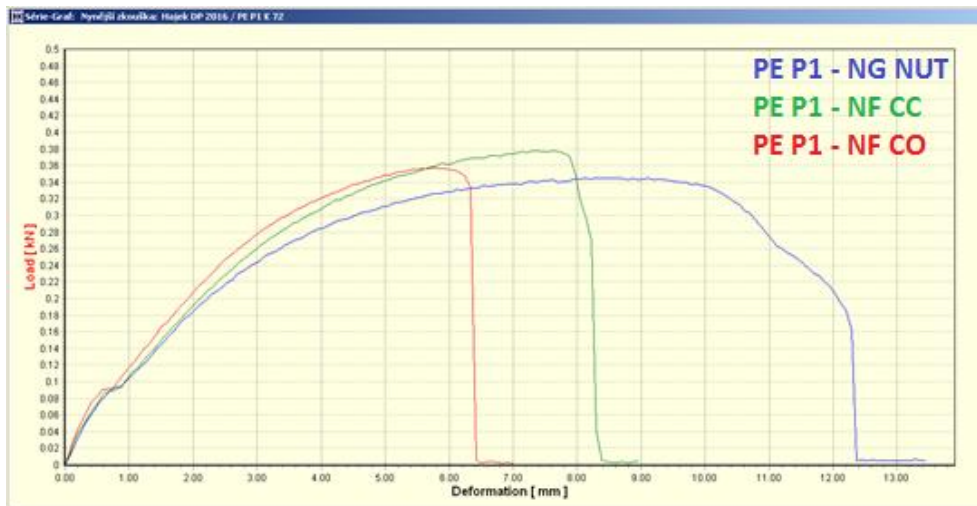
Porovnání vzorků s přírodními plnivými a jednotlivými stavy matrice



Obr. 70: Tahový diagram vzorků s přírodními plnivými a matricí v základním stavu



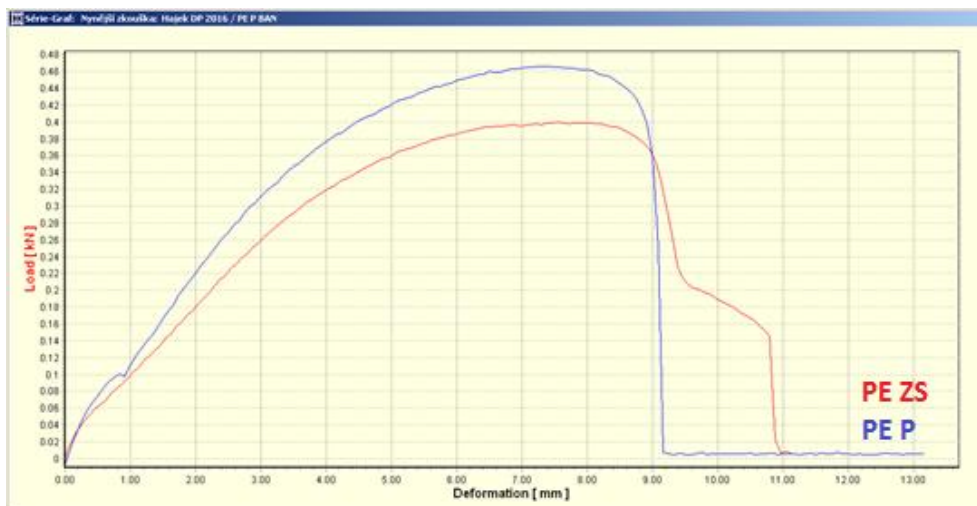
Obr. 71: Tahový diagram vzorků s přírodními plnivými a plazmově modifikovanou matricí pomocí vzduchu



Obr. 72: Tahový diagram vzorků s přírodními plnivými a plazmově modifikovanou maticí pomocí kyslíku

Porovnání ostatních vzorků

Vzorky s banánovými vlákny



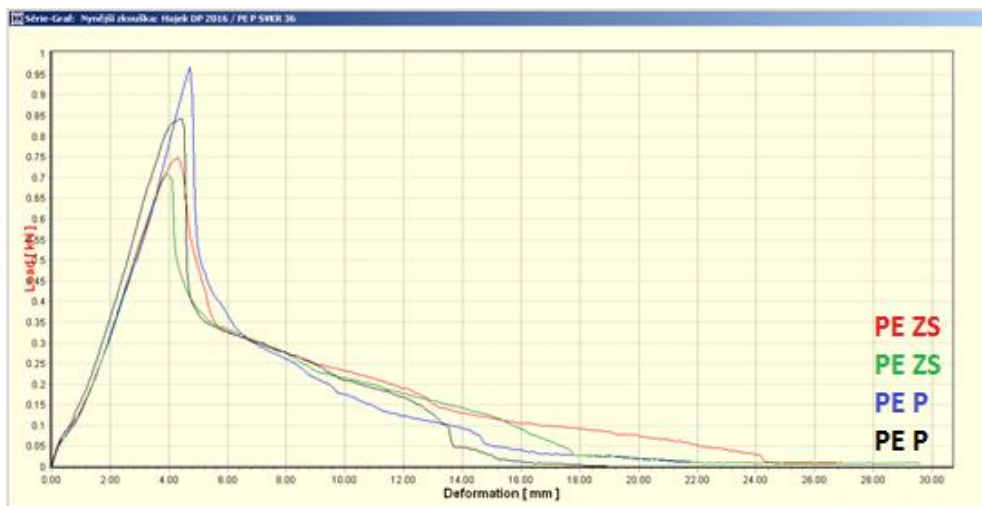
Obr. 73: Tahový diagram vzorků s banánovými vlákny

Vzorky se skleněnými kuličkami

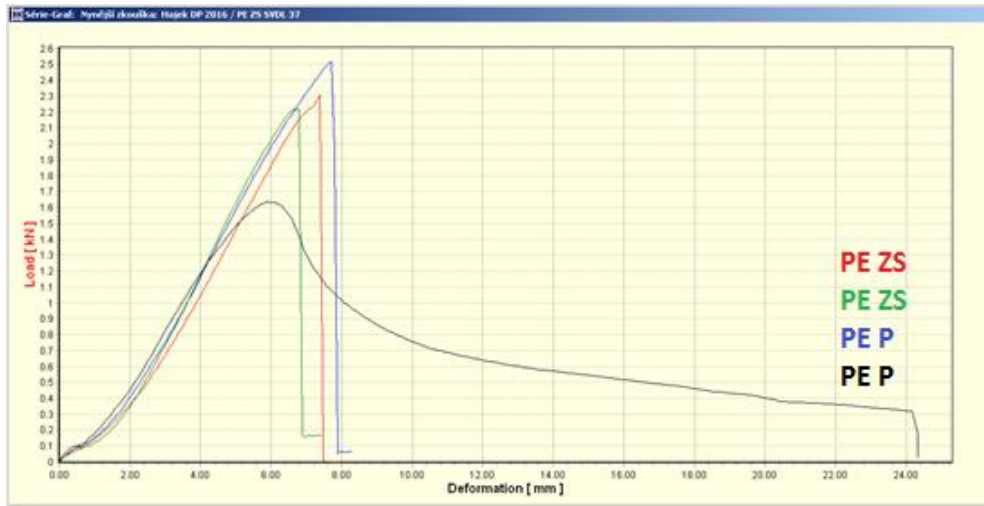


Obr. 74: Tahový diagram vzorků se skleněnými kuličkami

Vzorky se skleněnými vlákny

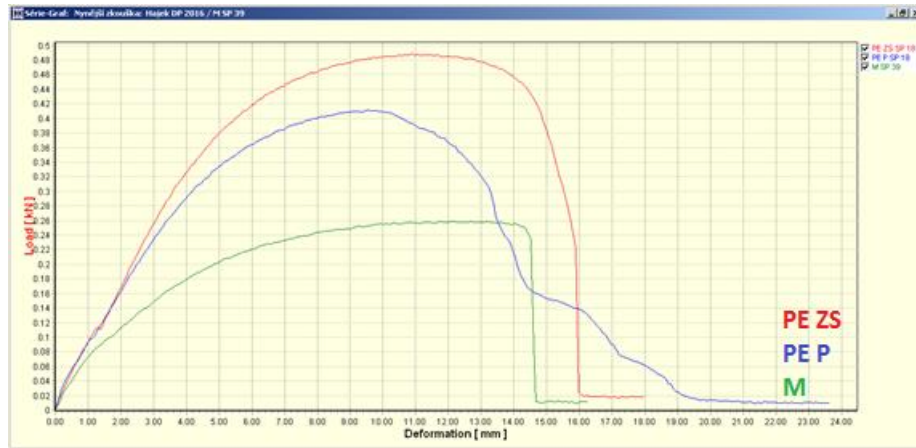


Obr. 75: Tahový diagram vzorků s krátkými skleněnými vlákny



Obr. 76: Tahový diagram vzorků s krátkými skleněnými vlákny

Vzorky s ocelovými třískami



Obr. 77: Tahový diagram vzorků s ocelovými třískami