VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

LEHČENÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO APLIKACE V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

LIGHTWEIGHT COMPOSITE MATERIALS FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Jan Sousedík
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA CHEMICKÁ

Zadání bakalářské práce

Číslo práce:	FCH-BAK1613/2020	Akademický rok:	2020/21
Ústav:	Ústav chemie materiálů		
Student:	**Jan Sousedík**		
Studijní program:	Chemie a chemické technologie		
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů		
Vedoucí práce:	**Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.**		

Název bakalářské práce:

Lehčené kompozitní materiály pro aplikace v automobilovém průmyslu

Zadání bakalářské práce:

Proveďte rešerši na téma lehčené kompozitní materiály, metodu přídavku QCEL a její dostupné varianty na trhu. Metodou pultruze připravte serii vzorků s proměnným objemovým zlomkem QCEL a případně různou povrchovou úpravou. Sledujte závislost mechanických a termických vlastností na těchto parametrech.

Termín odevzdání bakalářské práce: 30.7.2021:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Jan Sousedík student(ka)	Mgr. Radek Přikryl, Ph.D. vedoucí práce	doc. Ing. František Šoukal, Ph.D. vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce byla zaměřena na zkoumání vlivu odlehčujícího plniva v podobě dutých skleněných mikrokuliček na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Zvolenou metodou pro přípravu kompozitního materiálu byla pultruze. V rámci bakalářské práce byly připraveny dva typy kompozitního materiálu, a to kompozity na bázi nenasycené polyesterové pryskyřice a kompozity na bázi epoxy-vinylesterové pryskyřice. Jako výztuž byla použita speciální objemovaná skelná vlákna. Výsledný kompozitní materiál byl podroben tříbodové ohybové zkoušce, kde byly sledovány mechanické vlastnosti. Dále byla provedena kontrola distribuce a adheze plniva pomocí světelné mikroskopie a elektronové rastrovací mikroskopie (SEM).

ABSTRACT

This bachelor thesis investigated the influence of lightening filler in the form of hollow glass microbeads on the mechanical properties of composite material. The method chosen for the preparation of composite material was pultrusion. Two types of composite material were prepared as part of the bachelor thesis, specifically epoxy-vinyl ester resin-based composites and unsaturated polyester resin-based composites. Special bulked glass fibres were used as reinforcement. The final composite material was subjected to a three-point flexural test where mechanical properties were monitored. In addition, control of the distribution and adhesion of the filler was performed by using light microscopy and scanning electron microscopy (SEM).

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozitní materiál, pultruze, duté skleněné kuličky, epoxy-vinylesterová pryskyřice, polyesterová pryskyřice

KEYWORDS

Composite material, pultrusion, hollow glass microbeads, epoxy-vinyl ester resin, unsaturated polyester resin

SOUSEDÍK, Jan. Lehčené kompozitní materiály pro aplikace v automobilovém průmyslu [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131761. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Radek Přikryl.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Mgr. Radku Přikrylovi, Ph.D. společně s Ing. Přemyslem Menčíkem, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat společnosti GDP Koral s.r.o., za dodané komponenty pro výrobu kompozitních materiálů.

OBSAH

1 ÚVOD 7

2 TEORETICKÁ ČÁST 8

2.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY 8
2.1.1 Dělení kompozitních materiálů 8
2.2 MATRICE 9
2.2.1 Kompozity s polymerní matricí 9
2.2.1.1 Matrice z reaktoplastu 9
2.2.1.2 Matrice z termoplastu 13
2.2.2 Kompozity s kovovou matricí 14
2.2.3 Kompozity s keramickou matricí 14
2.2.4 Kompozity s uhlíkovou matricí 15
2.3 VÝZTUŽ 15
2.3.1 Částicové kompozity 16
2.3.2 Vláknové kompozity 16
2.3.2.1 Skleněná vlákna 17
2.3.2.2 Kovová vlákna 18
2.3.2.3 Keramická vlákna 19
2.3.2.4 Uhlíková vlákna 19
2.3.2.5 Aramidová vlákna 20
2.3.2.6 Přírodní vlákna 20
2.4 VÝROBA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 20
2.4.1 Pultruze 20
2.4.2 Ruční kladení 21
2.4.3 Navíjení 22
2.4.4 Stříkání 22
2.4.5 Lisování 23
2.4.5.1 Sheet Moulding Compound (SMC) 23
2.4.5.2 Bulk Moulding Compound (BMC) 23
2.4.5.3 Lisování v autoklávu 24
2.4.5.4 Metoda vakuového lisování 24
2.4.6 Glass Mat Thermoplastic (GMT) 25
2.4.7 Resin transfer moulding (RTM) 25

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 26

3.1 VYROBENÝ KOMPOZITNÍ MATERIÁL 26
3.1.1 Matrice 27
3.1.2 Výztuž 27
3.1.3 Plnivo 27
3.2 VÝROBNÍ PROCES 28
3.3 OHYBOVÁ ZKOUŠKA 29
3.4 POZOROVÁNÍ DISTRIBUCE Q-CEL 30
3.4.1 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM) 30

3.4.2 Světelná mikroskopie 30
4 VÝSLEDKY A DISKUZE 31
4.1 HMOTNOST KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU 31
4.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI 32
4.2.1 Modul pružnosti 32
4.2.2 Maximální ohybové napětí 33
4.3 POZOROVÁNÍ DISTRIBUCE Q-CEL 34
4.3.1 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM) 34
4.3.2 Světelná mikroskopie 35
4.4 ODHAD DOPADU SNÍŽENÍ HMOTNOSTI VYBRANÉHO KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU 36
5 ZÁVĚR 37
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 38
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 41

1 ÚVOD

Kompozitní materiály jsou pro svoje specifické vlastnosti velmi používaným typem materiálu. Dovolují nám kombinovat vlastnosti jednotlivých komponent za vzniku nového materiálu, který se vyznačuje zcela unikátními vlastnostmi. Neustále je kladen důraz na vývoj nových materiálů, které by svými vlastnostmi předčili tradičně používané materiály. Proto mají kompozity tak široké uplatnění, neboť si můžeme vytvořit materiál „na míru“. Kompozitní materiály mají tak široké uplatnění ve většině odvětvích průmyslu, ať už to je stavebnictví, automobilový či letecký průmysl, strojírenství nebo elektrotechnický průmysl. To je důvod, proč je oblast výzkumu a vývoje kompozitů i nadále perspektivní.

Vzhledem k zaměření práce jsou cílem výzkumu kompozitní materiály, které by mohly najít své uplatnění v automobilovém průmyslu. Právě v tomto průmyslovém odvětví je na vývoj kompozitních materiálů kladen velký důraz. Kromě mechanických vlastností kompozitu se v automobilovém průmyslu sleduje i jeho hmotnost. Vzhledem k vlivu hmotnosti na celkovou spotřebu automobilu je příhodné, aby kompozit splňoval všechny mechanické vlastnosti při co možná nejnižší hmotnosti. Dále je vhodné, aby kompozit bylo možné sériově vyrábět, což vede k šetření provozních nákladů a snížení výrobní ceny automobilu.

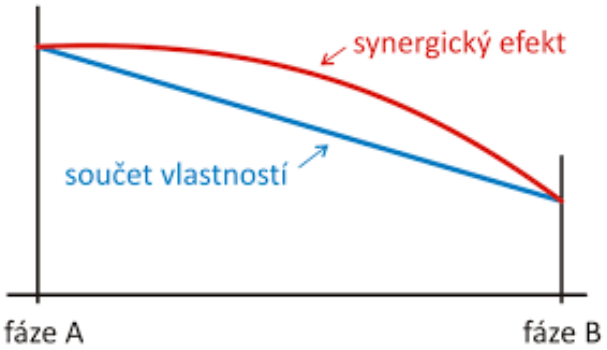
Cílem bakalářské práce je vytvoření vláknového kompozitního materiálu na bázi polyesterové a epoxy-vinylesterové pryskyřice pomocí přídavku dutých skleněných mikročástic Q-CEL za použití výrobní technologie pultruze.

V bakalářské práci byl sledován vliv odlehčujícího plniva Q-CEL na výsledné mechanické vlastnosti kompozitního profilu. Pro zjištění mechanických vlastností byla použita destruktivní tříbodová ohybová zkouška. Součástí práce je porovnání vlastností takto odlehčených kompozitních profilů s neodlehčenými (referenčními) profily. Dále byla sledována adheze a distribuce plniva a výztuže za pomocí světelné mikroskopie a rastrovací elektronové mikroskopie (SEM).

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozitní materiály

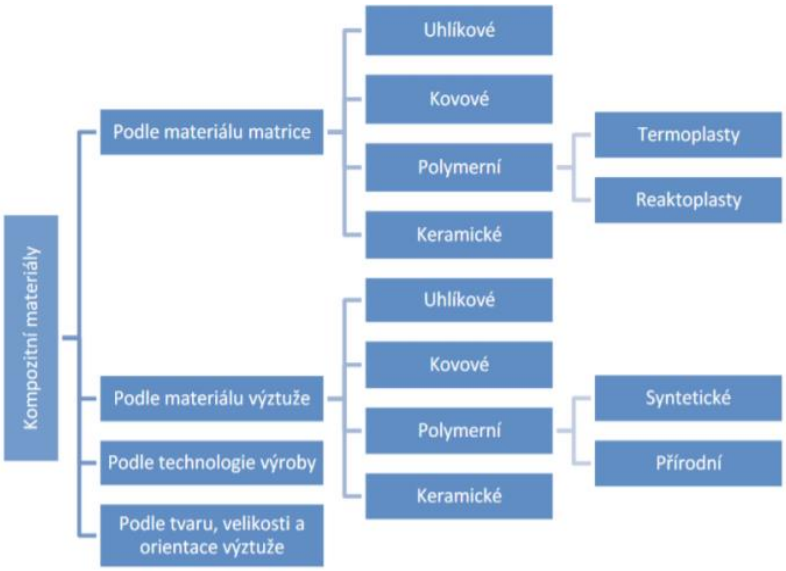
Pojmem kompozitní materiály lze označit takové materiály, které jsou složeny ze dvou či více složek (fází). Jednotlivé složky se vyznačují odlišností jak chemického složení, tak i mechanických a fyzikálních vlastností. Hlavní stavební částí kompozitního materiálu se nazývá matrice. Jde o kontinuální fázi, ve které je uložena diskontinuální fáze, zvaná výztuž. Aby se jednalo stále o kompozitní materiál, musí být v materiálu zastoupena výztuž podílem nejméně 5 %. Kompozitní materiály jsou charakteristické tzv. synergickým účinkem. Jedná se o efekt, kdy materiál má vlastnosti, které nemohou být dosaženy sumací vlastností jednotlivých složek (fází) materiálu (viz Obr. 1). [1]



Obr. 1: Závislost sledovaných vlastností na obsahu fází kompozitního systému (Synergický efekt) [2]

2.1.1 Dělení kompozitních materiálů

Kompozity jsou děleny na základě mnoha kritérií. Nejčastěji je uvedeno dělení na základě použitého materiálu jednotlivých fází. Kompozity se dále dělí v závislosti na použití technologické výroby nebo dle tvaru, orientace a velikosti výztuže (viz Obr. 2). [3]



Obr. 2: Dělení kompozitních materiálů [3]

2.2 Matrice

Matrice, jako spojitá fáze, udává kompozitu tvar, slouží jako přenašeč napětí do vyztužující fáze, spojuje jednotlivé části výztuže, zajišťuje stálost polohy výztuže, zabraňuje rozvoji křehkého lomu, zabezpečuje ochranu výztuže před okolními vlivy a poškozením. Vyznačuje se vyšší plasticitou a nižší pevností v tahu než výztuž. Důležitou vlastností matrice je její adheze k vyztužující fázi. Adheze ovlivňuje šíření a rozprostření napětí mezi fázemi. Dle zdroje napětí lze síly působící na kompozit rozdělit na chemické působení, fyzikálně chemické působení, fyzikální působení a mechanické zaklínění. [4] [5] [6]

Rozhraní mezi fázemi je nejslabším místem kompozitu a má klíčový efekt na celkové mechanické vlastnosti. Vazba mezi fázemi může být zprostředkována fyzikálními vazbami, kdy o kvalitě materiálu rozhoduje smáčivost povrchu fázi a rozdíl koeficientů tepelné roztažnosti, nebo vazbami chemickými, kdy kromě těchto efektů dochází i k chemické interakci mezi fázemi. Pro zlepšení adheze mezi fázemi je nutné jednotlivé fáze kompozitu chemicky či mechanicky upravit. Podmínkou dobrého spojení fází je dobrá smáčivost a co možná nejnižší povrchová energie matrice. Podle typu použité matrice, můžeme kompozitní materiály rozdělit na polymerní, kovové, uhlíkové a keramické. [4] [5] [6]

2.2.1 Kompozity s polymerní matricí

Matrice může být tvořena termoplastem (např. polypropylen, polyamid, polykarbonát), reaktoplastem (např. nenasycený polyester, epoxidová pryskyřice, vinylester) nebo síťovaným elastomerem (styren-butadien, akrylonitril-butadien). Všeobecně se polymerní matrice vyznačují vyšší rázovou a vrubovou houževnatostí, než matrice kovové či keramické, odolností proti korozi, nízkou hustotu a dielektrickými vlastnostmi. Při použití uhlíkových vláken lze dosáhnout dobré propustnosti rentgenového záření. [7] [8] [9]

Kompozitní materiály s polymerní matrici se mohou v závislosti na použité výztuži vyznačovat těmito vlastnostmi: pevností a modulem pružnosti podobným jako mají kovové materiály, vysokou odolností proti únavě materiálu, vysokou rázovou a vrubovou houževnatostí a odolností proti šíření trhlin a defektů, vysokou teplotní odolností, nehořlavostí, elektrickou vodivostí, odolností proti korozi nebo agresivnímu prostředí, schopností tlumit vibrace, nízkou teplotní roztažností a v neposlední řadě i recyklovatelností. [7] [8] [9]

Trendem ve výrobě polymerních matric je snaha upřednostňovat termoplastické matrice před matricemi z reaktoplastu. V průběhu tvorby reaktoplastické matrice dochází k chemické síťové reakce tzv. vytvrzování. Průběh reakce vytvrzování je obtížně kontrolovatelný a mohou vznikat vedlejší zplodiny. Naproti tomu zpracování termoplastů je založeno na jednoduchém principu tavení a následném ochlazení. Výsledné kompozity mají výbornou schopnost recyklace. Pří velkých nárocích na houževnatost nebo chemickou odolnost jsou upřednostňovány termoplasty před reaktoplasty. [7] [8] [9]

2.2.1.1 Matrice z reaktoplastu

Reaktoplastické matrice jsou tvořeny polymery, které přecházejí z viskózního do tuhého zesíťovaného stavu, pomocí nevratné chemické reakce tzv. vytvrzováním, díky které mají reaktoplasty dobrou chemickou odolnost, tepelnou a rozměrovou stabilitu, jsou dále netavitelné a nerozpustné. [10]

Zpracovatelnost reaktoplastů je jednodušší oproti zpracovatelnosti termoplastů, neboť se ve výchozím stavu nacházejí s menší molekulární hmotností než termoplasty, tudíž mají i nižší teplotu tání. Nevýhodou reaktoplastů je jejich malá houževnatost a skutečnost, že kompozitní materiály s reaktoplastickou matricí nejdou recyklovat. [10]

Jako perspektivní materiály se jeví klasické nenasycené polyesterové pryskyřice v kombinaci se skleněnými vlákny, které se vyznačují dobrou zpracovatelností a relativně nízkou cenou. Kompozitní materiály na bázi fenolických pryskyřic jsou používány díky vysoké odolnosti proti hoření a nízkému vývinu škodlivin během degradačních procesů za vysokých teplot. Další reaktoplasty aplikované do kompozitních matric jsou tvrdé polyuretanové pryskyřice, bismaleimidy, kyanoestery, benzoxaziny, ftalonitrilové pryskyřice, reaktoplastové polyetheramidy a polychinoxaliny. [7] [10]

Fenoplasty

Fenolformaldehydové pryskyřice jsou připravovaný polymerací formaldehydu s fenolem. Podle vzájemného poměru použitého fenolu a formaldehydu a způsobu kondenzace se přípravují buď rezoly nebo novolaky. Novolaky jsou používány jako přísada do impregnačních laků, nátěrových hmot a tmelů. Jako technicky tvrditelné pryskyřice se novolaky připravují ve formě prášků. Rezoly jsou používány jako lepidla, pojidla, výchozí látka pro nátěrové hmoty a jako polotovary pro přípravu licích pryskyřic. [4]

Fenoplasty slouží pro konstrukci elektrotechnických součástek a jsou výchozí látkou pro konstrukční prvky ve strojírenství. Jelikož neobsahují volný fenol, jsou zdravotně nezávadné. [4]

Epoxidové pryskyřice

Nejvšestrannějšími reaktoplasty pro výrobu matric kompozitu jsou epoxidové pryskyřice, které se vyznačují výbornou odolností proti únavě a tečení, vysokou adhezí ke kovovým, skleněným, keramickým výztužím, malým smrštěním při vytvrzování a elektroizolačními vlastnostmi. Druhy epoxidových pryskyřic se liší způsobem vytvrzování. Během vytvrzování nedochází ke vzniku bublin v závislosti na uvolňování těkavých látek. [4] [7] [10]

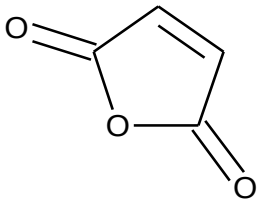
Aminoplasty

V mnoha aspektech se aminoplasty podobají fenoplastům. Jsou připravovány kondenzací formaldehydu s amino sloučeninami (např. močovina, melanin). Močovinformaldehydové pryskyřice mají využití jako impregnační prostředky, lepidla, nátěrové hmoty nebo vypalovací laky. Melaninformaldehydové pryskyřice nejsou zdraví škodlivé a mají uplatnění v elektroizolačních hmotách. [4]

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

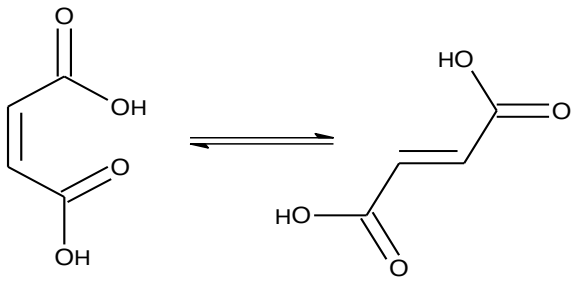
Jde o nenasycené pryskyřice s lineární nebo málo větvenou strukturou, jejíchž molekuly obsahují dvojné vazby, schopny se po přídavku vhodného iniciátoru zúčastnit kopolymerační reakce, kdy dochází k zesíťování. Jsou charakteristické dobrou zpracovatelností a nízkou cenou, na druhou stranu také špatnou odolností vůči vysokým teplotám. V kompozitních materiálech se nejčastěji používají v kombinaci se skleněnými vlákny. Nenasycené polyestery lze připravovat esterifikací, hydrolýzou, alkoholýzou, acidolýzou nebo esterolýzou. [4] [11] [7]

Esterifikace je založena na reakci organické kyseliny a organického alkoholu. Pro přípravu delšího řetezce je nutné, aby každý z reagentů obsahoval alespoň dvě -COOH skupiny (di-kyseliny) nebo dvě -OH skupiny (dioly). Výchozí látkou pro syntézu UP je anhydrid kyseliny maleinové, jehož struktura je na Obr. 3.



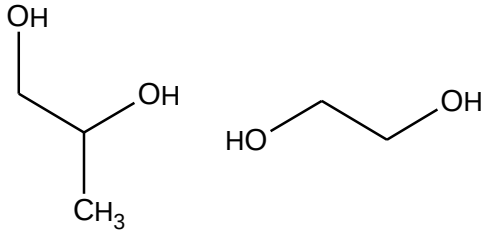
Obr. 3: Anhydrid kyseliny maleinové

Další složkou je kyselina maleinová, která až z 90 % izomeruje na kyselinu fumarovou (viz Obr. 4), kdy vznikají přímé řetězce, které zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu.



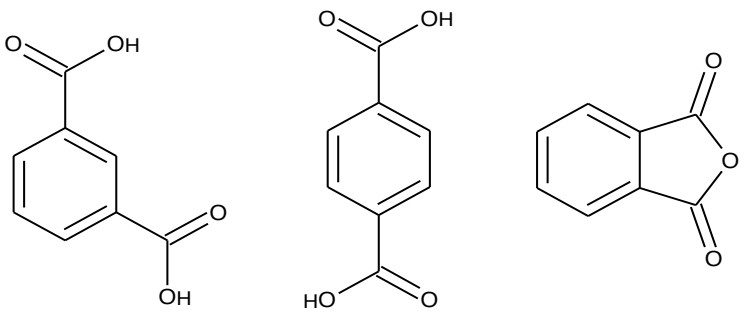
Obr. 4: Izomerace kyseliny maleinové na kyselinu fumarovou

Jako více funkční alkoholy se nejčastěji používají různé druhy diolů (např. ethylenglykol, propylenglykol).



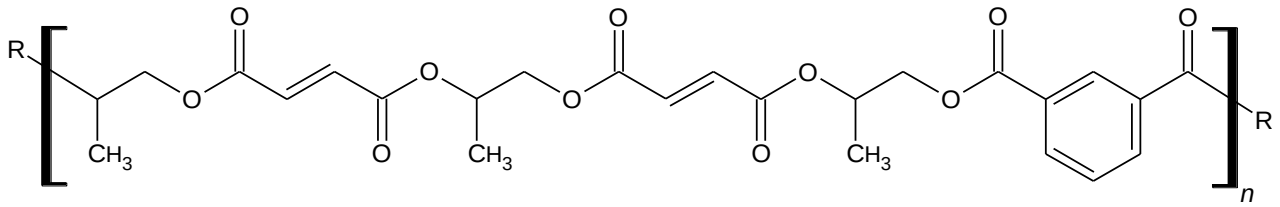
Obr. 5: Propylenglykol (vlevo) a etylenglykol (vpravo)

Čisté řetězce pryskyřice se vyznačují velkou reaktivitou a špatnými mechanickými vlastnostmi. V důsledku toho se připravují polyestery, obsahující modifikující kyselinu. Jako modifikující kyseliny se používají izomery kyseliny ftalové (např. kyselina paraftalová, kyselina metaftalová). Často dochází k upřednostnění reaktivnějšího ftalanhydridu místo kyseliny orthoftalové. [11]



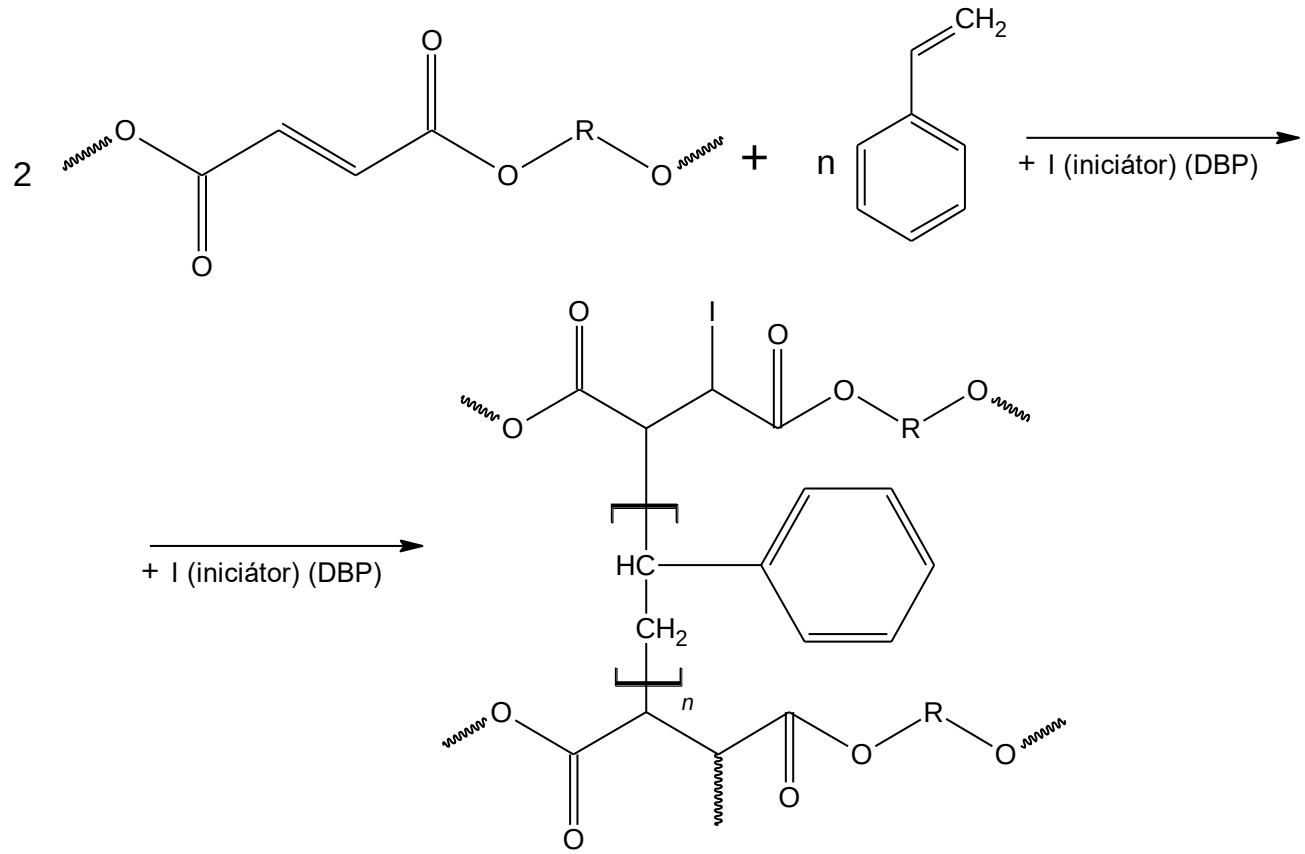
Obr. 6: Kyselina metaftalová (vlevo), kyselina paraftalová (uprostřed), ftalanhydrid (vpravo)

Esterifikace se odehrává v tavenině při teplotách 180–220 °C za působení inertní atmosféry. Dochází ke vzniku řetězce nenasyceného polyesteru. [11]



Obr. 7: Řetězec nenasycené polyesterové pryskyřice [11]

Vytvrzování UP je radikálová kopolymarace, která je způsobena reaktivitou nenasyceného monomeru a polyesteru. Reakce se skládá z iniciace, kdy dochází k otevření dvojné vazby, pak následuje propagace, kdy dochází k růstu řetězce a reakce je zakončena terminací, která je zapříčiněna disproporcionací či srážkou radikálů. Iniciátorem reakce jsou organické diperoxidy (např. dibenzoylperoxid), které se termicky rozpadají na volné radikály. Kromě iniciátoru se přidává k pryskyřici i katalyzátor na bázi kovových solí (např. kobalt). Reakce je exotermická a takto zesíťovaná struktura je velmi chemicky odolná. Nejčastěji používané reaktivní rozpouštědlo je styren, kdy krátké oligomerní řetězce UP jsou během vytvrzování spojovány styrenovými můstky. Teplota reakce je ovlivněna iniciátorem. [4] [11] [12]



Obr. 8: Síťování nenasycené polyesterové pryskyřice [13]

Vinylesterové pryskyřice (VE)

Vinylesterové pryskyřice jsou vhodné pro konstrukci kompozitních materiálů s uhlíkovými nebo skleněnými vlákny, neboť díky přítomnosti hydroxylových skupin dosahují lepší schopnosti adheze k sekundární fázi . Jsou charakteristické vysokou odolností vůči mechanickému namáhání a proti působení agresivního chemického prostředí. V konstrukcích, kde nejsou kladeny vysoké nároky na vysokou teplotní odolnost a elektrické vlastnosti, jsou vinylesterové prysykřice preferovány před epoxidovými pryskyřicemi, které jsou dražší a časově náročnější na výrobu. Narozdíl od UP obsahují VE dvě esterové skupiny chráněné methylovou skupinou, tudíž jsou více odolné v zásaditých prostředích. Další rozdíl je v koncentraci nenasycených dvojných vazeb po reakci se styrenem. U VE je tato koncentrace téměř zandebatelná, tudíž dochází k lepší odolnosti vůči ultafialovému záření než u UP. Kompozity z vinylesterových pryskyřic nachází využití v automobilovém, leteckém, papírenském a petrochemickém průmyslu. [11]

Výchozí látky pro syntézu VE jsou bis-fenol A, epichlorrhydrin a kyselina akrylová. Během první části syntézy dochází k alkalické kondenzaci epichlorhydrinu s bis-fenolem A za vzniku diandiglycidyletheru, kde epoxidové skupiny reagují s fenolickým hydroxylem za vzniku epoxidových oligomerů. Dále dochází k esterifikaci epoxidových skupin kyselinou akrylovou. Velký důraz je kladen na teplotu reakční směsi, aby nedošlo k esterifikaci hydroxylových skupin uvnitř řetězce, což by mělo za následek růst počtu nestabilních esterových vazeb a snížení chemické odolnosti VE. Po esterifikaci získame řetězec s reaktivními vinylovými skupinami. Vytvrzování probíhá stejně jako UP mechanismem radikálové polymerace dvojných vazeb. [11]

Tab. 1: Mechanické vlastnosti vybraných reaktoplastů [14]

	Hustota (10^3 kg·m^{-3})	**Modul pružnosti v tahu** (GPa)	**Pevnost v tahu** (MPa)	**Mezní tažnost (kritická)** (%)
Epoxidová pryskyřice	1,1–1,4	2,1–6,0	35–90	1–10
Polyesterové pryskyřice	1,1–1,5	1,3–4,5	45–85	1–5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50–60	1–3
Polyimidy (do 350 °C)	1,2–1,9	3,0–3,1	80–190	2–40

2.2.1.2 Matrice z termoplastu

Termoplastické matrice jsou tvořeny polymery, které jsou schopny opakovaně tepelným ohřevem měknout a následným chlazením tuhnout. Tato vlastnost je způsobena specifickou strukturou termoplastů, která je tvořena lineárními řetězci spojených fyzikálním zapletením řetězců a mezimolekulárními silami. [7] [10]

Nejpoužívanějšími termoplasty pro výrobu matric jsou polyethylen (PE), polyvinylchlorid (PVC), polypropylen (PP), polyethylentereftalát (PET), polyamid (PA), polyether ether keton (PEEK) a polystyren (PS). Z biodegradabilních termoplastů je nejpoužívanější kyselina polymléčná (PLA), která se vyrábí fermentačním kvašením glukózy za vniku kyseliny mléčné a její následné polymerace. Jako výztuž jsou nejčastěji použity skleněná vlákna a částicová plniva. Oproti matrici

z reaktoplastu má termoplastická matrice tu výhodu, že nedochází k tvrzení a tím pádem dosahuje i kratší výrobní doby a umožňují dlouhodobé skladování. [7] [10]

Mezi nevýhody termoplastů patří velká viskozita taveniny, která je o 2–4 řády větší než u klasických reaktoplastů. To vede ke vzniku defektů na rozhraní matrice a výztuže, což má negativní vliv na vlastnosti kompozitu. Tomu je možné předejít použitím impregnovaných vláken výztuže, ovšem to se promítne do výsledné ceny kompozitu. [7] [10]

Tab. 2: Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů [14]

	Hustota (10^3 kg·m^{-3})	**Modul pružnosti v tahu** (GPa)	**Pevnost v tahu** (MPa)	**Mezní tažnost (kritická)** (%)
Polypropylen	0,90	1,1–1,5	28–41	10–700
Polyamid	1,42	2,8–2,4	76–83	60–300
Polykarbonát	1,21	2,1–2,8	62–76	110–130
PEEK	1,31	3,8	70	50–130

2.2.2 Kompozity s kovovou matricí

Nejčastěji používanými kovovými matricemi jsou matrice z lehkých slitin (hořčík, hliník, titan). Dalšími typy jsou matrice na bázi železa, mědi nebo kobaltu. V současné době se používají matrice z kovu v závislosti na teplotě. Pro teploty 300–400 °C se používají slitiny hliníku. Pro teplotní rozmezí 500–600 °C se používají slitiny titanu a pro teploty nad 1000 °C se používají tzv. superslitiny na bází kobaltu, železa a niklu. [7]

Výztuž je tvořena zpravidla keramickým materiálem (např. vlákna z karbidu křemíku) nebo kovovým materiálem (např. wolframová vlákna). Největší význam, co se měrné pevnosti a tuhosti týče, mají kompozity vyztužené pomocí kontinuálních vláken. Vyztužení kovu těmito vlákny vede k celkovému vylepšení mechanických vlastností, tj. houževnatost, tuhost, pevnost ve smyku, nebo odolnost proti únavě materiálu. [7]

Kovové matrice lze i opatřit povlakem pro zlepšení vlastností. Jako nejslibnější vláknová výztuž do kompozitních materiálů s kovou matricí byla zařazena vlákna z karbidu křemíku. Tyto vlákna mají vysokou odolnost vůči oxidaci, vysokou pevnost, velký modul pružnosti, stabilitu mechanických vlastnosti i za vysokých teplot, vysokou tepelnou vodivost a nízký koeficient teplotní roztažnosti. [7]

Ekonomicky i technologicky nejpřijatelnější technologický způsob výroby kovových kompozitních materiálů s kontinuálními vlákny je označován způsob infiltrací roztaveného kovu do již vytvořené formy vyplněné vlákny. Dalším technologickým způsobem výroby je difúzní spojování kovových předimpregnovaných vláken, které probíhá za vysoké teploty a tlaku. Metoda je velmi finančně nákladná a používá se vesměs jen pro výrobu kompozitních materiálů pro letecký a kosmický průmysl. [7]

2.2.3 Kompozity s keramickou matricí

Keramické matrice se vyznačují nízkou hodnotou lomové houževnatosti, dobrou tepelnou a chemickou odolností a křehkým chováním. Proto je jejich technické využití značně omezené. Z keramických matric, největším potenciálem technického využití disponují matrice na bázi nitridu

křemíku, karbidu křemíku, oxidu křemíku nebo oxidu zirkonu. Pro zlepšení vlastnosti je potřeba použití vhodné vyztužující fáze (např. vláknové kontinuální výztuže). [6] [7]

Vláknová výztuž je ovšem limitována objemovým podílem vláknem maximálně 50 %, neboť matrice se po překročení této hranice stává pórovitou. Jako vyztužující fáze se nejčastěji využívá vlákna z karbidu křemíku nebo uhlíková vlákna, která v důsledku vysokých teplot během přípravy i následného použití kompozitních materiálů s keramickou matricí jsou opatřena ochranou vrstvou karbidu křemíku, aby nedošlo k oxidaci vláken. [6] [7]

Rozdílem oproti materiálům s kovou a polymerní matricí je způsob vyztužení matrice keramické. Při použití kontinuálních vláken jako vyztužující fáze, je při mechanickém zatěžování kompozitu riziko vzniku mikrotrhlin. K narušení vláken tedy dochází postupně, aniž by došlo k náhlé deformaci materiálu. Podmínkou ovšem zůstává, aby lomová deformace vláken byla větší než lomová deformace keramické matrice (u kovových nebo polymerních matric je tomu naopak).
Zvýšení lomové houževnatosti je možné získat pomocí vyztužení dlouhými kontinuálními vlákny, nicméně stále bude hodnota nižší oproti materiálům s kovovou matricí. Vzhledem k možnosti porušení vláken výztuže v závislosti působení vysokého tlaku, není možné použit pro výrobu technologické postupy založeny na slinování, jak je běžné u monolitické keramiky. Základem výroby kompozitu s keramickou matricí je použití vláknové formy ve tvaru výrobku, kde matrice vzniká chemickou reakci či pyrolýzou prekurzorů. [6] [7]

2.2.4 Kompozity s uhlíkovou matricí

Matrice je tvořena uhlíkem, který se může vyskytovat v různém prostorovém uspořádáním. Uhlíková matrice se vyznačuje především odolností vůči vysokým teplotám, díky které se materiály tvořené uhlíkovou matricí používají pro vysoce náročné aplikace, jako je kosmický, farmaceutický nebo letecký průmysl. Nevýhodou uhlíkové matrice je poměrně malá odolnost vůči oxidaci při teplotách nad 500 °C, proto dochází k povrchovým úpravám (např. karbidem křemíku) nebo zavedením antioxidačních látek. [7]

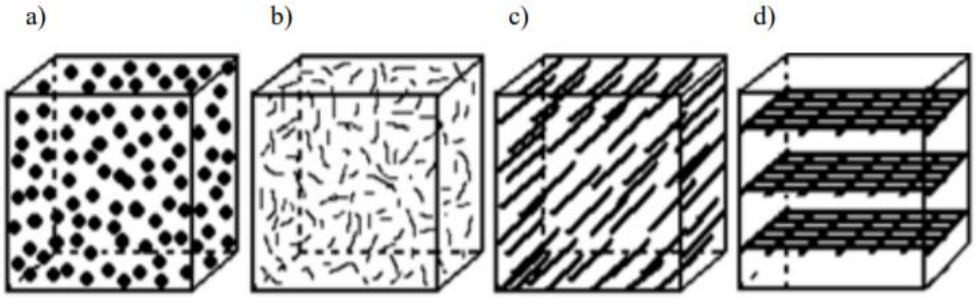
Kompozitní materiály obsahující uhlíkovou matrici mají kromě vysoké teplotní odolnosti řadu specifických vlastnosti: nízký koeficient lineární teplotní roztažnosti, vysokou odolnost proti teplotním výkyvům, schopnost korekce tepelné vodivosti, velmi dobrou pevnost v kolmém směru na vyztužující fázi, rostoucí pevnost s teplotou, nízkou hustotu, výbornou chemickou odolnost, vysokou odolnost proti cyklickému namáhání, odolnost proti záření a biokompatibilitu. [7]

Příprava uhlíkové matrice je podobná přípravě matrice keramické. První technologický postup je založen na principu reakční komory, kde za vysokých teplot je forma tvořena uhlíkovými vlákny vystavena plynnému uhlovodíku, který se rozkládá za vzniku uhlíku. Druhá metoda je založena na principu karbonizace pryskyřice, kdy do předem připravené formy vyplněné uhlíkovými vlákny je za vysoké teploty infiltrována pryskyřice či smola. [7]

2.3 Výztuž

Hlavní vlastností sekundární fáze je absorpce vnějšího zatížení, proto je kladen vysoký důraz na pevnost a vysoký modul pružnosti. Charakteristikou výztuže je malá deformace do lomu při převládajícím podílu pružné deformace. Celkové vlastnosti kompozitního materiálu ovlivňuje výztuž svou geometrií, která je popsána tvarem, orientací a koncentrací. Dle druhu zpevňující fáze jsou kompozity děleny na kompozity s kovovou, skleněnou, keramickou, polymerní, uhlíkovou

výztuží nebo kompozity zpevněné whiskery. Dle typu orientace výztuže jsou kompozity děleny na částicové a vláknové (viz Obr. 3) [4]



Obr. 9: Dělení kompozitu dle orientace výztuže: a) částicový b) krátkovláknový c, d) dlouhovláknový [15]

2.3.1 Částicové kompozity

Charakteristikou částicových kompozitů je volně rozptýlená výztuž v matrici. Jednotlivé částice výztuže mají ve všech směrech přibližně stejný rozměr a jsou navzájem oddělené. Sekundární fáze má nejčastěji podobu koule, krychle, destičky nebo tyčinky. Částice omezují rozvoj plastických deformací matrice a oproti vláknům se podílí na přenosu namáhání v mnohem menším rozsahu. Dále se přítomnost částic projevuje ovlivněním mechanických vlastností, a to zejména zvýšeným odporem proti působení nevratných plastických deformací, což má vliv na zvýšení meze kluzu, tvrdostí, pevností a snížením houževnosti. Nejvíce používaným materiálem jsou oxidy, nitridy, karbidy a boridy. Částicová výztuž ve formě plniva se používá ke zlepšení vlastností např. úprava tepelné a elektrické vodivosti, redukce tření a smrštění, zlepšení odolnosti při vysokých teplotách a odolnosti proti opotřebení a zvýšení tvrdosti. Použití plniv se zároveň používá i pro snížení výrobní ceny materiálu. [1] [4]

Hlavní kategorií částicových kompozitů tvoří disperzně zpevněné kovové materiály vyráběné práškovou metalurgií. Materiály jsou izotropní, dají se svařovat a hlavní uplatnění mají pro tepelně namáhané konstrukce např. jaderné reaktory, součástky raket nebo turbínové lopatky. Dále se používají i částicemi vyztužené keramické materiály. Tuhá keramická fáze je rozptýlená v keramické matrici, což vede především k odolnosti materiálu za vysokých teplot. Dále je možno kombinovat keramickou matrici a kovových částic za vzniku cermetu, které se používají pro vysokorychlostní obráběcí nástroje. [4]

2.3.2 Vláknové kompozity

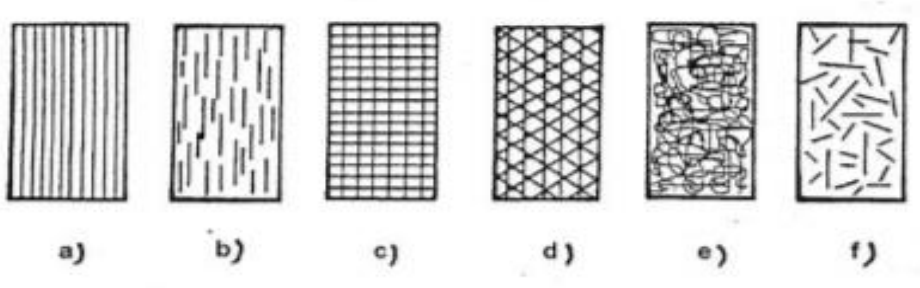
Vláknové kompozity jsou v praxi nejvíce uplatňovány a je jím věnováno nejvíce pozornosti. Možnost kombinovat tuhá vlákna (např. kovové, polymerní, skleněné, keramické, přírodní) s matricí, umožňuje vytvářet kompozity s vysokou houževnatostí, tuhostí a pevností. Velký poměr délky k průměru vláken umožňuje přenést velmi velkou část napětí z matrice do výztuže. Charakteristickou vlastností vláken je vysoký modul pružnosti. Vlákna jsou charakteristická svou anizotropií, modul pružnosti i pevnost je tedy větší ve směru osy než ve směru kolmém. Předností vláknových kompozitů je možnost vyrábět finální výrobek i ve tvarech, které jiným postupem nelze docílit. [1] [4]

Kompozit s výztuží z jednosměrně uložených dlouhých vláken vykazuje anizotropní vlatnosti, dané orientací uspořádání vláken. Víceosé uspořádání vláken zaručuje menší stupeň anizotropie.

Jako izotropní kompozit se považuje materiál se sekundární fází tvořenou nahodilým uspořádáním vláken. [1]

Určit izotropii nebo anizotropii kompozitů tvořených krátkými vlákny lze určit o poznaní hůř než u kompozitů s výztuží tvořenou dlouhými vlákny, neboť orientace vláken se odvíjí od výrobního procesu. Předpokládá se, že orientace vláken je náhodná, avšak vhodnou volbou výrobní metody (např. vystřikování, vytlačování) lze docílit zvýšenou orientací ve směru tečení. [1]

Skladba kompozitních materiálu s dlouhými vlákny se zpravidla vytváří skládáním anioztropních vrstev tzv. lamin, které nemohou být použity samostatně. Proto se vrstvy spojují do vícevrstevného kompozitu, aby byl materiál vhodný pro technické aplikace. Symetričnost výztuže určuje tvarovou stabilitu během teplotních změn. Pro výrobu takového materiálu jsou použita předimpregnovaná vlákna tzv. prepregy. Pokud jsou materiály tvořené vrstvami z různého materiálu, jedná se o hybridní lamináty. Vytvořením hybridního laminátu lze například zvýšit odolnost ve směru kolmém na rovinu výztuže. [1]



Obr. 10: Typy vláknové výztuže v závislosti na orientaci vláken: a) jednosměrná dlouhá vlákna b) jednosměrná krátká vlákna c) dvousměrné vyztužení d) vícesměrné vyztužení e) náhodná orientace vláken f) náhodná orientace krátkých vláken [1]

2.3.2.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna patří mezi nejpoužívanější typ výztuže pro kompozitní materiály s polymerní matricí. Vyznačují se vysokou měrnou pevností, příznivou cenou oproti ostatním typům vláken, nízkým součinitelem teplotní roztažnosti, dobrou chemickou odolností, odolností proti nárazům, nehořlavostí, skvělými tepelnými a zvukově-izolačními vlastnostmi, ale i poměrně nízkým modulem pružnosti v tahu. Skleněná vlákna jsou charakteristická svým hydrofilním povrchem, kdy dochází k adsorpci vody, což vede ke snížení povrchové energie vláken a špatnému smáčení polymerní matricí. Pro zlepšení mechanických vlastností se skleněná vlákna povrchově upravují. Své uplatnění kompozitní materiály se sklovláknovou výztuží nachází zejména v leteckém a automobilovém průmyslu, pro konstrukci trupu lodí a sportovního vybavení. [5]

Skleněná vlákna jsou vyráběna kontinuální technologií tažením sklářského kmenu, kdy sklovina vytéká z platino-rhodiových trysek ve formě vějířových vláken. Vlákna mají průměr od 3,5–20 μm, kdy výsledný průměr je ovlivněn rozdílem rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Vlákna jsou velmi abrazivní a lámavá, proto prochází vodním ostřikem a přes lubrikační zařízení, kdy je na vlákna nanesen lubrikační přípravek. Použití takto ošetřených vláken není vhodné pro kompozitní materiály, neboť lubrikovaná vlákna nemají potřebnou adhezi k matrici. Proto jsou vlákna opatřena ještě tzv. apretační vrstvou, která zvyšuje adhezi především k pryskyřicovým matricím. Jako apretační vrstvy se používají organické silany s vhodnými bočními skupinami (např. amino, vinyl), schopné reagovat s pryskyřicí. Dochází ke vzniku snadno hydrolyzovatelné vazby a pomocí vzniklých silanolů dochází k povrchové kondenzaci tenké adhezní vrstvy vázané

k povrchu vláken. Vlákna se posléze sdružují do pramenců a ty jsou kontinuálně navíjeny na zásobní cívky a skladovány. [16] [11]

Vlastnosti skleněných vláken se odvíjí od jejích složení (viz Tab. 3). Nejčastěji používaným typem skla je tzv. E-sklo, které se používá do kompozitů s nenasycenými polyestery. Jedná se o borosilikátové sklo s dobrou kombinací mechanických a elektrických vlastností. Nevýhodou borosilikátových skel je malá odolnost vůči vodným roztokům kyselin a zásad a malá odolnost proti korozi. Dalším typem skla je tzv. S-sklo, používané v kombinace s epoxidovými pryskyřicemi, které je vhodné především pro mechanicky namáhané konstrukce, neboť se vyznačují větší teplotní odolností, menší hustotou, větším modulem pružnosti, větší korozní odolností a větší pevností. V elektrotechnice nebo energetice se využívá tzv. D-sklo, především pro svoji nízkou dielektrickou konstantu. Hlavní charakteristikou tzv. L-skla je především vysoký obsah olova, které zvyšuje nepropustnost pro rentgenové záření, což se využívá v lékařství nebo vědeckých přístrojích. Dalším typem je tzv. C-sklo, které je odolné především vůči kyselinám, ovšem mechanické vlastnosti jsou horší než u E-skla. [7] [11]

Tab. 3: Vlastnosti jednotlivých druhů skel [11]

Typ skla	E	S	D	C	L
Hustota ($kg \cdot m^{-3}$)	2540	2490	2160	2490	4300
Pevnost v tahu (GPa)	3,50	4,65	2,45	2,80	1,68
Modul pružnosti v tahu (GPa)	73,50	86,80	52,50	70,00	51,1
Poměrné prodloužení do mezi pevnosti (%)	4,80	5,40	4,70	-	-
Dielektrická konstanta, 20 °C, (10^6 Hz)	5,80	4,53	3,56	6,24	9,49

2.3.2.2 Kovová vlákna

Použití kovových vláken jako výztuže je vesměs určeno pro kompozitní materiály s kovovou matricí, nicméně se mohou kombinovat i s matricí polymerní či keramickou. Nevýhodou takto zhotoveného kompozitu je ovšem vyšší měrná hmotnost. Pro vyztužení matrice z lehké slitiny se používají nejčastěji ocelová vlákna z uhlíkových ocelí, která jsou charakteristická teplotní odolností do 300 °C. Pro zpevňování matric, tvořených ze žárupevných slitin, se preferují kovy s vysokou teplotní odolností (např. molybden, wolfram). Své uplatnění v mechanicky namáhaných kompozitech nachází výztuž z kovového skla a pozornost je věnována zejména vývoji kovo-keramických a organokovových vláken. [1]

Tab. 4: Vlastnosti vybraných kovových vláken [1]

Vlákno	Hustota ($g \cdot cm^{-3}$)	Pevnost v tahu (GPa)	Modul pružnosti (GPa)	Teplota tavení (°C)
chrom	7,40	1,00–4,00	353–424	1800
molybden	10,20	2,41	358	2622
ocel	7,80	2,80–4,14	200	1450
wolfram	19,10	3,00	348	3400

2.3.2.3 Keramická vlákna

Keramická vlákna jsou charakteristická nízkou měrnou hmotností, vysokým modulem pružnosti a vysokou pevností. Jsou používány v materiálech, kde je kladen důraz na žáruvzdornost, tepelnou a zvukovou izolaci a chemickou odolnost. Nejčastěji používanými jsou vlákna borová a vlákna na bázi karbidů, nitridů a oxidů. [1] [17]

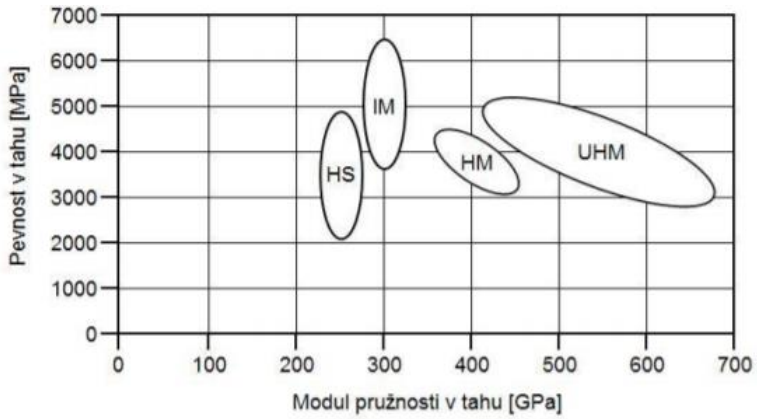
Borová vlákna jsou velmi drahá na výrobu, což je zapříčiněno použitím speciálních výrobních metod, neboť bor patří k látkám, které se obtížně tvarují. Ke kontinuální výrobě borových vláken se používá metoda chemické depozice v plynné fázi na wolframové vlákno. Pro přípravu kompozitů je nutno takto připravená vlákna ošetřit povlakem z karbidu křemíku nebo karbidu boru, jelikož bor chemicky reaguje s kovy. [1] [7]

Tab. 5: Vlastnosti vybraných keramických vláken [1]

Vlákno	**Hustota** ($g \cdot cm^{-3}$)	**Pevnost v tahu** (GPa)	**Modul pružnosti** (GPa)	**Teplota tavení** (°C)
bor	2,63	3,50	400	2300
oxid hlinitý	3,15	2,08	380	2050
karbid křemíku	3,30	3,30	420	2690
oxid zirkoničitý	4,84	2,07	344	2700

2.3.2.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou tepelnou odolností, pevností, vysokým modulem pružnosti a nízkou měrnou hmotností. Výborné mechanické vlastnosti vyplývají z anizotropní hexagonální struktury grafitu. V uhlíkových vláknech jsou hexagonální roviny uhlíkových atomů orientovány ve směru osy vlákna, ale jejich prostorové uspořádání vedle sebe již není zcela pravidelné. Jsou vyráběna v karbonizovaném a grafitizovaném stavu. Vlákna v karbonizovaném stavu, také označována jako HS (vysokopevnostní), se vyznačují menším modulem pružnosti a větší pevností než vlákna v grafitizovaném stavu, také označována jako HM (vysokomodulová). Dále se liší teplotou zpracování, kdy karbonizace probíhá za teploty 900–1500 °C a grafitizace probíhá za teploty 2600–2800 °C. Uhlíková vlákna se dále dělí na ultravysokopevnostní (UHS), středněmodulová (IM) a ultravysokomodulová (UHM) (viz Obr. 11). Výchozími látkami výroby uhlíkových vláken jsou polyakrylonitrilová vlákna nebo smoly z pyrolýzy ropy. [1] [5] [7] [11]



Obr. 11: Rozdělení uhlíkových vláken dle závislosti pevnosti v tahu na modulu pružnosti v tahu [5]

2.3.2.5 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou tvořena aromatickými polyamidy, které ve svém řetězci obsahují amidové a aromatické skupiny. Vyznačují se vysokou odolností proti rozpouštědlům, vysokou pevností v tahu, vysokým modulem pružnosti v tahu a odolností vůči abrazi a vysokým teplotám. Nejznámějším zástupcem těchto vláken je Kevlar, což je obchodní název pro para-aramid, u kterého jsou benzenová jádra v para-poloze oproti amidové skupině. Řetězce ve vláknech jsou orientovány do směru vlákna, což vede k silné anizotropii mechanických a fyzikálních vlastností. Mezi jednotlivými vlákny působí síly na bázi vodíkových můstků, které zvyšují schopnost absorpce vody, což vede k a negativnímu ovlivnění výsledných vlastností. Další nevýhodou aramidových vláken je citlivost na působení ultrafialového záření, které vlákna degraduje a rozkládá. Aramidová vlákna se používají v textilním průmyslu pro výrobu ochranných oděvů, helem, bot, ale i pro výrobu části letadel, raketoplánů, brzdících systémů, kabelů a sportovního vybavení. [7] [18]

2.3.2.6 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna se dělí na rostlinná, živočišná a anorganická vlákna. Rostlinná vlákna se získávají ze stonků (např. juta, len konopí, bambus), ze semen (např. bavlna), z plodů (např. kokosové vlákno) nebo z listů (např. sisal, banánovník). Živočišná vlákna jsou především zastoupena různými druhy srstí (např. ovčí vlna, srst z velblouda, koňská srst, vlna z lamy) nebo sekrety hmyzu (např. přírodní hedvábí). Anorganická vlákna tvoří především vlákna z nerostů (např. azbest) a polosyntetická vlákna (např. čedičová, strusková). Přírodní vlákna mají především zastoupení v biodegradabilních kompozitních materiálech. Hlavními výhodami je snadná zpracovatelnost, nízká hustota, recyklovatelnost a nenáročnost produkce. Nevýhodou přírodních vláken je nízká odolnost vůči teplotám nad 200 °C a ovlivnění vlastnosti klimatickými podmínkami. [11] [19]

2.4 Výroba kompozitních materiálů

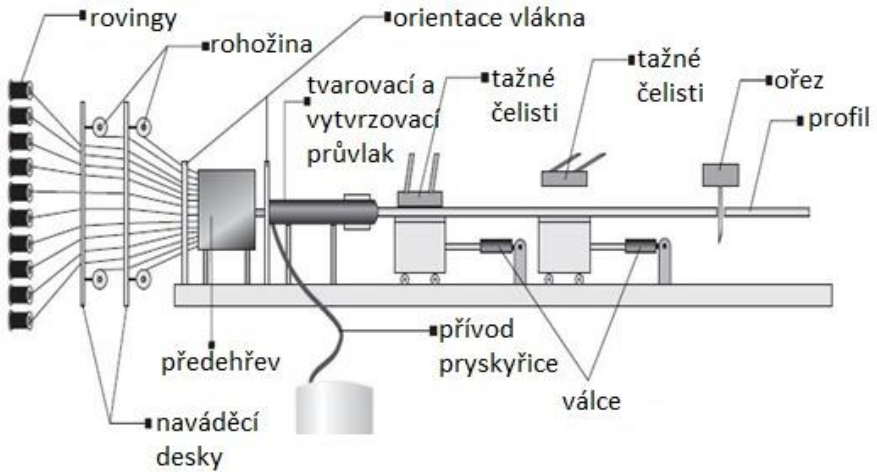
Během výroby kompozitních materiálů je kladen důraz především na jednoduchost a hospodárnost výroby, rovnoměrné uložení výztuže, možnost tepelného zpracování materiálu po výrobě, dobré spojení matrice s výztuží a možnost změny objemového množství výztuže. Dalším a neméně důležitým aspektem je produktivita, která zkracuje jak výrobní čas, tak i použité náklady. Při volbě vhodného technologického postupu výroby kompozitního materiálu je nutno brát v potaz velikost a členitost dílce, kvalitu povrchu, požadované vlastnosti, sériovost dílce, limity nákladů a mezi těmito aspekty hledat určitý kompromis. [1] [20]

Vzhledem k zaměření práce je pozornost věnována především technologickým postupům používaných pro výrobu kompozitů aplikovaných v automobilovém průmyslu.

2.4.1 Pultruze

Pultruze je kontinuální proces vysokoobjemové výroby kompozitů s polymerní reaktoplastickou matricí na bázi polyesterových, epoxidových, metakrylátových, polyuretanových nebo vinylesterových pryskyřic. Umožňuje velkou možnost úpravy výsledných vlastností (např. mechanické, elektrické, chemické nebo požární vlastnosti) v závislosti na aplikaci a ceně výsledného kompozitu. Technologie je vhodná jak pro výrobu tenkých a jednoduchých profilů, tak i tvarově složitých a rozměrných tyčí či trubek. Jako výztuž se nejčastěji používají vlákna skleněná, uhlíková, aramidová nebo rohože o maximálním obsahu 80 %. [20] [21] [22]

Vyztužující rovingová vlákna, případně v kombinaci s rohoží či tkaninou prochází iniciovanou pryskyřicí, kde dochází k prosycení a odstranění přebytečné pryskyřice. Lázeň s pryskyřicí zpravidla obsahuje aditiva (např. plniva, barviva, retardéry hoření) pro zlepšení výsledných vlastností kompozitu. Následně dochází k vtažení do tvarovacích a vytvrzovacích forem, které odpovídají tvaru výsledného profilu. Ve formě dochází k vytvrzení pryskyřice zvýšenou teplotou působením elektrického ohřevu, topného média nebo vysokofrekvenčního pole. Po vytvrzení je profil tažen hydraulickými čelistmi a dělen dle požadovaných rozměrů. [20] [21]



Obr. 12: Schéma pultruzní linky [20]

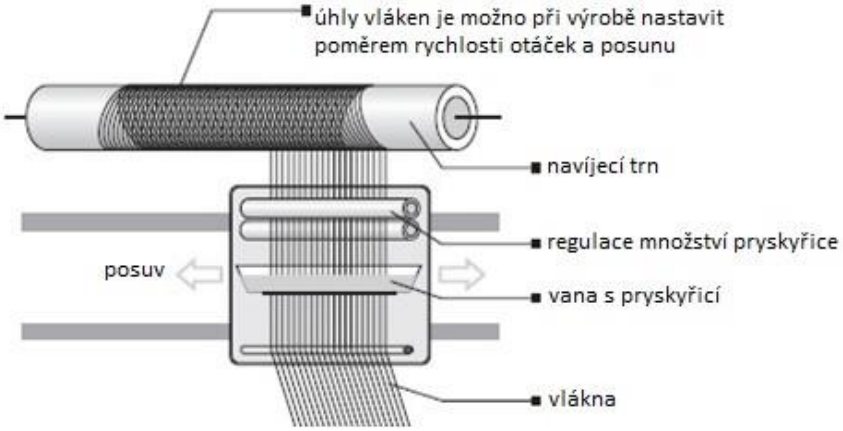
2.4.2 Ruční kladení

Jde o klasickou a velmi jednoduchou metodu postupného kladení vrstev výztuže do povrchově ošetřené formy, která je následně prosycena iniciovanou pryskyřicí. Po vytlačení přebytečné pryskyřice a vzduchových bublin pomocí válečků dochází k vytvrzení pryskyřice. Jako matrice se používají nejčastěji epoxidové nebo polyesterové pryskyřice. Výztuž je tvořena skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými vlákny nejčastěji ve formě tkanin. Metoda ručního kladení je vhodná pro výrobu jak jednoduchých, tak i tvarově složitých kompozitů (např. autoboxy, poklopy, části karoserie). Pro svou nízkonákladovost je metoda často používána i pro výrobu zkušebních prototypů. [11] [20] [23]

Obr. 13: Schéma ručního kladení [20]

2.4.3 Navíjení

Jde o technologii výroby dutých těles (např. trubky, nádrže, nádoby) postupným navíjením pryskyřicí prosycených skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken na trn. Poměrem rychlosti posunu ukládacího zařízení a rychlosti otáčení trnu lze korigovat úhel kladení vláken. Po navinutí dochází k vytvrzení pryskyřice (polyesterové, vinylesterové, epoxidové) pomocí zvýšené teploty a demontáži hotového výrobku z trnu. Nevýhodou metody jsou velké počáteční náklady na pořízení výrobní linky. [11] [20]

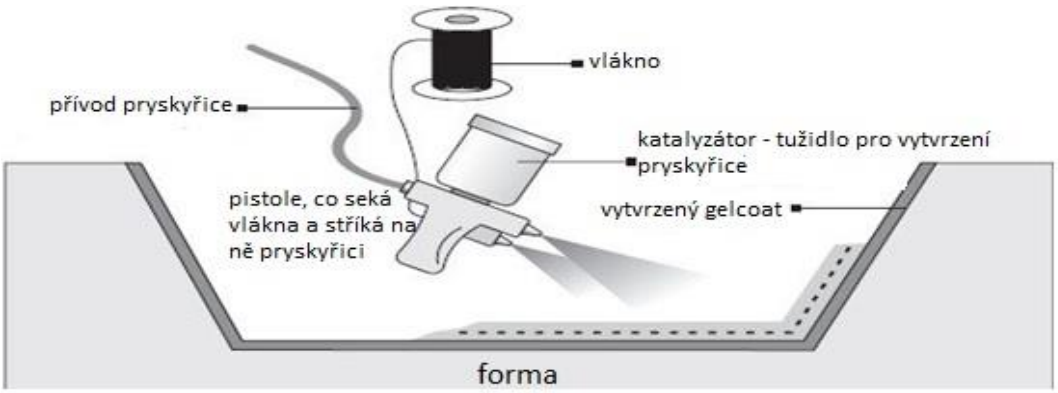


Obr. 14: Schéma navíjení [20]

2.4.4 Stříkání

Technologie stříkání se používá pro výrobu nepříliš rozměrově složitých dílců (např. trupy lodí, nárazníky). Jedná se o tzv. otevřenou technologii, tudíž je nutné zabezpečit odvětrávání pracoviště. Nevýhodou stříkání je vysoká počáteční investice do stříkacích, odvětrávacích zařízení a množství odpadního materiálu. [11] [20]

Pomocí speciální stříkací pistole dochází k nanášení směsi pryskyřice a nasekaných skleněných vláken přímo do formy. Dle počtu nanesených vrstev lze ovlivnit tloušťku materiálu. Každá vrstva je zhutňována různě velkými válečky či rýhováním, což zároveň vede k vytlačení přebytečných vzduchových bublin. Nejčastěji používanou výztuží je skleněný roving nebo skleněný roving odlehčený mikrokuličkami expandovaného polymeru. Matrice je nejčastěji na bázi polyesterových pryskyřic. [20]



Obr. 15: Schéma stříkání [20]

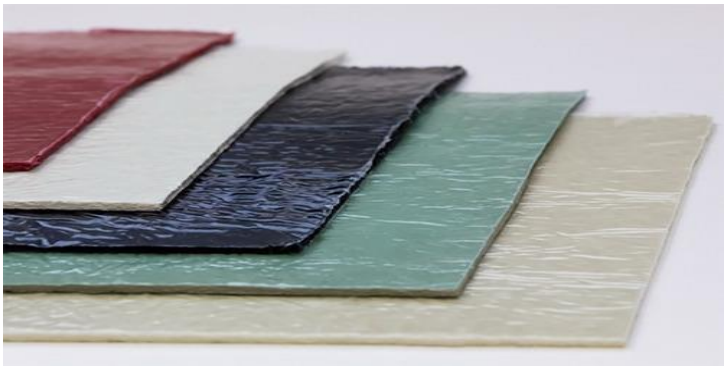
2.4.5 Lisování

Principem metody lisování je umístění výchozího materiálu, nejčastěji BMC nebo SMC do formy, kde působením tlaku dochází k zformování výrobku do požadovaného tvaru a následnému vytvrzení. Výhodou metody je automatizace a vysoká reprodukovatelnost kvality. Metoda lisování je vhodná především pro velkosériovou výrobu malých a středně velkých dílů (např. spoilery, nárazníky, lišty, přístrojové desky). Kompozity pro aplikaci v automobilovém průmyslu se vyrábí především pomocí lisováním v autoklávu, lisováním za tepla a tlaku nebo také lisováním pomocí vakua. [11] [20] [24]

2.4.5.1 Sheet Moulding Compound (SMC)

Technologie SMC je kontinuální proces výroby kompozitních polotovarů, nejčastěji na bázi polyesterové pryskyřice a sekaných skelných vláken, ve formě plátů, které jsou určené především k lisování. Díly (např. venkovní části karoserie, kabiny nákladních automobilů) vyrobené metodou SMC mají vysokou kvalitu povrchu. Nevýhodou technologie je pořizovací cena forem a lisů, tudíž nachází uplatnění jen při vysokosériových výrobách. [11] [24]

Nejprve dochází ke smíchání pryskyřice a aditiv v mísiči nebo extrudéru. Poté je směs nanesena rovnoměrně na výztuž a tato vrstva opatřena z obou stran ochranou fólií. Následně takto připravený plát prochází sérií válců, kde dochází k prosycení a zhutnění vláken. Nakonec je materiál navíjen na zásobníky. [11] [24]



Obr. 16: SMC pláty [24]

2.4.5.2 Bulk Moulding Compound (BMC)

Výstupem technologie BMC je polotovar určený k lisování či vstřikování. Kompozitní polotovar se nachází ve formě kompaktní směsi pryskyřice, nehomogenně rozmístěných krátkých vláken a aditiv. Nejpoužívanějším typem výztuže jsou krátká skleněná vlákna (<25 mm) o objemu 5–20 %. Matrice bývá nejčastěji na bázi polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic. BMC materiály se vyznačují příznivou cenou, tepelnou stabilitou, vysokým modulem pružnosti a velmi nízkým smrštěním při výrobě. [24] [25]

BMC směs je připravována z iniciované pryskyřice, do které se přidávají nevyztužující plniva (např. uhličitan vápenatý, mastek, slída) a aditiva, což vede ke vzniku „pasty“. Následně je ke směsi přidána výztuž ve formě skleněných vláken a vše je důkladně homogenizováno. Výsledná kompaktní směs putuje do extrudéru, kde je řezána pneumatickým řezačem a dávkována pro transport. [25] [26]

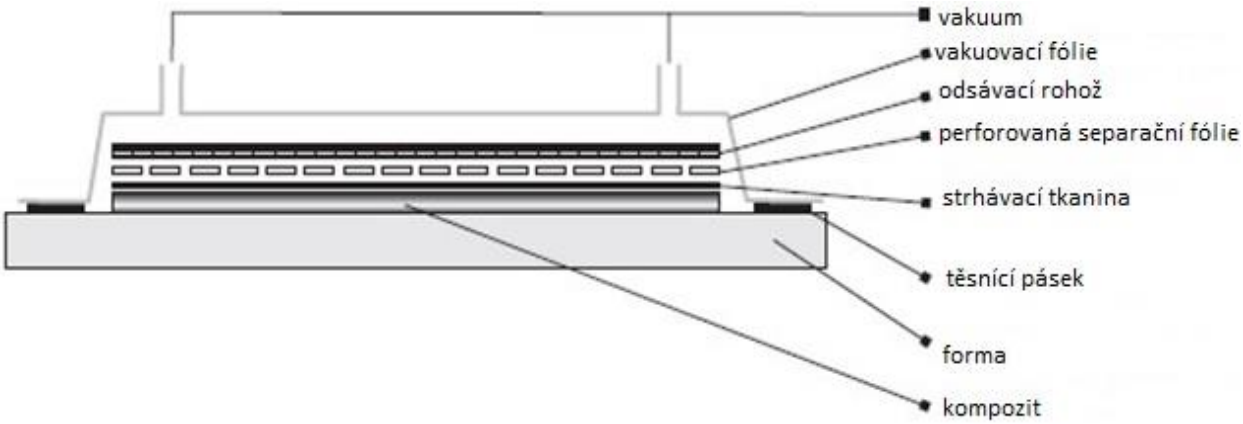
Obr. 17: BMC materiál [27]

2.4.5.3 Lisování v autoklávu

Lisování v autoklávu je určeno především pro výrobu kompozitů aplikovaných v kosmickém, leteckém průmyslu a pro výrobu supersportů či závodních monopostů. Nejpoužívanějším typem materiálu jsou prepregy ze skleněných, uhlíkových, aramidových nebo borových vláken zakomponované v matrici z epoxidové pryskyřice, která se vytvrzuje ve vyhřívaném autoklávu při teplotách 120–200 °C a tlaku až 600 kPa. Nevýhodou metody jsou značně vysoké pořizovací náklady a velikost vyráběných dílů je omezena velikostí autoklávu. [11] [20] [28]

2.4.5.4 Metoda vakuového lisování

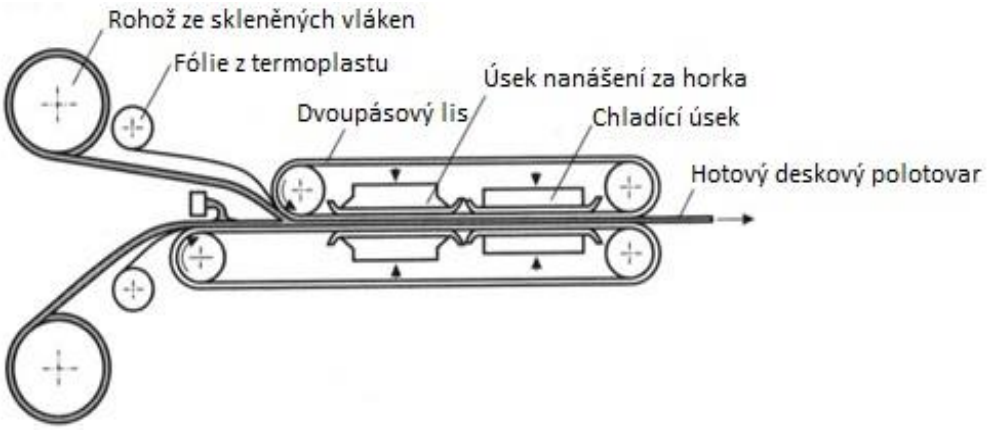
Metoda vakuového lisování se používá pro kompozity s vysokým obsahem výztuže a sendvičové struktury. Jako výchozí materiál se používá pryskyřicí prosycená výztuž (např. skleněná, uhlíková vlákna), která jsou do formy vložena metodou ručního kladení. Na poslední vrstvu je aplikována odtrhovací tkanina, perforovaná separační folie a odsávací rohož, která absorbuje přebytečnou pryskyřici. Následně dochází k odsátí vzduchových bublin vakuem. Nejčastěji se používají polyesterové a epoxidové pryskyřice, které se vytvrzují za normální teploty nebo ve vytápěných komorách. Po vytvrzení je stržena odtrhovací tkanina a výrobek dokončen. Nevýhodou metody je časová náročnost a tvorba velkého množství odpadního materiálu. [11] [20]



Obr. 18: Schéma lisování pomocí vakua [20]

2.4.6 Glass Mat Thermoplastic (GMT)

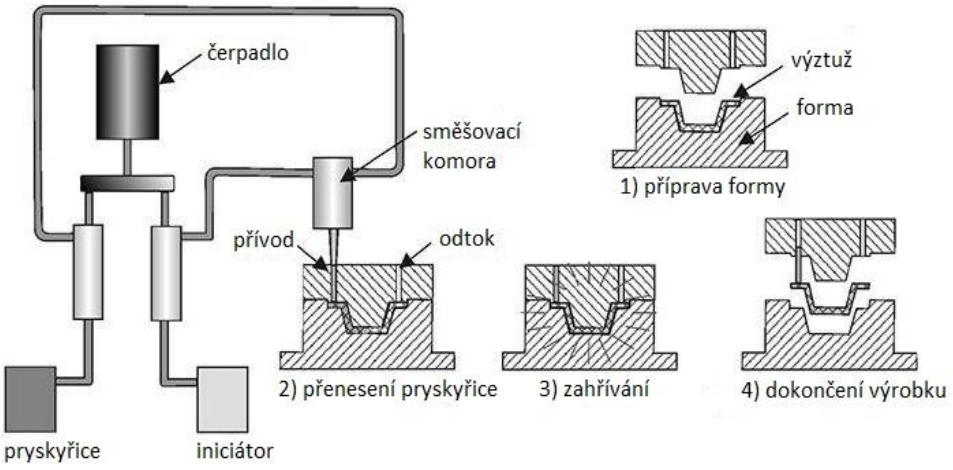
Principem metody je kontinuální navíjení termoplastické fólie na dopravní pás, do které se pokládá rohož tvořená skleněným rovingem, který se rozpadá na jednotlivá vlákna a dochází k propojení s matricí. Následně dochází k propojení obou fází v lisu za působení tlaku a zvýšené teploty. Materiál je poté chlazen a řezán na deskovitý polotovar. Technologie GMT je vhodná pro výrobu velmi lehkých a tenkých polotovarů s termoplastickou matricí (nejčastěji z polypropylenu nebo polyamidu) vyztužené skleněnými vlákny. Hlavní výhodou metody je možnost plné automatizace procesu výroby a krátké časy výrobního cyklu. Pomocí GMT se v automobilovém průmysl vyrábí nárazníky, kryty podvozků a konstrukce sedadel. [5]



Obr. 19: Schéma GMT [5]

2.4.7 Resin transfer moulding (RTM)

RTM je metoda, při které dochází k vstříknutí katalyzované pryskyřice přímo do uzavřené a povrchově upravené formy, ve které se nachází suchá výztuž. Pryskyřice je vytvrzena za zvýšené teploty a následně je forma otevřena a výrobek dokončen. Výhodou RTM je možnost vyrobit díly, které mají na obou stranách kvalitní povrch. Nevýhodou RTM je pořizovací cena kovových forem a fyzikální vlastnosti takto vyrobených produktů neodpovídají požadavkům na použití v konstrukčních aplikacích jako nosné prvky. [11]



Obr. 20: Schéma RTM [29]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části byla výroba kompozitních profilů pomocí metody pultruze. Následně byly profily podrobeny tříbodové ohybové zkoušce, kdy byly sledovány jejich mechanické vlastnosti. U odlehčených kompozitních profilů byla provedena kontrola distribuce a adheze plniva a výztuže pomocí rastrovací elektronové mikroskopie a světelné mikroskopie.

Veškeré komponenty pro výrobu byly poskytnuty společností GDP Koral s.r.o., která se věnuje výrobě a inovaci pultrudovaných kompozitních materiálů pro automobilový průmysl.

3.1 Vyrobený kompozitní materiál

V rámci výroby byly vyrobeny dva typy kompozitního materiálu. První typ materiálu obsahoval pouze matrici a výztuž. Tento materiál byl označen jako referenční. Druhý typ materiálu obsahoval kromě matrice a výztuže i odlehčující plnivo v podobě Q-CEL. Veškeré sledované vlastnosti odlehčeného kompozitního materiálu byly následně porovnávány s referenčním (neodlehčeným) materiálem a byl sledován vliv plniva na výsledné vlastnosti kompozitu. Porovnávány byly vždy dva typy materiálu se stejným obj. % výztuže.

Rozměr pultrudovaného testovacího tělesa byl zvolen na 8×4 mm, neboť se jedná o standartní rozměr, který může být podroben zkouškám mechanických vlastnosti dle platných norem.

Vzhledem k výrobním limitům laboratorní pultruzní linky mohlo být použito maximálně 17 svazků vyztužujících vláken, což odpovídá 60 obj. % z celkového objemu kompozitního profilu při zvoleném rozměru. Dále byla vlákna postupně odstraňována tak, aby byla získána řada kompozitů s postupně se snižujícím obsahem vláken. Objemové zastoupení výztuže kompozitu v průběhu výroby bylo korigováno na základě Tab. 6.

Zastoupení mikročástic plniva Q-CEL v průběhu výroby bylo zvoleno tak, aby součet objemových procent plniva a výztuže vždy tvořil 60 obj. %

Materiálová bilance neodlehčených (referenčních) a odlehčených vzorků je přehledně uvedena v Tab. 7.

Veškeré výpočty byly vztaženy na 1 m kompozitního profilu. Pří této délce je výsledný objem profilu 32 cm^3. Na základě znalosti objemového zastoupení a hustoty vláken, plniva i matrice byly spočítány dle vztahu (3.1) teoretické a poté objemové hmotnosti 1 metru profilu.

$$m_c = m_m + m_f \tag{3.1}$$

kde:

m_c = hmotnost 1 m kompozitu (g);

m_m = hmotnost matrice v 1 m kompozitu (g);

m_f = hmotnost vláken v 1 m kompozitu (g).

Tab. 6: Zastoupení objemovaných skleněných vláken

Výztuž (obj. %)	**Počet vláken**
60,0	17
49,4	14
38,8	11
35,3	10
28,2	8

Tab. 7: Přehledová tabulka vyrobených vzorků

Vzorek	**Matrice**	**obsah vláken** (obj. %)	**obsah Q-CEL** (obj. %)	**teoretická hustota** (g/cm^3)
1	UP	60,0	0	1,924
2	UP	49,4	0	1,772
3	UP	38,8	0	1,620
4	UP	35,3	0	1,570
5	UP	28,2	0	1,468
6	EVE	60,0	0	1,924
7	EVE	49,4	0	1,772
8	EVE	38,8	0	1,620
9	EVE	35,3	0	1,570
10	EVE	28,2	0	1,468
11	UP	49,4	10,6	1,680
12	UP	38,8	21,2	1,436
13	UP	35,3	24,7	1,358
14	UP	28,2	31,8	1,191
15	EVE	49,4	10,6	1,680
16	EVE	38,8	21,2	1,436
17	EVE	35,3	24,7	1,358
18	EVE	28,2	31,8	1,191

3.1.1 Matrice

V průběhu výroby kompozitních profilů byly použity dva typy matrice, a to matrice na bázi nenasycené polyesterové pryskyřice (UP) a matrice na bázi epoxy-vinylesterové pryskyřice (EVE). Hodnota hustoty pro obě matrice činila 1,062 g/cm^3. Kompletní receptury matrice byly poskytnuty společností GDP Koral s.r.o., tudíž přesné složení nemůže být zveřejněno.

Součástí matrice byly „Low Profile“ aditiva, která slouží ke snížení smrštění matrice v průběhu vytvrzování. Dále matrice obsahovala separátory, které zajišťují nízkou přilnavost k formě. Součástí byly také 3 typy iniciátorů, které v závislosti na různé teplotě během vytvrzování iniciují síťování pryskyřice.

3.1.2 Výztuž

Výztuž kompozitního materiálu byla tvořena speciálními objemovanými skleněnými vlákny o hustotě 2,5 g/cm^3. Vlákna byla charakterizována délkovou hmotností 2500 tex. Objemovaná vlákna se vyznačují zvýšenou schopností prosycení vláken pryskyřicí společně s plnivem. Plnivo je díky struktuře objemovaných vláken rovnoměrněji rozloženo v kompozitu a dochází k eliminaci vzniku defektů.

3.1.3 Plnivo

Jako plnivo byly použity duté skleněné mikrokuličky tzv. Q-CELY, vyrobené společností Potters Industries, o sypné hmotnosti 0,14 g/cm^3, majoritní velikosti 0,075 mm, vyrobené z chemicky

stabilního borosilikátového skla. Tyto částice byly použity ve formě bílého tekoucího prášku, který byl přidáván do připravené matrice.

Použitím částic Q-CEL dochází ke snížení objemové hmotnosti matrice, což vede k odlehčení kompozitu. Zároveň s množstvím přidaných částic dochází ke zvýšení viskozity matrice, což vede k předejití tvorby defektů, neboť matrice se vyznačuje optimálním tokem ve formě. Dále dochází ke zvýšení tepelné izolace. [30]

3.2 Výrobní proces

Výroba probíhala na zmenšené verzi průmyslově používaných pultruzních linek. První část laboratorní pultruzní linky se nazývá zásobník výztuže, kde jsou uloženy cívky se skleněnými vlákny. Vlákna poté prochází impregnační vanou, kde se nachází již připravená iniciovaná pryskyřice a dochází k prosycení vláken. Pro lepší prosycení vláken je impregnační vana opatřena češlem. Takto prosycená vlákna pokračují mezi válce, kde dochází k odstranění přebytečné pryskyřice. Následuje naváděcí zařízení, které napomáhá k rovnoměrnému rozmístění vláken v kompozitu. Vlákna jsou posléze vtahovaná do 60 cm dlouhé formy, vyrobené z nástrojové oceli. Forma je rozdělena na dvě teplotní zóny a opatřena vyhřívacími tělesy. Do formy jsou dále zabudovány teplotní čidla, které nám umožnují monitoring a zpětnou vazebnou regulaci teploty formy. V rámci výroby kompozitu byla teplota formy nastavena na 120 °C a 140 °C. Vytvrzený profil byl odtahován ocelovými válci, které byly ošetřeny vrstvou neoprenu ke zvýšení tření mezi profilem a válci. Rychlost odtahu byla nastavena v závislosti na optimální hodnotě odtahové síly na 0,29 m/min. Celý odtahový mechanismus byl poháněn elektromotorem.

Vyrobené kompozitní profily byly uskladněny po dobu jednoho týdne při laboratorní teplotě, aby došlo k odstranění vnitřního pnutí materiálu vlivem nedostatečného vytvrzení. Teprve po uplynutí této doby byly profily řezány na požadovanou délku, zváženy a testovány.

Obr. 21: Použitá laboratorní pultruzní linka

3.3 Ohybová zkouška

Ohybová zkouška je standartní destruktivní mechanickou zkouškou pro ověření plastických a pevnostních vlastností materiálu. Metoda je vhodná pro tuhé i polotuhé materiály, mohou být tudíž testovány nevyztužené i vyztužené polymerní materiály, včetně vysoko modulových kompozitů a elektroizolačních materiálů. [31] [32]

Ohybová zkouška byla provedena v souladu se zněním normy ASTM D790-17 na přístroji od společnosti Instron, konkrétně na modelu 5985. Pro optimální citlivost měření byla použita měřící hlava s maximálním zatížením do 200 kN.

Vyrobený kompozit byl řezán na 77 mm dlouhé profily, které byly podrobeny tříbodové ohybové zkoušce. Těleso bylo rovnoměrně umístěno na podpěry, vzájemně vzdálené 64 mm (viz Obr. 22). Pro každý typ profilu bylo měření provedeno osmkrát. Rychlost působení zatěžovacího trnu na profil byla nastavena na 1,70 mm/min. Sledovanými veličinami v průběhu měření byl modul pružnosti a maximální ohybové napětí. Ohybové napětí materiálu bylo zjištěno na základě vztahu (3.2) a modul pružnosti dle vztahů (3.3) a (3.4). V rámci měřeni byla sledována i deformace při maximálním ohybovém zatížení. To bylo následně vyřazeno z předmětu zkoumání, neboť výsledky neměly dostatečnou výpovědní hodnotu.

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \tag{3.2}$$

kde:
σ_f = ohybové napětí (MPa);
F = síla (N);
L = vzdálenost podpěr (mm);
b = šířka tělesa (mm);
h = tloušťka tělesa (mm).

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} \cdot L^2}{6 \cdot h} \tag{3.3}$$

kde:
s_i = jednotlivá hodnota průhybu (mm);
L = vzdálenost podpěr (mm);
ε_{fi} = hodnota ohybové deformace (-);
h = tloušťka tělesa (mm).

$$E_f = \frac{(\sigma_{f2} - \sigma_{f1})}{(\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1})} \tag{3.4}$$

kde:
E_f = modul pružnosti (GPa);
σ_{f2} = ohybové napětí v průhybu s_2 (MPa);
σ_{f1} = ohybové napětí v průhybu s_1 (MPa);
ε_{f2} = 0,0025 (-);
ε_{f1} = 0,0005 (-).

Obr. 22: Tříbodová ohybová zkouška s umístěným profilem

3.4 Pozorování distribuce Q-CEL

V rámci pozorování rozmístění plniva odlehčeného kompozitního materiálu byly zvoleny dvě metody, a to rastrovací elektronová mikroskopie a světelná mikroskopie.

3.4.1 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

Metodou SEM lze analyzovat jak organické, tak i anorganické látky či materiály na atomární úrovni. SEM funguje na principu svazku elektronů, pohybujícího se v pravoúhlém rastru vůči zkoumanému vzorku. Pomocí interakce těchto elektronů se vzorkem vzniká signál, který je závislý na struktuře povrchu zkoumaného materiálu. Daný signál je následně zpracováván na konečný obraz. [33]

Během pozorování byl použit BSE detektor, jelikož bylo nutné monochromaticky rozlišit matrici a výztuž ve zkoumaném vzorku kompozitu.

3.4.2 Světelná mikroskopie

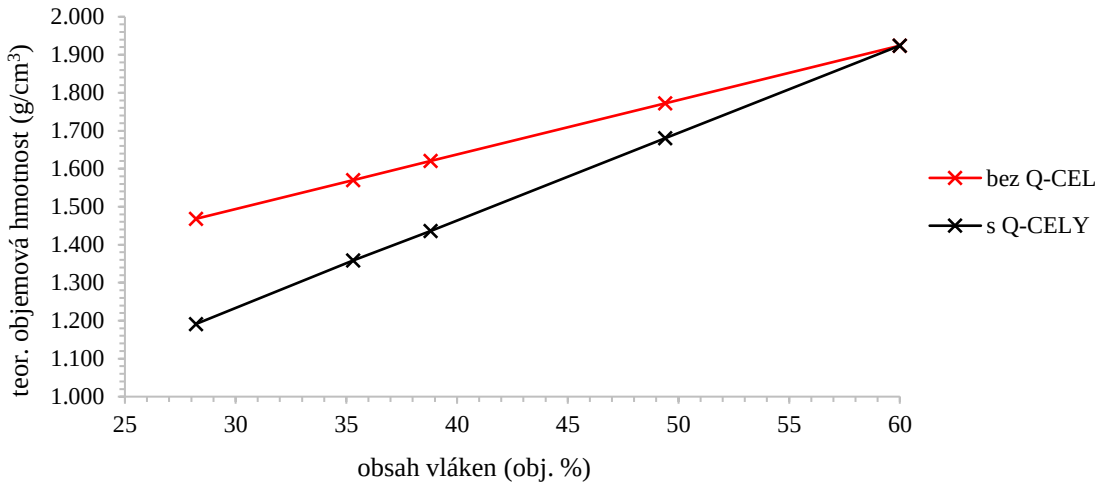
Světelná neboli optická mikroskopie, je v porovnání se SEM velmi nenáročná zobrazovací metoda. Její zastoupení napříč všemi průmyslovými odvětvími je velice široké, ať už kvůli pořizovacím nákladům či jednoduchému ovládání. Principem metody je zobrazení pozorovaného objektu za využití viditelné části spektra (420–760 nm). Světelné mikroskopy jsou limitovány maximálním zvětšením (tisíckrát), rozlišovacími detaily (na úrovni 0,2 µm) a světelností. [34]

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

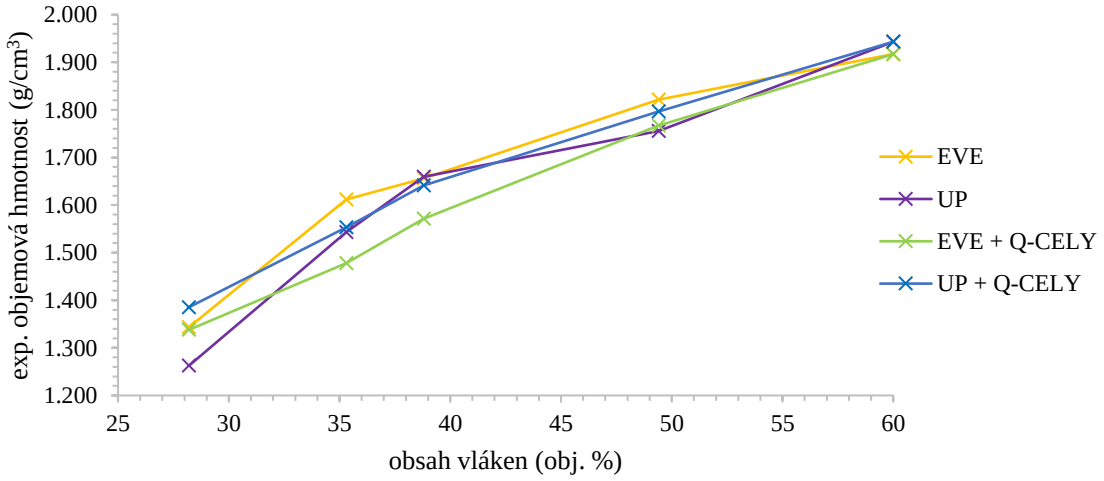
4.1 Hmotnost kompozitního materiálu

Pro referenční vzorky s oběma typy polymerních matric i pro lehčené vzorky byla vypočítána objemová hmotnost a graficky porovnána na Obr. 23. Z grafu je patrné, že teoretická hmotnost se zmenšujícím se obj. % vláken klesá lineárně, jak u neodlehčeného (referenčního) materiálu, tak i u odlehčeného materiálu. U odlehčeného materiálu klesá teoretická hmotnost rychleji, což odpovídá očekávání a potvrzuje správnost výpočtů.

U experimentální hmotnosti již ale dochází k odchýlení od linearity (viz Obr. 24). U neodlehčených profilů dochází navíc ke zlomu (pro EVE u 35,3 obj. % vláken, v případě UP u 38,8 obj. % vláken), kdy dochází k prudkému poklesu hmotnosti. Tento pokles hmotnosti je způsoben výrobním limitem používané pultruzní linky. Nebylo dosaženo optimálního prosycení vláken a již na pohled bylo vidět, že na vyrobených profilech se nachází defekty v podobě suchých vláken. Tyto defekty pak jsou příčinou prudkého poklesu hmotnosti a celkově i mechanických vlastností.



Obr. 23: Grafické zobrazení závislosti teoretické objemové hmotnosti1 m profilu na obsahu vláken



Obr. 24: Grafické zobrazení závislosti experimentální objemové hmotnosti 1 m profilu na obsahu vláken

U odlehčených profilů nebylo zaznamenáno žádné výrazné odchýlení od linearity poklesu hmotnosti. Přídavkem částic Q-CEL byl posunut technologický limit výroby, který byl tak výrazně patrný u neodlehčených profilů. Díky posunutí technologického limitu bylo možné následné pozorování mechanických vlastností profilů i s nižším obj. % vláken, neboť profily neosahovaly defekty v podobě špatně prosycených vláken. Byla ovšem zjištěna poměrně velká odchylka teoretické a experimentální hmotnosti, která se zvyšujícím se obj. % Q-CEL rostla. Experimentální hmotnost byla vždy větší než hmotnost teoretická. Tato odchylka byla způsobena rozdílným obj. % plniva ve vyrobeném profilu od teoretického, neboť se nepodařilo aplikovat veškeré plnivo do profilu. To bylo pravděpodobně způsobeno dotažením odkapávacích válců, které slouží k odstranění přebytečné pryskyřice. Tím pádem část matrice i s Q-CELY zůstala v impregnační vaně. Dále došlo k porušení struktur Q-CEL při přípravě matrice a během samotné výroby, tudíž z části byly profily plněné pouze jen borosilikátovým sklem.

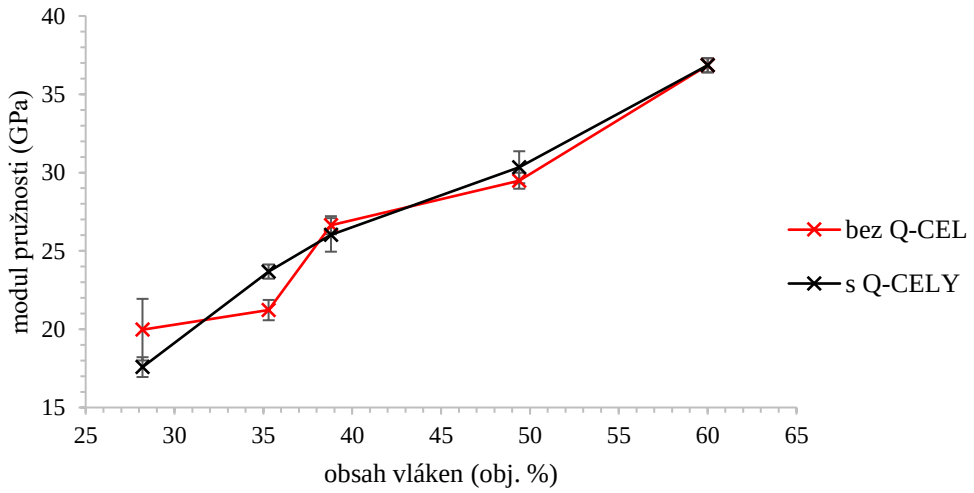
Z Obr. 24 je také patrný významnější pokles objemové hmotnosti profilu s EVE, v porovnání s profilem s UP pryskyřicí. Profil s EVE matricí obsahoval větší množství méně poškozeného plniva Q-CEL než profil s UP matricí, tudíž EVE profily byly brány jako výchozí pro sledování mechanických vlastností.

4.2 Mechanické vlastnosti

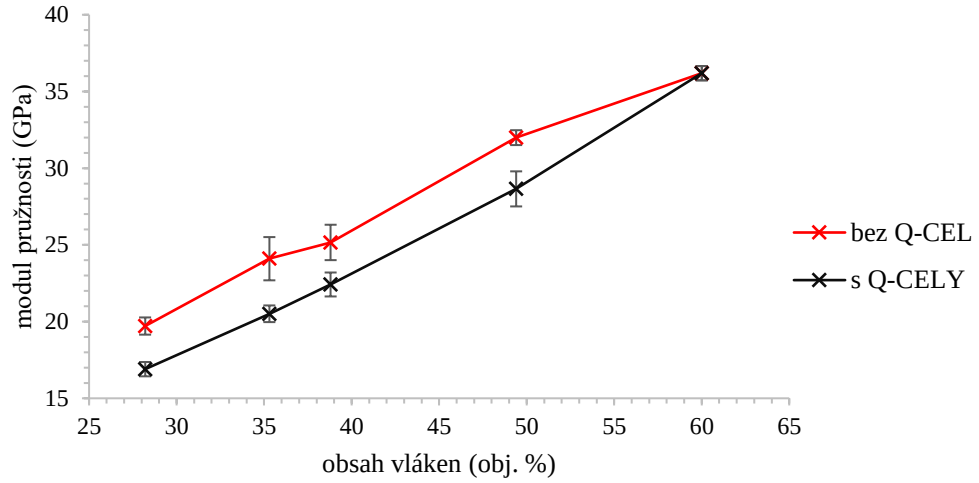
Jelikož bylo u vzorků s UP matricí zjištěno nedostatečné zastoupení plniva Q-CEL, jsou mechanické vlastnosti níže popsány přednostně pro profily s EVE matricí.

4.2.1 Modul pružnosti

Z Obr. 26 lze pozorovat závislost modulu pružnosti na obsahu vláken. Modul pružnosti se snižujícím se obj. % vláken lineárně klesá. S přidáním plniva Q-CEL dochází k celkovému snížení modulu pružnosti. Tento jev je způsoben nízkou kompatibilitou Q-CEL a matrice. Nedochází tedy ke vzniku synergického efektu mezi kompozitním materiálem a plnivem.



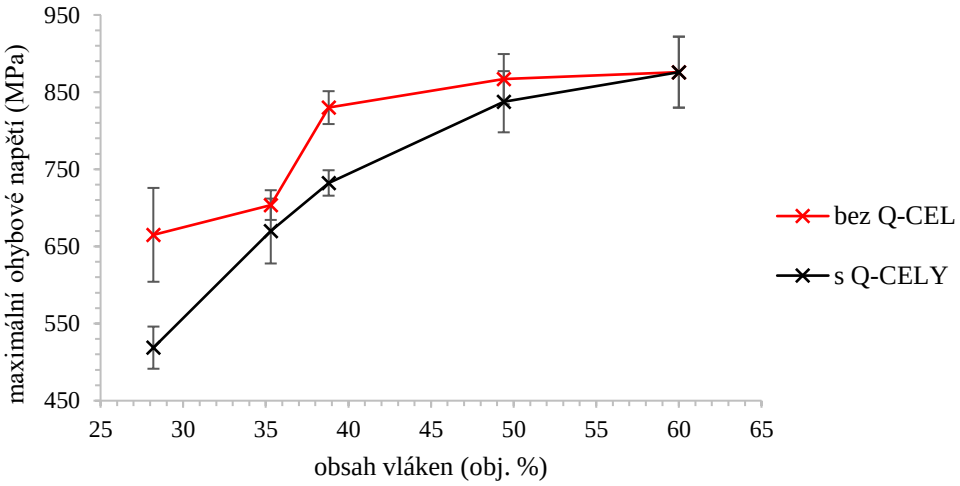
Obr. 25: Grafické zobrazení závislosti modulu pružnosti na obsahu vláken pro profil na bázi UP



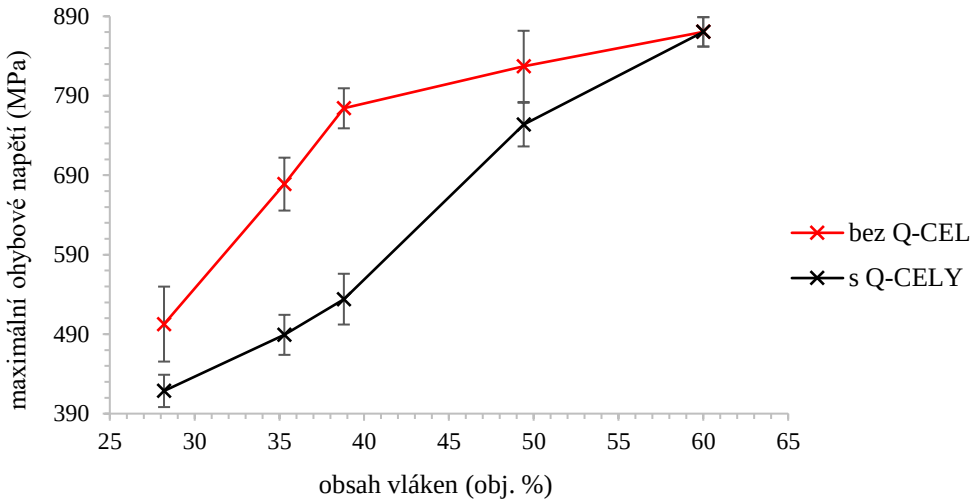
Obr. 26: Grafické zobrazení závislosti modulu pružnosti na obsahu vláken pro profil na bázi EVE

4.2.2 Maximální ohybové napětí

Na základě Obr. 28 bylo zjištěno, že částice Q-CEL negativně ovlivňují maximální ohybové napětí vyrobeného kompozitního profilu, kdy se zvyšujícím se obj. % plniva maximální ohybové napětí klesá. To bylo způsobeno špatnou adhezí Q-CEL k matrici. Dále bylo zjištěno, že distribuce plniva v kompozitu není rovnoměrná. To vedlo k lokálnímu oslabení materiálu a iniciaci trhlin. Jelikož u neodlehčeného kompozitního materiálu při 38,8 obj % bylo dosaženo limitu výrobní technologie, je referenční materiál zatížen chybou a nelze mezi sebou tyto dva typy materiálu již dostatečně porovnat.



Obr. 27: Grafické zobrazení závislosti max. ohybového napětí na obsahu vláken pro profil na bázi UP



Obr. 28: Grafické zobrazení závislosti max. ohybového napětí na obsahu vláken pro profil na bázi EVE

4.3 Pozorování distribuce Q-CEL

V rámci sledování distribuce a adheze Q-CEL a skelných vláken byly použity vzorky materiálu, které obsahovaly 28,2 obj. % skleněných vláken, 31,8 obj. % Q-CEL a 40 obj. % matrice.

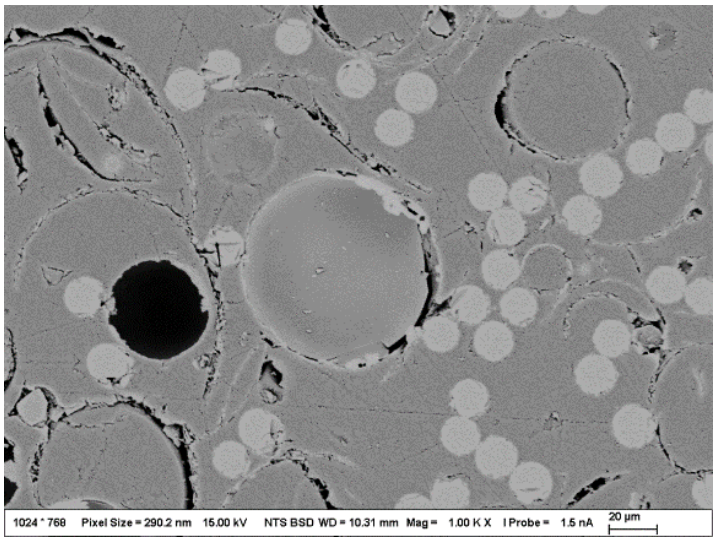
Díky použití SEM lze dobře pozorovat především adhezi komponent, kdežto snímky pořízené světelnou mikroskopií jsou vhodné primárně pro kontrolu distribuce Q-CEL a skleněných vláken. Pro lepší představu o distribuci byly snímky seřazeny do tzv. mozaiky, aby bylo možné pozorovat rozložení komponent napříč celým průřezem vzorku.

4.3.1 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

Ze snímku Obr. 29 lze pozorovat, že adheze plniva Q-CEL (velké kruhové oblasti) s matricí je nedostatečná, kdežto adheze skelných vláken (světlá místa) s matricí je velmi dobrá. To je způsobeno nanesením apretační vrstvy na vlákna během jejich výroby.

Z důvodů špatné adheze Q-CEL dochází k oslabení kompozitního materiálu, neboť dochází ke vzniku defektů a špatnému přenesení vnějšího napětí. To vede k ponížení mechanických vlastností oproti referenčnímu kompozitnímu materiálu, kde nebylo použito odlehčující plnivo. Zároveň je ze snímků možno pozorovat, že část Q-CEL byla při přípravě matrice či během vytvrzování profilu ve formě pultruzní linky poškozena. Tento jev byl jednou z příčin odchylky mezi experimentální a teoretickou objemovou hmotností profilu odlehčených kompozitních profilů.

U kompozitních profilů na bázi UP i EVE byla adheze Q-CEL i skleněných vláken srovnatelná.



Obr. 29: Snímek struktury kompozitního materiálu na bázi EVE pořízen za použití metody SEM

4.3.2 Světelná mikroskopie

Na Obr. 30 je snímek z optické mikroskopie v tmavém poli. Tmavá místa představují skleněná vlákna a světlá místa plnivo v podobě Q-CEL. Na Obr. 31 je snímek z optické mikroskopie ve světlém poli, kde tmavá místa představují plnivo v podobě Q-CEL a světlá místa skleněná vlákna.

Jak je patrno z Obr. 30 a Obr. 31, distribuce plniva Q-CEL i skleněných vláken v materiálu je nerovnoměrná. Tento trend byl pozorován u vzorků s UP i s EVE matricí. Vysoká nerovnoměrnost distribuce vláken a Q-cel je dána především malým počtem použitých vláken a malým průřezem profilu. Lze tedy předpokládat, že za použití více skleněných rovingů by distribuce byla více rovnoměrná. V důsledku nerovnoměrné distribuce komponent dochází k celkovému poníženi mechanických vlastností, kdy dochází k lokálnímu oslabovaní materiálu.

Obr. 30: Snímek struktury kompozitního materiálu na bázi EVE pořízen za použití metody světelné mikroskopie v tmavém poli

Obr. 31: Snímek struktury kompozitního materiálu na bázi EVE pořízen za použití metody světelné mikroskopie ve světlém poli

4.4 Odhad dopadu snížení hmotnosti vybraného kompozitního systému

V průběhu bakalářské práce byly výsledky konzultovány se zástupci společnosti GDP Koral s.r.o., pod jejíž záštitou práce vznikla. Cílem spolupráce bylo připravit materiál, který by mohl být využíván pro výrobu kompozitních profilů pro automobilový průmysl, konkrétně pro výrobu profilů vzduchového potrubí.

Vybraný kompozitní profil je charakterizován délkou 20 m a průřezem 1755 mm^2. Hmotnost 1 m tohoto profilu je 2,7 kg, z toho plyne objemová hmotnost1,538 g/cm^3. V jednom automobilu zaujímá profil celkovou hmotnost 54 kg.

Při použití nejlehčího vyrobeného profilu na bázi EVE (28,2 obj. % skelných vláken, 31,8 obj. % Q-CEL, 40 obj. % matrice) s objemovou hmotností 1,338 g/cm^3 by došlo k redukci hmotnosti již používaného profilu o 13 % u každého vozidla. Jednalo by se o redukci z původních 54 kg na 47 kg profilu.

5 ZÁVĚR

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo obeznámit se s technologií výroby kompozitních profilů, a to konkrétně s pultruzí. Takto vyrobené kompozitní profily byly podrobeny destruktivní tříbodové ohybové zkoušce, kde byly sledovány mechanické vlastnosti. Adheze a distribuce plniva, respektive sklených vláken byly následně pozorovány pomocí světelné mikroskopie a elektronové rastrovací mikroskopie (SEM).

V rámci výroby kompozitního materiálu byly vyrobeny celkem dva typy kompozitních profilů. První typ, neodlehčený, obsahoval pouze matrici (UP a EVE) a výztuž v podobě objemovaných skelných vláken. Tento typ materiálu byl označen jako referenční. Druhý typ materiálu, již odlehčený, obsahoval plnivo v podobě dutých skleněných kuliček tzv. Q-CEL, dále matrici (UP a EVE) a jako výztuž byla opět použita objemovaná vlákna.

Jako hlavní ovlivňující faktor během výroby profilů byl zaznamenán především technologický limit laboratorní pultruzní linky. Bylo zjištěno, že při výrobě neodlehčených profilů dochází k tvorbě defektů v podobě nedostatečně prosycených vláken, které nebyly s matricí dostatečně spojeny a nemohly absorbovat vkládané napětí (pro UP u 38,8 obj. % vláken, pro EVE u 35,3 % vláken). Tento jev se projevil především při sledování maximálního ohybového napětí, kdy v rámci celé série takto připravených profilů došlo k rapidnímu poklesu sledované veličiny právě ve zmíněných bodech. Z tohoto důvodu již nemělo smysl dál pokračovat v přípravě profilů s menším obsahem skelných vláken.

Díky použitím plniva Q-CEL byl výše zmiňovaný technologický limit laboratorní pultruzní linky posunut pro všechny připravené odlehčené profily. Z výsledků pozorování hmotnosti i mechanických vlastností je tedy zřejmé, že pro přípravu kompozitních materiálu s nízkým obj. % vláken pomocí technologie pultruze je vhodné použít plnivo Q-CEL. Profily neobsahovaly defekty, jak tomu bylo u neodlehčených profilů při stejném obj. % vláken.

Dalším ovlivňujícím faktorem výroby, konkrétně odlehčených profilů, byla nedostatečná aplikace Q-CEL přímo do profilu, způsobena pravděpodobně utažením odkapávacích válců, které slouží k odstranění přebytečné pryskyřice. Tím pádem byla zaznamenána odchylka teoretické a experimentální objemové hmotnosti. Vzhledem k použití zvýšené teploty a tlaku během vytvrzování profilu ve formě navíc část Q-CEL v profilech měla porušenou strukturu, což bylo možné pozorovat pomocí metody SEM.

U částic Q-CEL bylo taktéž možno pozorovat nedostatečnou kompatibilitu s matricí (k UP, i k EVE matrici) V důsledku tohoto jevu byl takto odlehčený materiál oslaben, neboť částice Q-CEL iniciovaly vznik trhlin vlivem působícího napětí. Proto docházelo ke snížení mechanických vlastností oproti referenčnímu materiálu. Tomuto negativnímu ovlivnění výsledných vlastností materiály by bylo možné předcházet adekvátní povrchovou úpravou částic Q-CEL.

V rámci porovnání připraveného kompozitního profilu, s komerčně vyráběným pultrudovaným profilem společností GDP Koral s.r.o., bylo dosaženo snížení objemové hmotnosti o 13 %. Redukce hmotnosti by mohla být větší, kdyby byla optimalizována výrobní technologie pultruze, což by vedlo k posílení aplikace Q-CEL do kompozitního profilu.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. 1. vyd. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903386-0-7.

[2] CHUNG, DEBORAH D.L. *Composite materials science and applications*. 2. London: Springer, 2010. ISBN 978-184-8828-315.

[3] HÁJEK, Tomáš. *Problematika adheze u kompozitů s polymerní matricí*. Praha, 2016. DIPLOMOVÁ PRÁCE. České vysoké učení v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

[4] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V ČR 1. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2006. ISBN 80-213-1442-7.

[5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

[6] Kompozitní materiály. *Umi.fs.cvut.cz* [online]. [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf

[7] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.

[8] STEIDL, Josef. Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírens. *Mmspektrum* [online]. 2005 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-a-kompozity-naplnuji-materialove-pozadavky-moderniho-strojirens.html

[9] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity: Matrice. *Mujweb.cz* [online]. [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf

[10] BĚHÁLEK, L. Polymery. *Code Creator, s.r.o.* [online]. 2016 [cit. 2020-11-06]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/Impresum.html

[11] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. V ČR 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.

[12] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.

[13] STOKLASA, Karel. *MAKROMOLEKULÁRNÍ CHEMIE I.* [online]. MAKROMOLEKULÁRNÍ CHEMIE I.: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/939/mod_resource/content/2/Skripta_MMCH_I.pdf

[14] ČERNOŠEK, J. *Úvod do problematiky kompozitních materiálů, VUT v Brně, Fakulta technologická, Zlín, 1992*.

[15] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. V ČR 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.

[16] BECKOVÁ, Monika. Praktický příklad prevenčních nástrojů - výroba skleněných vláken. *Bozpprofi.cz* [online]. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.bozpprofi.cz/33/prakticky-priklad-prevencnich-nastroju-vyroba-sklenenych-vlaken-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Ekdwy8o5kOgdvLpo1JutUrOMB8q2Z8oGSQ/

[17] Keramické vlákno. In: *Darte.cz* [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: https://www.darte.cz/technicke-izolace/keramicke-vlakno

[18] Kevlar. In: *Firelovers.cz* [online]. [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: https://firelovers.cz/fireshow-clanky/kevlar/

[19] RICHTER, Miroslav. Přírodní a syntetická vlákna. In: *Ekomonitor.cz* [online]. [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/9_vlsskna_pdegurodnu_a_syntetickss.pdf

[20] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORLT a Zdeněk PADOVEC. Technologie. In: *Polymer-composites.cz* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: https://polymer-composites.cz/category/technologie/

[21] Technologie výroby kompozitů. In: *Gdpkoral.cz* [online]. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: https://www.gdpkoral.cz/technologie-vyroby-kompozitu/w7

[22] Pultruze - výrobní postup. In: *Roechling-industrial.com* [online]. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: https://www.roechling-industrial.com/cz/technologie/pultruze

[23] Ruční laminace. In: *Plastic.cz* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: http://www.plastic.cz/technologie-rucni_laminace-cz

[24] Technologie výroby. In: *Prefa-kompozity.cz* [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/

[25] PARK, C.H. a W.I. LEE. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* [online]. Woodhead Publishing, 2012 [cit. 2020-12-07]. ISBN 9780857090676. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bulk-moulding-compound

[26] HROMADOVÁ, Romana. *Vlastnosti lisovacích hmot* [online]. Zlín, 2015 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/33689. Diplomová práce. UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. Vedoucí práce Mrkvičková Simona.

[27] BMC material. In: *Enliang.com* [online]. [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: https://www.enliang.com.tw/en/product_detail_27_0

[28] PANCL, Ondřej a Jan SUCHÁNEK. Výroba pohledových dílů z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny. In: *Mmspektrum.com* [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-pohledovych-dilu-z-polymeru-vyztuzenych-uhlikovymi-vlakny.html

[29] AHMADOVA, A. *Numerical Modelling of porosity generation, movement, and compaction during the RTM process* [online]. Stuttgart, 2008 [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331330329_Numerical_Modelling_of_porosity_generation_movement_and_compaction_during_the_RTM_process. Diplomová práce. UNIVERSITÄT STUTTGART. Vedoucí práce Dr. ANTHONY PICKETT M. Sc. SILVIO FACCIOTTO.

[30] DUTÉ ANORGANICKÉ SKLENĚNÉ MIKROSFÉRY. *Element-shop.cz* [online]. [cit. 2021-07-08]. Dostupné z: https://www.element-shop.cz/prumyslova-plniva-a-prisady/q-cel-6019-dute-anorganicke-sklenene-mikrosfery--odlehcene--0-075-mm/

[31] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005. ISBN 80-903-3864-X.

[32] ASTM D790 − 17. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

[33] GOLDSTEIN, Joseph. I. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York: Kluwer, 2003. ISBN 0-306-47292-9.

[34] PLÁŠEK, Jaromír. Nové metody optické mikroskopie. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 41.1* [online]. 1996 [cit. 2021-07-06]. Dostupné z: https://eudml.org/doc/37380

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

UP – nenasycená polyesterová pryskyřice
EVE – epoxy-vinylesterová pryskyřice
DBP – dibenzoylperoxid
VE – vinylesterová pryskyřice
PE – polyethylen
PVC – polyvinylchlorid
PP – polypropylen
PET – polyethylentereftalát
PA – polyamid
PEEK – polyether ether keton
PLA – kyselina polymléčná
HS – vysokopevnostní uhlíková vlákna
HM – vysokomodulová uhlíková vlákna
UHS – ultravysokopevnostní uhlíková vlákna
IM – středněmodulová uhlíková vlákna
UHM – ultravysokomodulová uhlíková vlákna
SMC – Sheet Moulding Compound
BMC – Bulk Moulding Compound
GMT – Glass Mat Thermoplastic
RTM – Resin Transfer Moulding
SEM – Rastrovací elektronová mikroskopie