



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGICKÁ ANALÝZA VYUŽITELNOSTI NOVÝCH TYPŮ TERMOSETICKÝCH MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI SVĚTLOMETŮ

TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF THE USABILITY OF NEW THERMOSETTING MATERIALS
FOR THE CONSTRUCTION OF HEADLAMPS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Rašner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Martin Rašner**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výroba automobilových světel a technických svítidel
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

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

Technologická analýza využitelnosti nových typů termosetických materiálů pro konstrukci světlometů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologická analýza využitelnosti zcela nových dostupných termosetických materiálů pro konstrukci světlometů. Zhodnocení finanční výhodnosti a technické úrovně vzorků těles vyrobených světlometů.

Cíle diplomové práce:

Technologická analýza využitelnosti zcela nových dostupných termosetických materiálů pro konstrukci světlometů.

Zhodnocení finanční výhodnosti a technické úrovně vyrobených světlometů (částí světlometů) na základě provedených testů pevnosti, termické vodivosti, povrchové adheze a dalších vhodných testů.

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.

AUSPERGER, Aleš. Technologie zpracování plastů [online]. [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>

CATIA fórum: Czech CATIA community web [online]. 2010 [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <http://www.catia-forum.cz/>

SYNEK, Miloslav. Ekonomická analýza. Praha: Oeconomica, 2003. 79 s. ISBN 80-245-0603-3.

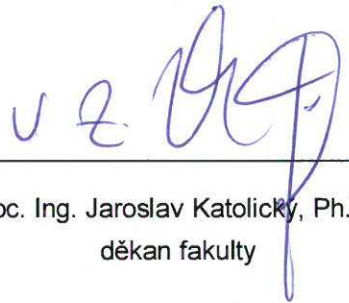
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 25. 10. 2018





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce představuje využitelnost nového termosetického materiálu BMC pro konstrukci světlometu automobilu. V teoretické části jsou popsány světlometry, základní charakteristiky a vlastnosti plastů s důrazem na polymerní kompozitní materiály a oblasti testování materiálu. Praktická část se zabývá zpracováním testovacích vzorků pro mechanické zkoušky lisováním a také výrobou reálných vzorků reflektorů a nosných rámců metodou vstřikování. Vyhodnocení se zakládá na porovnání výsledků provedených zkoušek alternativního materiálu a aktuálně používaného materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 v obchodní společnosti HELLA Autotechnik Nova s.r.o. Sledovány jsou základní fyzikálně-mechanické vlastnosti jako je pevnost, tuhost, houževnatost a tvrdost. Reflektory a nosné rámy jsou smontovány do světlometu a následně zkoušeny dle zákonných a zákaznických požadavků na klimatickou a vibrační odolnost a fotometrii.

Abstract

The diploma thesis presents the usability of a new thermosetting material BMC for the construction of a car headlight. In the theoretical part there are described headlights, basic characteristics and properties of plastics focussing on polymer composite materials and material testing. The practical part deals with the processing of test samples for mechanical testing by compression moulding and also with the production of real samples of reflectors and carrier frames by injection moulding. The evaluation is based on comparison of the results of the performed tests of alternative material and the currently used BMC TETRADUR TD 492/2 in HELLA Autotechnik Nova s.r.o. Basic physical-mechanical properties such as strength, stiffness, toughness and hardness are tested and monitored. The reflectors and carrier frames are assembled into the headlight and then tested according to legal and customers' requirements for climate and vibration resistance and photometry.

Klíčová slova

světlomet, reflektor, BMC, termoset, kompozitní materiál, polyesterová pryskyřice

Key words

headlight, reflector, BMC, thermoset, composite material, polyester resin

RAŠNER, Martin. Technologická analýza využitelnosti nových typů termosetických materiálů pro konstrukci světlometů. Brno 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 107 s. Vedoucí práce Miroslav Píška.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Technologická analýza využitelnosti nových typů termosetických materiálů pro konstrukci světlometů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Bc. Martin Rašner

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc., za cenné rady a připomínky ohledně vypracování diplomové práce.

Také bych rád vyjádřil poděkování svému konzultantovi, doc. Mgr. Pavlu Tučkovi, Ph.D., za odborné vedení a zprostředkování práce na tomto zajímavém zadání ve spolupráci s obchodní společností HELLA Autotechnik Nova s.r.o.

Dále děkuji své rodině a přátelům za jejich podporu během mého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	10
• TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ROZBOR PROBLEMATIKY	12
1.1 Cíle diplomové práce	12
1.2 Světlo met automobilu	12
1.2.1 Typy světlometů	14
1.2.2 Reflektor	16
1.2.3 Nosný rám modulu.....	17
1.2.4 Použití polymerních materiálů ve světlometu	18
1.3 Popis plastových materiálů	20
1.3.1 Struktura polymerů	21
1.3.2 Vlastnosti termosetů	22
1.3.3 Zpracování termosetů	23
1.4 Povrchová úprava termosetů	25
1.4.1 Lakování	25
1.4.2 Pokovení	26
2 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	28
2.1 Matrice	29
2.2 Výztuž	29
2.2.1 Částicové kompozitní materiály	30
2.2.2 Vláknové kompozitní materiály.....	30
2.3 Plnivo	31
2.4 Přísady.....	31
3 BMC.....	32
3.1 Složení směsi.....	32
3.1.1 Nenasycená polyesterová pryskyřice.....	33
3.1.2 Vyztužující plnivo – skelná vlákna.....	34

3.1.3	Nevyztužující plnivo.....	34
3.1.4	Aditiva	34
3.2	Výrobní proces BMC	35
3.2.1	Příprava směsi.....	35
3.2.2	Vstřikování BMC.....	36
3.3	Výhody a nevýhody výrobků z BMC	36
3.4	BMC TETRADUR TD 492/2	37
4	VÝVOJOVÉ A ZKUŠEBNÍ KVALIFIKACE.....	38
4.1	Počítačové simulace	38
4.2	Materiálové zkoušky	39
4.2.1	Tahová zkouška	41
4.2.2	Ohybová zkouška.....	43
4.2.3	Zkouška rázové houževnatosti.....	45
4.2.4	Zkouška tvrdosti	46
4.2.5	Termogravimetrie	47
4.3	Testování světlometu	50
4.3.1	Klimatické zkoušky	51
4.3.2	Fotometrické zkoušky.....	51
4.3.3	Vibrační zkoušky	51
•	PRAKTICKÁ ČÁST	52
5	PROVEDENÍ ZKOUŠEK.....	53
5.1	Příprava zkušebních těles	54
5.1.1	Tvar a rozměry zkušebních těles	57
5.1.2	Testované díly světlometu	58
5.2	Tahová zkouška.....	59
5.3	Ohybová zkouška	64
5.4	Zkouška rázové houževnatosti	68
5.5	Zkouška tvrdosti.....	72

5.6	Zkouška hustoty	75
5.7	Zkouška adheze – mřížkový test	78
5.8	Termogravimetrie	80
5.9	Zkoušky pokovení	85
5.9.1	Zkouška změnami klimatu	86
5.9.2	Uložení v teple	87
5.9.3	Kondenzační zkouška	88
5.9.4	Výsledky a vyhodnocení zkoušek pokovení	88
5.10	Testování světlometu	88
5.10.1	Zkouška fotometrie	88
5.10.2	Vibrační zkouška	91
6	VYHODNOCENÍ	93
6.1	Ekonomická využitelnost	93
6.2	Diskuse	93
6.2.1	Vyhodnocení výsledků	95
6.2.2	Návrhy pokračování	95
	ZÁVĚR	97
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	99
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMPOLŮ A ZKRATEK	105

ÚVOD

Volba nejvhodnějšího materiálu je vždy důležitým úkolem při vývoji produktu. V úvahu je třeba vzít zejména mechanické vlastnosti materiálu a jeho tepelnou odolnost, dále pak technologické zpracování, konstrukční omezení a podobně. Technické polymery nabízejí širokou škálu chemického složení a různých vlastností. Mnohdy tedy dochází k nahrazování tradičních technických materiálů materiály polymerními, a to z důvodu ekonomické výhodnosti, lepší zpracovatelnosti a také snížení hmotnosti.

Termosetické materiály, při porovnání s ostatními plastovými materiály, vynikají zejména díky jejich zesíťované struktuře, což má za následek výbornou tuhost a tvarovou a tepelnou stálost. Samostatně se termosety používají jen velmi okrajově, například v elektronice kvůli svým dobrým izolačním vlastnostem a schopností odolat zvýšeným teplotám. Častější zastoupení mají jako výplň – matrice – různých typů kompozitních materiálů [1]. Typickým představitelem termosetických kompozitních hmot je materiál BMC („*Bulk Moulding Compound*“) – termoset s nepravidelně rozloženými vlákny. Směs materiálu je tvořena z nenasyčené polyesterové pryskyřice, vyztužujících vláken pro zvýšení mechanických vlastností, plnivem z důvodu snížení ceny materiálu a dalšími přísadami, které vylepšují požadované vlastnosti materiálu.

Předmětem a cílem diplomové práce je vyhodnocení využitelnosti nového termosetického materiálu typu BMC pro konstrukci světlometu automobilu.

Úvodní část práce se zabývá popisem světlometu automobilu, a to zejména jeho prvky reflektoru a nosného rámu optického modulu, které jsou vyráběny z testovaného termosetu typu BMC. Zpracovány jsou základní principy a typy plastů s důrazem na termosety a jejich zpracování, odlišnosti od častěji užívaných termoplastů, rozdíly ve zpracování a výhody a nevýhody jejich použití. Další část rešerše je věnovaná kompozitům a detailnímu popisu materiálu BMC. V závěrečném bloku jsou popsány zkušební metody pro stanovení vlastností materiálů a zákonné testovací specifikace pro odhalení případných závad a zaručení spolehlivosti výrobku, na kterých se zakládá praktická část práce.

Praktická část diplomové práce se věnuje testování materiálu používaného v obchodní společnosti HELLA Autotechnik Nova, s.r.o. – BMC TETRADUR TD 492/2 a alternativního vývojového materiálu typu BMC. Vyhodnocení využitelnosti se zakládá na porovnání výsledků provedených zkoušek obou materiálů.

Hlavní část diplomové práce se zabývá:

- zpracováním materiálu BMC metodou lisování, přípravou těles pro zkoušky mechanických vlastností a vyhotovením zkoušek (tahem, ohybem, tvrdosti a rázové houževnatosti);
- provedením zkoušek fyzikálního charakteru – hustoty, adheze (mřížkový test) a termogravimetrie;
- výrobou reálných vzorků – reflektorů a nosných rámu optických modulů – na vstřikovacích strojích a provedením zkušebních kvalifikací (fotometrie, klimatická odolnost, vibrace), které jsou prováděny na reflektorech a finálních světlometech dle interních či zákaznických požadavků.

- **TEORETICKÁ ČÁST**

1 ROZBOR PROBLEMATIKY

Studiem termosetických kompozitních materiálů typu BMC, jejich laboratorní přípravou a testováním se věnují i některé další práce [2,3,4], avšak dobrá znalost termosetů je ve srovnání s termoplasty stále okrajovým tématem. Toto tvrzení potvrzuje i fakt, že na světě je pouze několik dodavatelů materiálu, kteří prodávají své více než dvacet let staré receptury směsí bez aktuálních inovací, které by držely krok se vzrůstajícími materiálovými požadavky. Právě z tohoto důvodu vznikl nový alternativní materiál BMC, jehož popis, testování a vyhodnocení využitelnosti pro světlomet automobilu bude předmětem této práce.

1.1 Cíle diplomové práce

Primárním cílem diplomové práce je zjištění mechanických a optických vlastností nového termosetického materiálu a vyhodnocení pro možné využití ve světlometu automobilu. Metodika práce je založena na provedení souboru materiálových testů a jejich vyhodnocení. Porovnávat se bude standartní termosetický materiál, používaný v obchodní společnosti HELLA Autotechnik Nova, s.r.o. – BMC TETRADUR TD 492/2 s alternativním vývojovým materiálem stejného typu BMC.

Prvním krokem praktické části je zhotovení destiček a reálných dílů světlometu z obou směsí materiálů. Výroba zkušebních těles pro mechanické testy je provedena dle příslušné normy *ČSN EN ISO 295 Plasty – Příprava zkušebních těles z termosetů lisováním* [5]. Díly světlometu jsou zhotoveny v sériových formách na vstřikovacích lisech. Po připravení vzorků následuje provedení testů mechanických a optických vlastností a validačních zkoušek, které spolu se zhodnocením zpracovatelnosti materiálu představí možnost využitelnosti nového materiálu.

Cíle diplomové práce:

1. řešení na zadané téma,
2. příprava zkušebních těles pro mechanické zkoušky,
3. výroba vzorků reflektorů a nosných rámců optických modulů,
4. provedení zkoušek,
5. vyhodnocení výsledků.

1.2 Světlomet automobilu

Moderní světlomet už řadu let neobsahuje jen žárovky a kovové a skleněné prvky, ale i složité mechanické díly, optické systémy a pokročilé elektronické moduly. V dnešní době jsou již zákazníkům nabízeny plně automatické světlometry zaručující maximální komfort a bezpečnost s pomocí kamerového řešení a neoslňujícího dálkového světla. Podstata světlometu sestává ze světelného zdroje, jehož světelný tok je pomocí vhodné optiky směřován tak, aby zajistil potřebné rozložení světelného výstupu a splňoval bezpečnostní požadavky. Primární komponenty světlometů jsou optické prvky zahrnující čočky, reflektory, světlovody a optické moduly.

Dále světlomet tvoří elektronika, kabeláž, krycí rámečky, řídicí jednotky, pasivní či aktivní chlazení a mnoho dalšího.

Ustupující žárovkové světelné zdroje v dnešní době téměř nahradily elektroluminiscenční diody – LED („*Light Emitting Diode*“), které mají nesporné výhody v oblasti výkonu, možnosti designu i úspornosti. Novinkou mezi světelnými zdroji jsou moderní laserové moduly několika prémiových modelů automobilek (viz obr. 1).



Obr. 1 Moderní světlomet automobilu: BMW X5 2019 [6].

Světlomet je významným designovým prvkem automobilu. Líbivý designový koncept má tak mnohdy větší váhu než efektivnější a úspornější optické řešení. Světelný výstup světlometu však podléhá právním předpisům, které mají za úkol chránit ostatní účastníky silničního provozu před oslněním a zároveň zaručit možnost kontroly automobilového svícení. Světlomet musí zajistit osvětlení tak, aby fotometrické výsledky odpovídaly požadavkům vozidel a aby byla v prvé řadě zajištěna bezpečnost silničního provozu.

S rostoucí úrovní technologie stoupá i komplexnost výrobků a počet komponent. Jedná se tedy vcelku o komplikovanou sestavu, skládající se až z 300 kusů jednotlivých dílů a dosahující prodejní ceny až 100 000 Kč za kus [7].

Zdrojem tepla u světlometů jsou světelné zdroje (žárovky, výbojky, elektronika, LED diody nebo laser), motor automobilu a okolní teplota podnebí (sluneční záření). Vlivem těchto faktorů může teplota světlometu dosahovat limitně až 150 °C [7].

Světlomet je obecně zařízení konstruované k osvětlení vozovky a skládá se z prvků [8]:

- tlumené světlo – světlo užívané k osvětlení vozovky před vozidlem, aniž by nepatřičně oslňovalo ostatní účastníky silničního provozu;
- dálkové světlo – světlo užívané k osvětlení vozovky na velkou vzdálenost před vozidlem;
- světlomet do mlhy – světlo zlepšující osvětlení vozovky při snížené viditelnosti za mlhy, sněžení, bouřky nebo v mračcích prachu.

Svítilna je zařízení k vysílání světleného signálu ostatním uživatelům silnice, např. [8]:

- směrová svítilna – informuje ostatní uživatele silnice o plánované změně směru řidiče vozidla;
- denní svítilna – svítilna, která činí vozidlo snadněji viditelné za jízdy ve dne;
- přední obrysová svítilna – svítilna užívaná k označení přítomnosti vozidla a jeho šířky při pohledu zepředu.

Jednotlivé režimy svícení pomocí moderního světlometu jsou zobrazeny na obr. 2 [7].



Obr. 2 Aplikace režimů svícení ve světlometu Audi A8 – podle [7].

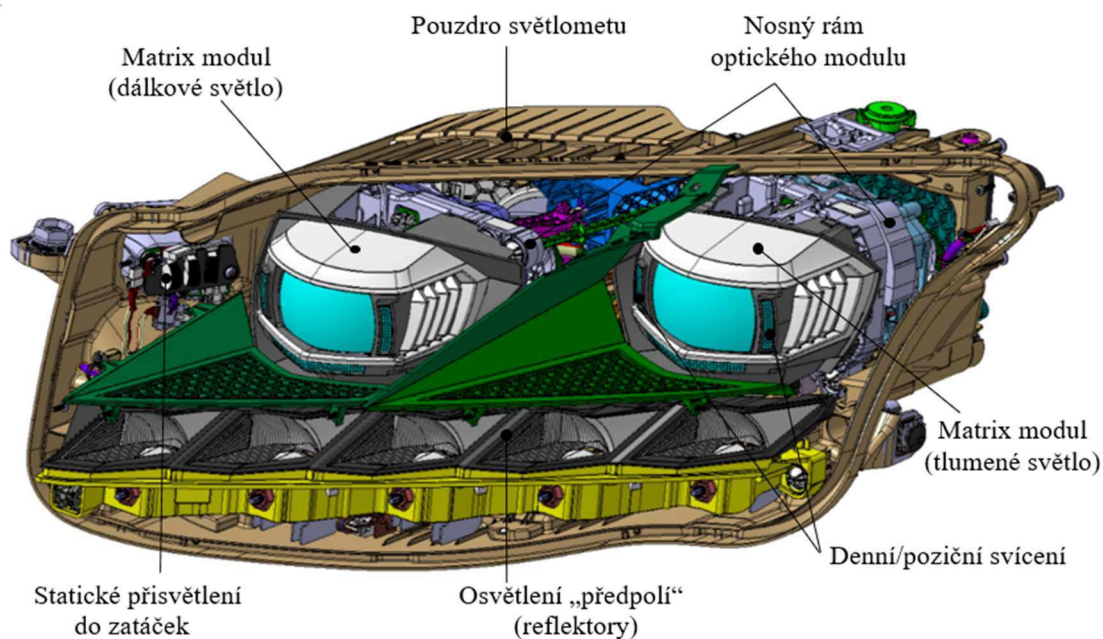
1.2.1 Typy světlometů

Přední osvětlení automobilu pomocí světlometu má několik podob jednak vlivem rapidního vývoje během posledních let, ale také možností zákazníka zvolit si pro něj vhodnou kategorii, která se promítne ve výbavě světelných funkcí a také ceně světlometu.

Optika světlometu lze rozdělit na několik typů dle provedení (seřazeno od vývojově nejstaršího) [7,9]:

- a) Paraboloidní reflektor s optikou na skle světlometu (již nepoužívaný koncept);
- b) Tzv. „Free-Form“ reflektor;
- c) Adaptivní modul – AFS („Adaptive Frontlighting System“);
- d) Světlovod;
- e) Tzv. „Matrix LED“ systém;
- f) Laserový modul;
- g) Tzv. „Digital light“ systém;
- h) Organické diody – OLED („Organic Light Emitting Diode“).

Rychlý vývoj posledních roků zaznamenal pokrok z halogenových a následně výbojkových (xenonových) světlometů až po světlo emitující diody. LED zdroje ve světlometu postupně téměř nahradily doposud běžné zdroje světla. Jejich výhodou je inovativní možnost designu, vyšší účinnost, životnost a barevné podání bližší dennímu světlu. Jsou vhodné pro použití v úsporných tzv. „Eco-LED“ systémech (snižování spotřeby energie), ale i vysoce výkonných modulech [8]. Stále větší zájem je dnes o tzv. „Full LED“ světlometry, které mají všechny světelné funkce realizované pomocí LED diod. Příklad takového světlometu je na obr. 3.



Obr. 3 Popis tzv. „Full LED“ moderního světlometu automobilu (VW Touareg) – podle [7].

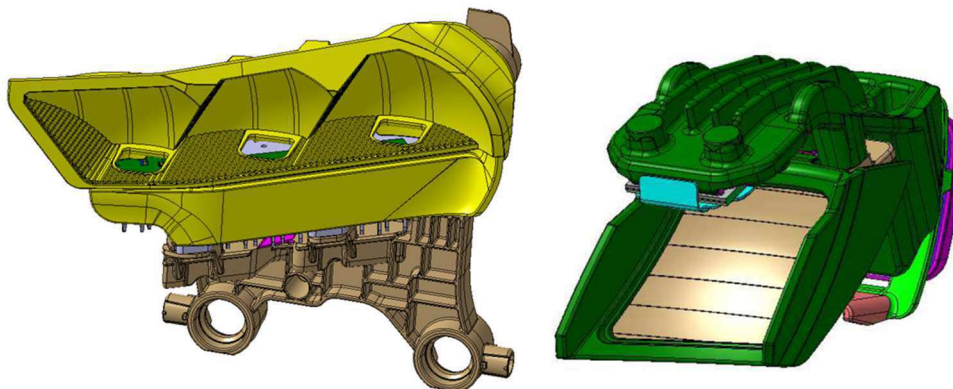
Moderní světlometry využívají optické moduly neboli adaptivní systémy – AFS („Adaptive Frontlighting System“), které mohou měnit rozložení světelného výstupu v závislosti na potřebě řidiče a aktuálních podmínkách provozu. Pokročilým optickým řešením jsou tzv. „Matrix LED“ systémy, které jsou schopny v reálném čase měnit výkon jednotlivých čipů. Řídící jednotka takového systému spolupracuje s kamerami a dokáže v reálném čase řídit výkon jednotlivých diod tak, že je možné „odstínit“ neboli „maskovat“ protijedoucí vozidlo či chodce při současně aktivním dálkovém režimu [8].

Velmi líbivým optickým řešením je kombinace LED diody se světlovodem (využívající totálního odrazu), které sice nedosahují potřebného světelného výkonu pro hlavní funkce světlometu, ale jsou hojně využívány pro signální a denní funkci svícení. Aktuální novinkou jsou potom laserové moduly, které mají ve srovnání s LED moduly až 2x větší dosvit a o 30 % vyšší energetickou efektivitu [6,7].

Unikátním řešením podání světla je tzv. „Digital light“, pomocí kterého je možné promítat jakékoliv obrazové informace (například navigační pokyny, upozornění, dopravní značky) na vozovku v rozlišení více než dvou milionů obrazových bodů [10]. Organické diodové svícení, tzv. „OLED“, patří mezi další zajímavé možnosti svícení, které se zavádí prozatím do zadních lamp automobilu. Jejich výhodou je skvělá homogenita a zejména možnost tvarování neobvyklého designu [11].

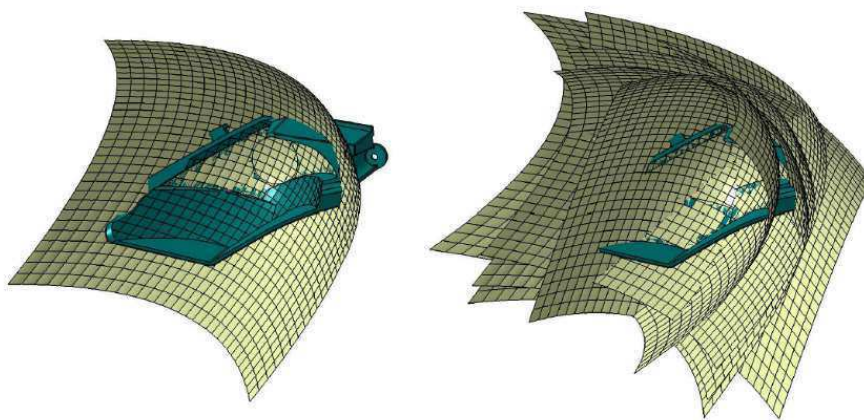
1.2.2 Reflektor

Distribuce světla v požadovaném rozložení, dané normou či zákazníkem, je zprostředkována nejčastěji parabolickými reflektory. Vlivem funkčnosti a jednoduchosti se jedná stále o základní optické prvky světlometu. Jejich podstata spočívá v odrazu světla ze světelného zdroje. Automobilový světlomet se běžně skládá z více reflektorů pro potřeby různých světelných funkcí: tlumené, dálkové, poziční světlo a směrový indikátor. Ukázka optiky světlometu s reflektorovým konceptem je zobrazena na obr. 4.



Obr. 4 Optické řešení světlometu – reflektorový LED koncept – podle [7].

V minulosti byly reflektory světlometů pro automobilová vozidla navrhovány do tvaru paraboly, která odrážela paralelní světlo s následným usměrněním na skle světlometu. Tyto reflektory byly vyráběny z plechu lisováním s následnou aplikací vrstvy laku a pokovení hliníkem, poskytující dobrou odrazovou funkci. Vzhledem k omezeným možnostem tvarování a rostoucímu požadavku na světlometry se složitou geometrií však byly kovové reflektory nahrazeny plastovými [12,13]. Díky možnosti přesnějšího tvarování plastového dílu byla plocha paraboly reflektoru rozdělena na jednotlivé dílčí segmenty – tzv. fazety, které tvarují a odrážejí obraz světelného zdroje požadovaným směrem. Jedná se o zlomový bod, od kterého mohlo být krycí sklo světlometu čiré a tím pádem již viditelné jednotlivé díly, zejména designové rámečky.



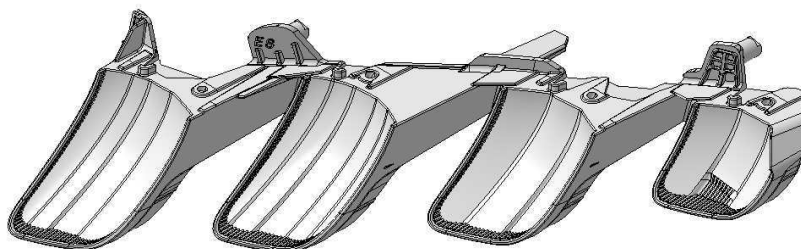
Obr. 5 Návrh reflektorové optiky složené z několika parabolických ploch [14].

Moderní reflektorová optika je založena na tzv. „FF-reflektoru“ („Free-Form“), který má odraznou plochu složenou z velkého množství dílčích optických segmentů. Díky pokročilým softwarům lze přesně spočítat odrazné plochy (viz obr. 5) a simulovat výstup světelného toku, pro který je distribuce světla generována přímo reflektorem bez nutnosti dalšího usměrnění [7,14]. Výsledné rozložení (tvar) světelného svazku je tvořen kombinací světelných odrazů z těchto segmentů.

Pro požadované zprostředkování světelného výstupu musí být geometrie fazet na optických plochách reflektoru co nejpřesnější. Nesrovnalosti by způsobily tzv. „parazitní“ odrazy světelných paprsků vedoucí k nechtěnému oslnění a nesplnění legislativních či zákaznických specifikací. Materiál reflektoru i jeho následná povrchová úprava (lakování, pokovení) tedy musí splňovat přísné požadavky.

V dnešní době jsou reflektory vyráběny procesem vstřikování, přičemž 85 % z nich je dnes z materiálu typu BMC [12], a to zvláště v případech komplexních dílů (viz obr. 6). Termosetický materiál BMC má velmi dobré mechanické vlastnosti, téměř nulové smrštění a zaručuje stabilitu reflektoru i při vyšších teplotách [1,32].

Možnou variantou materiálu pro termoplastické reflektory je nevyplněný polykarbonát (PC), který dosahuje vynikajícího lesku povrchu a odrazivosti v kombinaci s přímým pokovením. Problémem je však výrobní smrštění a teplotní roztažnost, která s nehomogenní teplotní zátěží v reálných podmínkách vede ke geometrické odchylce, což může způsobit světelné dislokace [1,7].



Obr. 6 Komplexní reflektorový celek [7].

Rostoucí používání LED jako světelných zdrojů je spojeno s redukcí velikosti reflektoru. Při použití LED s vysokým světelným výkonem dochází na zadní straně reflektoru k velmi vysokým hustotám záření, což může vést k postupnému poškození plastového materiálu až po jeho zničení [7]. Proto je nezbytnou podmínkou zajistit dostatečně odolný materiál a zároveň vhodné chlazení.

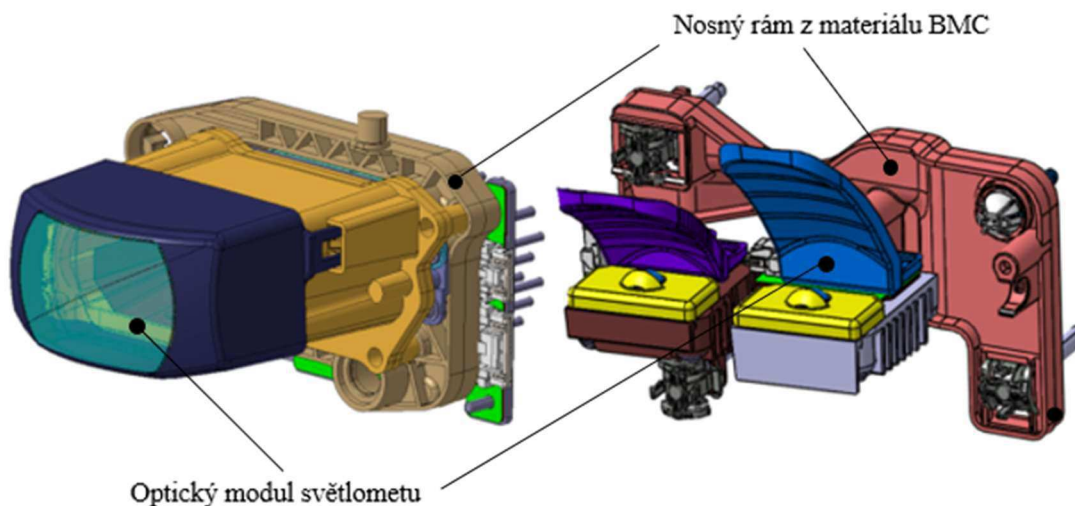
1.2.3 Nosný rám modulu

Optický (LED) modul je strukturovaná funkční jednotka, která zprostředkovává hlavní světelné funkce a tvoří tak jádro celého světloometu. Jedná se o nejvíce rozvíjející se část světloometu, kterou tvoří v nejvyšších třídách automobilek funkce jako „Matrix LED“ laser či „Digital light“. Moduly se začaly používat z důvodu možnosti opětovného využití pro několik projektů s téměř stejnými požadavky a zároveň pro zkrácení času vývoje [15].

Projekční modul anebo sestava reflektorů, pro kterou je potřeba zajistit stupeň řízené volnosti, se kombinuje pro upevnění a natáčení s nosným rámem optického modulu (viz obr. 7). Nejvhodnějším materiálem pro nosný rám je termoset typu BMC, případně odolný technický termoplast, např. polybutylentereftalát (PBT-GF30) [7]. Základními požadavky na materiál jsou dobrá houževnatost, stálost rozměrů a tuhost.

U prvotních adaptivních modulů – AFS („*Adaptive Frontlighting System*“) je distribuce světla automaticky přizpůsobována profilu silnice a převažujícím vnějším podmínkám s využitím komplexních regulačních algoritmů [9]. Změna světelného výstupu je realizována otáčením válce (clonka), který je umístěn mezi odrazovou plochou reflektoru a čočkou v ohniskové rovině promítacího modulu. Možnosti (režimy) rozptylu světla jsou: tlumené, městské, dálniční a dálkové světlo [15]. Moduly tedy zajišťují nejen statické, ale i dynamické osvětlení v závislosti na rychlosti vozidla, jeho zatížení či směrovému natočení v provozu. Světelným zdrojem modulu může být xenonová výbojka (tzv. „*Bi-xenon*“) anebo LED diody.

Moderní adaptivní optické systémy – LED moduly – mají již plně statický systém bez dynamického natáčení modulu. Všechny potřebné světelné režimy (módy) jsou řízeny pomocí spínání a plynulé regulace výkonu LED diod v rozsahu 0-100 % [16].

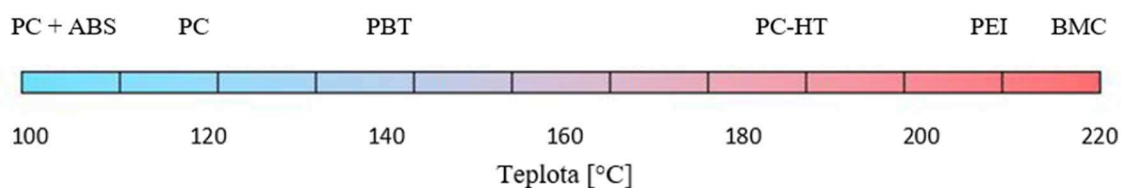


Obr. 7 Nosný rám optického modulu světlometu – podle [7].

1.2.4 Použití polymerních materiálů ve světlometu

Světlomet automobilu musí být imunní vůči širokému rozmezí teplot a zároveň být schopen odolat vibracím způsobených jízdou automobilu po nerovnostech.

Výběr materiálu závisí po technické stránce zejména na teplotní odolnosti, pevnosti a houževnatosti. Konkrétní rozhodnutí je bráno s ohledem na výsledky teplotních simulací (CFD) a pevnostní analýzy (MKP). Maximální teplotní limity vybraných plastů používaných ve světlometu jsou znázorněny na další straně, obr. 8.



Obr. 8 Maximální teploty použití vybraných plastů – podle [7].

Pro výběr vhodného polymeru světloometu se nabízí termoplastický, termosetický a okrajově i elastomerní materiál. Základní typy polymerních materiálů v aplikaci pro světlomet automobilu s jejich obchodními názvy jsou uvedeny v následující tab. 1.

Tab. 1 Základní typy polymerních materiálů pro světlomet automobilu – podle [3].

Zkratka	Název	Průmyslové označení	Použití
Termoplasty			
PC	polykarbonát	Makrolon, Lexan	čelní skla světlometů, filtry
PMMA	polymethylmetakrylát	Altuglas, Plexiglas	krycí skla zadních světlíků
PP	polypropylen	Innopol, Polyfill	zadní tělesa předních světlometů
ABS	akrylonitril-butadien-styren	Terluran, Novodur	zadní tělesa zadních světlíků
PCABS	blend PC a ABS	Bayblend, Cycloy	zadní tělesa zadních světlíků
PBT	polybutylentereftalát	Crastin, Ultradur	masky
PA	polyamid	Zytel, Ultramid	mechanické komponenty
POM	polyoxymetylen	Ultem	upínací a fixační prvky
Termosety			
BMC	termoset	Menzolit, Tetradur	reflektory světlometů, nosné rámy
Elastomery			
EPDM	ethylen-propylen pryž	-	gumové krytky
TPE	termoplastický elastomer	-	těsnění

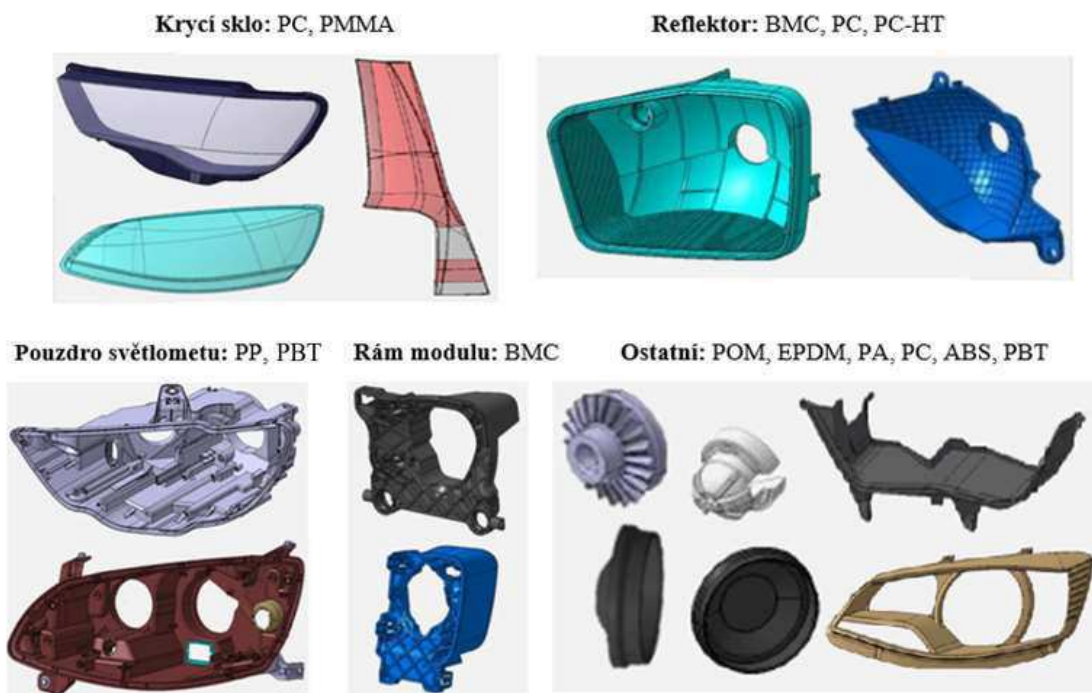
Termoplasty se ve světlometu používají především pro dekorativní komponenty (krycí rámečky), ale také světlovody, čočky, krycí sklo, pouzdro a okrajově i pro reflektory. Jejich výhodou je dobrá kvalita povrchu, který není nutný před pokovením lakovat [17], avšak ve srovnání s termosety vykazují výrazné smrštění a nízkou materiálovou odolnost vůči zvýšeným teplotám a mechanickému zatížení [1].

Nejlépeších povrchových vlastností s nízkou hodnotou rozptýleného světla lze získat za použití amorfních plastů, jako jsou polykarbonát (PC), vysokoteplotní polykarbonát (PC-HT) či polyetherimid (PEI). Vícefázové plasty, například akrylonitrilbutadienstyren (ABS), často vykazují poněkud horší povrchovou vrstvu, tzv. "zakalení" [7].

Plněné termosetické materiály typu BMC jsou používány primárně pro reflektory a nosné rámy modulů. V případě reflektorů však musí být opatřeny základní vrstvou laku pro vytvoření požadované hladkosti povrchu.

Elastomerní materiál je využíván v malém množství pro těsnicí funkce a gumové krytky v případě potřeby zajištění vyměnitelného světelného zdroje.

Příklady aplikací jednotlivých materiálů pro komponenty světlometu jsou zobrazeny na obr. 9.



Obr. 9 Plastové díly světlometu s jejich používanými materiály – podle [7].

1.3 Popis plastových materiálů

Při volbě materiálu je třeba zvolit nejlepší kompromisy vzhledem ke komerčním aspektům [18], mechanickým vlastnostem, snadné zpracovatelnosti a podobně. Plastové hmoty označují řadu syntetických a polysyntetických polymerních materiálů, které mají velkou variabilitu vlastností. Mezi jejich přednosti patří zejména dobrá zpracovatelnost a nízká hustota – hmotnost.

Polymery lze rozdělit na tři základní skupiny [1,19]:

- termoplasty;
- termosety (původní označení duroplasty);
- elastomery.

Každá z uvedených skupin vykazuje zcela jiné vlastnosti a hodí se pro odlišné použití. Z několika tisíc různých dostupných druhů plastů, které existují na trhu, se však z 80 % používá jen 6 z nich, přičemž 70 % výroby tvoří polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid [20].

Vlastnosti termosetů a termoplastů jsou v některých případech podobné, avšak jejich struktura a zpracování je zcela odlišné. Primární fyzikální rozdíl spočívá v tom, že termoplasty lze znovu přetavit, zatímco termosetické hmoty zůstávají po zesítnění trvale v pevném stavu.

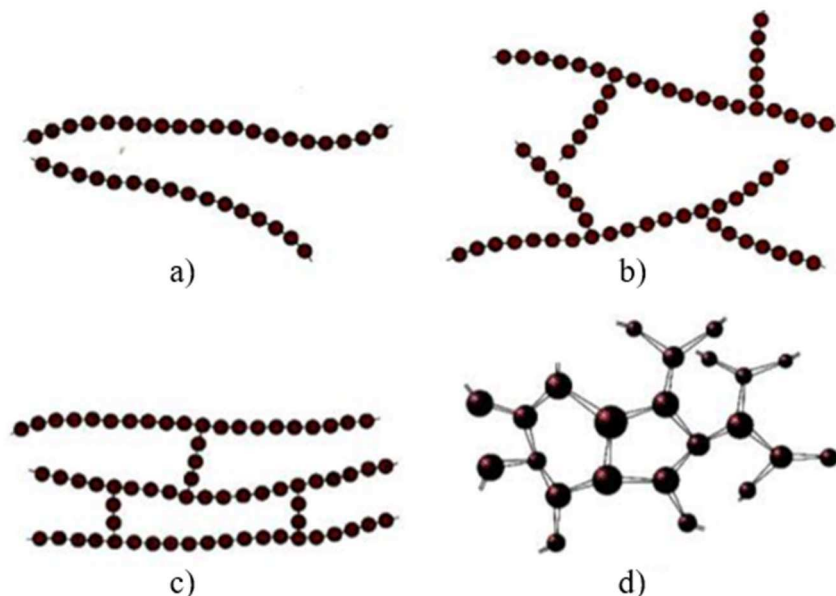
Termoplasty jsou polymerní materiály, které při zahřívání přechází do plastického stavu. Zpět do tuhého stavu se vrací jejich ochlazením pod teplotu tání. Jejich struktura obsahuje dlouhé molekuly, jejichž délka klesá s rostoucí teplotou, polymer degraduje a ztrácí své původní vlastnosti [21]. Patří mezi ně většina zpracovatelských hmot, jako je např.: polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polykarbonát (PC) a mnoho dalších [20].

Termosety jsou polymerní materiály, u kterých dochází vlivem teploty a tlaku k chemické nevratné reakci – prostorovému síťování struktury, tzv. vytvrzení. Často bývají kombinovány s různými plnivy za účelem zlepšení zejména jejich mechanických vlastností, jako je modul pružnosti, mez pevnosti. Zahrnují fenolformaldehydové a polyesterové hmoty, epoxidové pryskyřice a podobně [1,21].

Elastomery jsou pružné syntetické materiály se slabě zesíťovanými řetězci, vykazující vysokou úroveň pružné deformace. U elastomerů (například kaučuku) nedochází překročením určité teploty k plastickému toku z důvodu vzájemné fixace polymerních řetězců příčnými vazbami. Působením vnější síly jsou schopny díky změnám ve struktuře makromolekul podstoupit vratnou deformaci až o stovky procent [22].

1.3.1 Struktura polymerů

Plasty jsou obecně makromolekulární organické látky. Podstatu polymeru tvoří makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu, v jejíž makromolekule se mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka – atom uhlíku, který má schopnost se s dalšími atomy vázat a vytvářet tak dlouhé řetězce [20]. Rozdělení polymerů dle seřazení monomerů se schématickou strukturou zobrazuje obr. 10.



Obr. 10 Struktura polymerů [21]: a) lineární řetězce, b) rozvětvené řetězce, c) řetězec se zkříženými vlákny, d) síťovaný řetězec.

Dle struktury řetězců dělíme polymery na [20,21]:

Lineární polymery (termoplasty) – monomery jsou seřazeny za sebou a tvoří tak jednoduchý řetězec, který je spolu s dalšími řetězci spojen Van der Waalsovými vazbami. Lineární makromolekuly mají dobrou pohyblivost a jsou dobře rozpustné a tavitelné.

Rozvětvené polymery (termoplasty, elastomery) – základní makromolekula se skládá z hlavního řetězce a z něho vycházející postranní „větve“. Tato struktura má nižší hustotu a zároveň horší mechanické vlastnosti ve srovnání s lineárními polymery vlivem větvení, které snižuje mezimolekulární síly.

Polymery se zkříženými články (elastomery) - sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články a vázány pomocí silné kovalentní vazby.

Sít'ované polymery (termosety) - trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby vytvářejí trojrozměrnou síť. Zesít'ovaná struktura vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti a zároveň zaručuje výhodné mechanické vlastnosti. Sít'ované polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost vůči zvýšené teplotě, avšak nižší rázovou odolnost. Patří sem například epoxidy a fenolformaldehydové pryskyřice.

1.3.2 Vlastnosti termosetů

Termosety jsou obecně velmi tvrdé a odolné polymerní materiály vlivem jejich trojrozměrné sítě vazeb – sít'ované struktury [12] (viz obr. 10, d). Vlivem zmíněného vytvrzení lze zaručit nízký potenciál deformace finálního výrobku, důležitý pro zachování přesné geometrie dílu vlivem vnějších podmínek. Termosetické materiály mají vysokou mechanickou pevnost a tuhost a často se používají k nahrazení kovů, což snižuje hmotnost dílu až o 75 % [23]. Další výhodou je dobrá teplotní stálost a téměř nulová smrštivost [17].

V důsledku zesítění termosetické polymery překonávají jiné materiály v několika oblastech včetně chemické odolnosti, tepelné stability, mechanických vlastností a celkové trvanlivosti. Jejich nevýhodou naopak je, vlivem pevné a neměnné vnitřní struktury, malá odolnosti vůči rázovému namáhání, která způsobuje sklony ke křehkosti [24].

Křížové vazby vzniklé procesem zesítění způsobují, že vytvrzený materiál je tuhý, rozměrově stabilní a vysoce odolný vůči teplu a chemikáliím, což činí termosety ideální pro aplikace s vysokou teplotou [24,25].

Vytvrzením materiálu dochází k trvalé chemické reakci, což znamená, že termosety nemohou být roztaveny a znovu tvarovány. Dají se tedy recyklovat pouze jako plnivo pro další aplikace v podobě výztužného materiálu [26]. Studie [27], předkládající možné využití BMC odpadu pro kompozity na bázi polypropylenu, představuje cestu, kterou by se dalo zamezit plýtvání a znovu kvalitně využít i termosetický, znovu netavitelný materiál.

Obecně se materiály BMC skládají z matrice v podobě termosetické pryskyřice, plniv a výztuže, nejčastěji v podobě skelných vláken. Významnou předností termosetů je možnost plnění jejich struktury různými typy aditiv (v podobě prášků, částic a vláken) a tím přímo ovlivnit konkrétní vlastnosti materiálu.

Při srovnání s termoplasty mají (až na některé výjimky) termosety [1,19]:

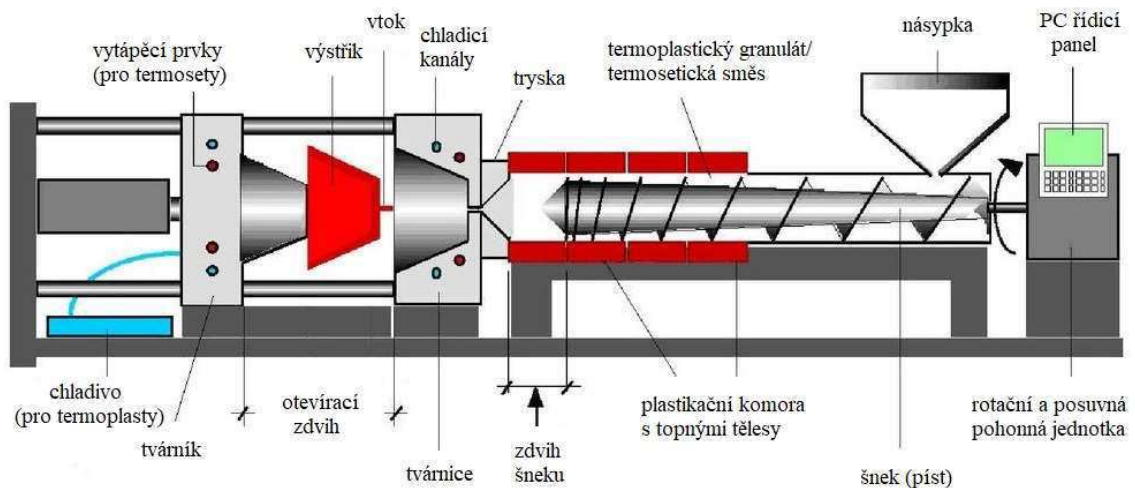
- vyšší hustotu;
- vyšší modul pružnosti;
- pevnost je přibližně na stejné úrovni;
- velmi nízkou lomovou houževnatost.

1.3.3 Zpracování termosetů

Termosetické hmoty obsahují polymery, které se v průběhu vytvrzování vzájemně síťují a tvoří tak nevratnou chemickou vazbu. Tím dochází ke vzniku tzv. "křížových vazeb" – trvalému spojení molekulárních řetězců [12].

V současnosti se přibližně 30 % [28] termosetů zpracovává metodou vstřikování. Oproti starší technologii lisování má řadu výhod. Proces lze automatizovat při použití mnohem kratších vytvrzovacích časů a také uskutečnit předehřev, dávkování, plastikaci a vstřikování pouze v jedné jednotce.

Naopak, termoplasty získávají svůj tvar roztavením a následným tuhnutím (ochlazením) v dutině formy [29], avšak nevytváří křížové vazby, jako je tomu u termosetických materiálů. Jejich tváření je tedy vratný proces, protože nedochází k žádné chemické vazbě a materiálové změny jsou čistě fyzikálního charakteru, zcela reverzibilního při opětovném zahřátí [25]. Po vytažení z dutiny formy však prochází složitě tvarový výrobek nežádoucím zkreslením z důvodu anizotropního smrštění [30]. Princip a schéma vstřikovacího stroje je znázorněný na obr. 11.



Obr. 11 Schéma vstřikovacího stroje – podle [20].

Zpracování termosetu a termoplastu je již z podstaty materiálu odlišné, avšak pro pochopení je vhodné jejich srovnání. Základní rozdíly vstřikování termosetu a termoplastu jsou zobrazeny následující tab. 2.

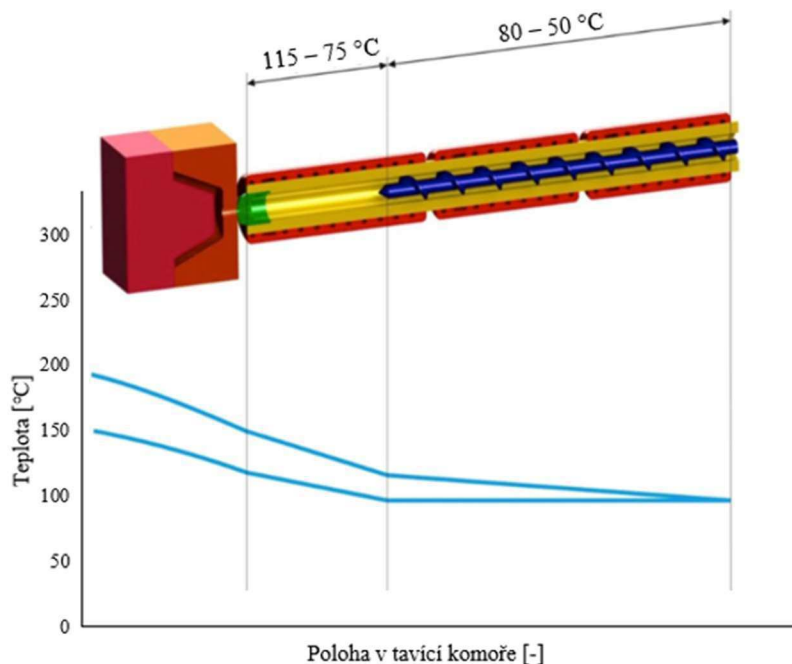
Tab. 2 Základní rozdíly vstřikování termosetického a termoplastického materiálu.

	Termoset	Termoplast
Forma	Vyhřívána	Chlazená
Dávkování	Plastická směs	Granulát
Šnek	Obyčejný (přímý)	Diferenciální

Rozdíly při vstřikování termoplastů a termosetů jsou v odlišné závislosti viskozity na teplotě, velikosti smrštění a nahrazení doby chlazení dobou vytvrzování. Vzhledem ke složitějšímu zpracování kvůli nízké viskozitě materiálu termosetů vyvstávají vyšší požadavky na vstřikovací stroj, a to zejména na dávkování materiálu [12]. Odlišná je také konstrukce stroje a šneku [28], který má potlačenou kompresní část tak, aby nedocházelo k velkému smykovému namáhání a předčasnému vytvrzení termosetu již v tavicí komoře.

Při vstřikování termoplastu je materiál ve formě granulí roztaven v plastifikační jednotce a ve formě taveniny vstřikován do chlazené formy. Jakmile se díl ochladí, respektive ztuhne, forma se otevírá a část je odebrána [26].

Při vstřikování termosetického materiálu je studený materiál vstřikován (vtlačován) do horké formy [26]. Proces zesítnění je aktivován tvrdidlem a zvýšenou teplotou [19]. Vstřikovací forma pro zpracování termosetického materiálu se nechladí, ale je naopak vyhřívána na teplotu vytvrzení 150-200 °C (dle druhu materiálu, vstřikovaného dílu), přičemž k plastifikaci termosetu dochází již při relativně nízkých teplotách 45-115 °C [28]. Teploty vstřikovacího procesu jsou znázorněny na obr. 12.



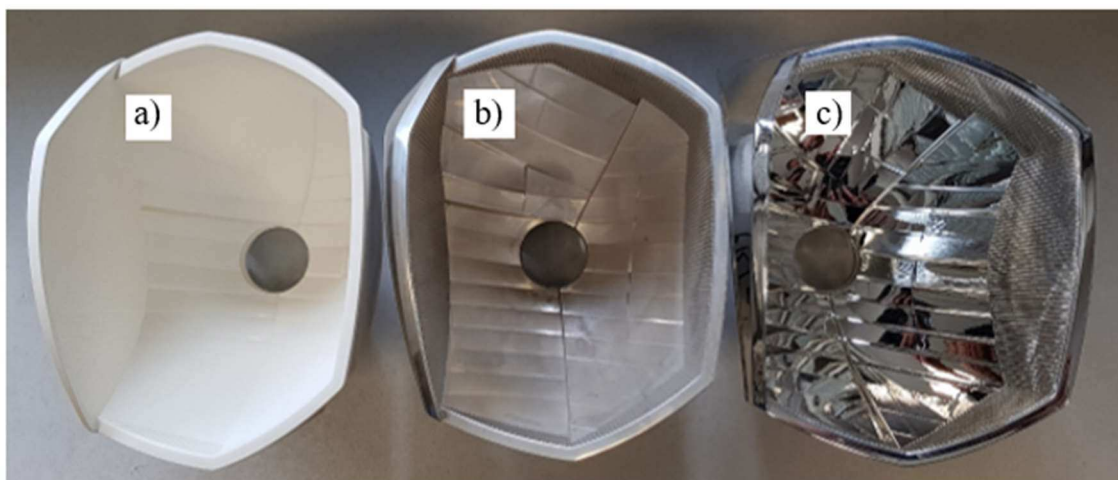
Obr. 12 Teploty v tavicí komoře a ve formě při vstřikování termosetu – podle [28].

1.4 Povrchová úprava termosetů

Reflektory světlometů, vyrobené z termosetických materiálů nedosahují v současné době leštěného povrchu, potřebného pro přenesení dostatečného optického výkonu [30]. Proto je třeba provést před nanesením reflexní hliníkové vrstvy další přídatnou operaci – lakování. Tímto postupem je zaručen vysoce lesklý povrch reflektoru, nutný pro vhodné odrazení a usměrnění záření světelného zdroje.

Na druhé straně termoplasty umožňují dosáhnout vstřikováním dobrý povrch pro následné přímé pokovení. Jejich nevýhodou je naopak výrazná smršťivost, zvláště pro velké reflektorové celky, a také výrazně vyšší cena surového materiálu.

BMC je pórovitý materiál a povrch dílu není dostatečně hladký. Ačkoliv se jedná o mikroskopické nepřesnosti, na pokovení mají nežádoucí vliv. Lakováním dojde k zalití pórů a vyhlazení povrchu reflektoru. Přímé pokovení nelakovaného dílu materiálu BMC by bylo nevyhovující z důvodu minimální odrazivosti povrchu. Srovnání pokovení bez předchozí operace lakování a s lakováním lze vidět na obr. 13.



Obr. 13 Povrch reflektoru po technologických operacích: a) surový díl po vstřikování, b) pokovení bez lakování - „přímé pokovení“, c) pokovení s předchozí operací lakování.

1.4.1 Lakování

Aplikace lakování se využívá jako základní povlak pro termosetické reflektory typu BMC. Snahou je nanesení co nejužší vrstvy, která po zaschnutí vytvoří pevný povrch, tzv. film. Po odebrání reflektoru ze vstřikovací formy pomocí robotu, opracování, tryskání ledem a ofouknutí ionizovaným vzduchem se díl zakládá do přípravku pro následné lakování a pokovení. Před vlastním lakováním je nutné provést několik přípravných operací. Přípravky s reflektory prochází na dopravníku přes ionizovaný vzduch, tryskání suchým ledem a aktivaci povrchové vrstvy plazmou [20].

Technologická úprava materiálu plazmou představuje velmi efektivní úpravu, vlivem které jsou beze změny vnitřní struktury a objemových vlastností materiálů modifikovány požadované povrchové vlastnosti a zabezpečena homogenita povrchu. Výsledným účinkem je změna povrchu, která se projevuje zvýšením smáčivosti, odstraněním elektrostatického náboje a prachu a zvýšením adheze polymeru [31].

- **Polévání**

S touto technologií lakování se můžeme setkat např. u výrobce světlometů Varroc Lighting Systems. Reflektory se upevní do rotačního přípravku, který projíždí přes "stěny" gravitačně stékajícího laku v lakovacím stroji. Rotující přípravek s reflektory prochází několika po sobě jdoucími stěnami, které způsobují ulpívání laku na povrchu reflektoru. Přebytečný lak stéká na dno lakovací komory a je znovu recyklován [14].

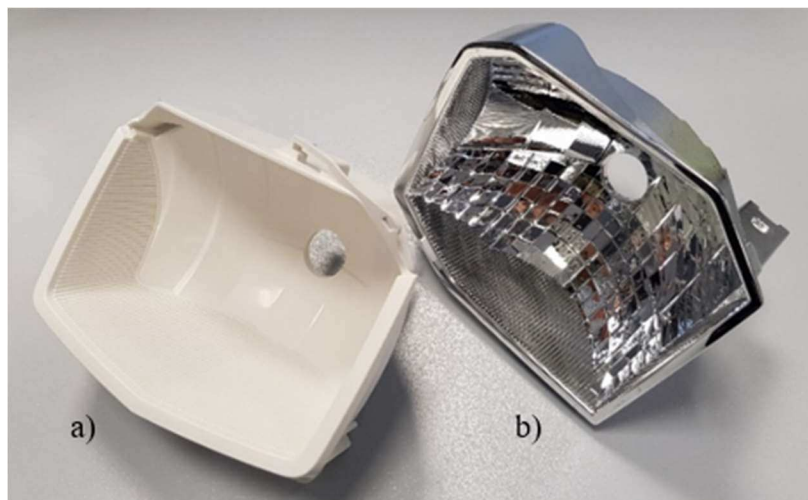
- **Stříkání**

Obchodní společnost HELLA Autotechnik Nova, s.r.o. naopak pro lakování využívá metodu stříkání. Lakování je prováděno robotickým nástřikem laku, sestávajícího z 98 % z pevné složky. Pro rozlití laku a rovnoměrné spojení prochází díly temperovanou komorou o teplotě 55 °C. Vytvrzení je aktivováno UV zářením. Nanášená tloušťka laku se u moderních LED reflektorů pohybuje v rozmezí 5-10 μm [7].

V obou zmíněných variantách je nanášení laku problematické, protože lak gravitačně stéká a tím dochází k nerovnoměrnému rozložení při zaschnutí. Lak se usazuje a zasychá zejména v tvarově složitých místech přechodů jednotlivých funkčních ploch, kde se nachází malé zaoblení, ostré hrany a podobně. Právě v těchto místech dochází za přechodem hrany k vytvoření konkávního nebo konvexního povrchového reliéfu, tzv. „anténa efekt“ – větší rádius přechodu, se kterým se při návrhu odrazové plochy nepočítalo. Simulace fotometrického chování lze realizovat pouze s ideálními optickými plochami. Vlivem nerovnoměrnosti nanášení laku jsou však fotometrické výsledky na lakovaných reflektorech mnohdy nedostatečné.

1.4.2 Pokovení

Pro zajištění hladké reflexní vrstvy a dobré odrazivosti reflektoru je povrch pokoven velmi tenkou hliníkovou vrstvou o tloušťce do 1 μm [20,32]. Povrchová úprava pokovení společně s předchozím lakováním reflektorem je zobrazena na obr. 14.



Obr. 14 Reflektory s povrchovými úpravami: a) lakování; b) lakování + pokovení.

Pokovení plastů lze technologicky rozdělit dle jejich hlavních rysů na [20]:

- **chemické pokovování** – funguje na principu vylučování kovu na povrch předmětu z roztoku soli povlakového kovu za působení redukčního činidla;
- **galvanické pokovování** – spočívá ve vyloučení kovu z roztoku účinkem stejnosměrného elektrického proudu. Galvanicky se pokovují téměř všechny termoplasty;
- **vakuové pokovování** – je metodou, při které dochází k naprašování kovů (nejčastěji hliníku) na plast za velmi nízkých tlaků ($1 \cdot 10^{-3}$ až jednotky Pa) při teplotách, kdy dochází k odpařování kovu.

Pokovením se dosahuje efektního kovového vzhledu a zároveň zlepšení mechanických vlastností, odolnosti proti kapalinám, plynům, chemikáliím, zmenšení navlhavosti a podobně [20]. Pro případ reflektoru světlometu je klíčové výrazné zlepšení odrazivosti povrchu.

Velký vliv pro úspěšné pokovení plastových výrobků má způsob výroby dílů a zejména povrchová kvalita surového materiálu. Z hlediska přilnavosti, adheze kovového povlaku k plastu, je rozhodující úprava povrchu před pokovením [20]. Díly před lakováním a zejména před pokovením nesmí mít jakékoliv vady v podobě mastnoty, drobných zrněk nečistoty a podobně, protože tenké vrstvy vakuového pokovení přesně kopírují povrchy součástí. Povrch surového dílu musí být dokonale čistý, neboť následný kovový povlak vadu ještě zvýrazní.

Proces pokovení reflektorů se skládá z následujících kroků [7]:

- 1) vytvoření vakua;
- 2) aktivace povrchu plazmou;
- 3) vlastní pokovení;
- 4) nanesení antikorozi vrstvy.

V prvním kroku je v komoře vytvořeno vakuum a odsáta přebytečná vlhkost. Další fází je aktivace plazmou odstraňující povrchovou kontaminaci, například z procesu vstřikování a transportu, která by aplikací metalizační vrstvy způsobila výrazné dekorativní vady. Díly se elektrostaticky vybíjejí a částečně dochází i k odstranění povrchového prachu. Zvýšení teploty během procesu také zlepšuje odplynění absorbované vlhkosti.

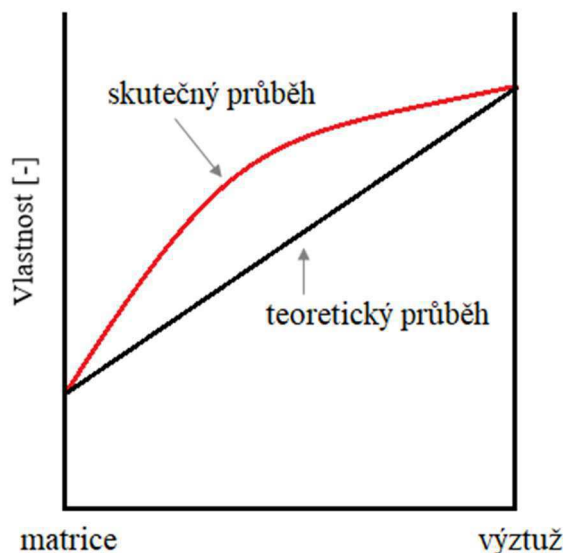
Vlastní pokovení probíhá naprašováním hliníku pomocí argonu. Rozptýlený hliník pak kondenzuje na površích reflektorů. Posledním krokem je nanesení antikorozi vrstvy, která je nutná pro ochranu pokoveného povrchu proti korozi vlivem vlhkého prostředí. Po dokončení mají součásti kovový reflexní povlak a jeden nebo více ochranných povlaků. Procesy vakuového pokovení umožňují výrobu extrémně čistých vrstev, což je zapotřebí k dosažení požadované vysoké úrovně odrazu. Používaným materiálem pro pokovení je hliník, který dosahuje odrazivost povrchu až 95 %. Dostatečné odrazivosti pro funkční plochy je dosahováno již s tloušťkou vrstvy 50 nm a vyšší. Pro dekorativní účely lze pokovení snížit na tloušťku méně než 30 nm. Pro dekorativní účely může být použito chromu, či jiných kovů [7].

2 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály, zkráceně kompozity, jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně odlišují svými vlastnostmi. Zpravidla jsou kompozity složené ze spojité matrice a další nespojitě fáze mající obvykle lepší mechanické vlastnosti, kterou nazýváme výztuž. Na rozdíl od slitin, kde jednotlivé heterogenní fáze vznikají fázovými přeměnami, se umělé kompozitní materiály vyrábějí pomocí mísení a spojování jednotlivých složek [33].

Při hodnocení vlastností kompozitních materiálů je charakteristický synergismus. Jak vyplývá z obr. 15, vlastnosti finálního kompozitu jsou lepší, než teoretický součet vlastností jednotlivých složek [22].

Hlavní význam využití polymerních kompozitních materiálů je ve vysoké specifické pevnosti a tuhosti při současně nízké měrné hmotnosti těchto materiálů, která se, na rozdíl od hliníku ($2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) nebo oceli ($7,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), pohybuje mezi $1,3$ až $1,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ [3]. Termosetické materiály nacházejí využití obecně v aplikacích s důrazem na pevnost konstrukce, tvarové stálosti a vyšší tepelné odolnosti dílu [3].



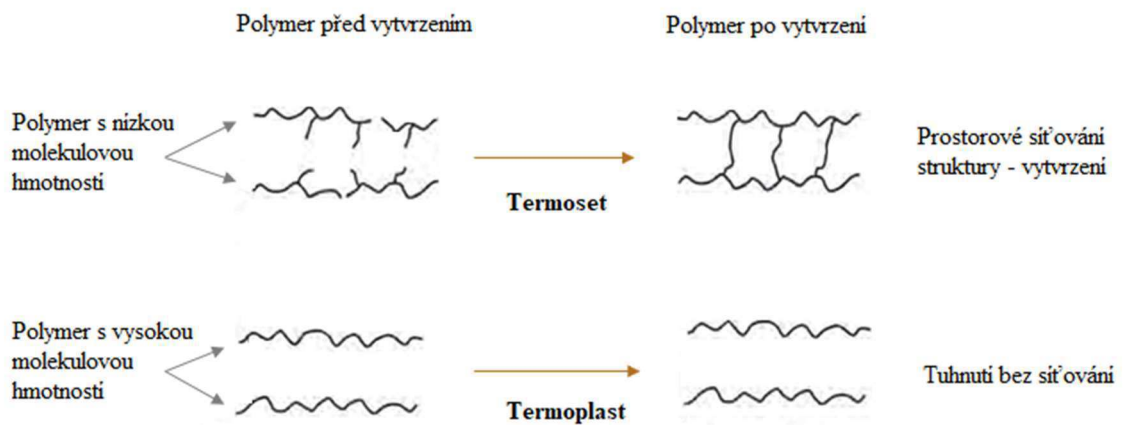
Obr. 15 Synergické chování složek kompozitu – podle [22].

Kompozitní materiály můžeme rozdělit na [1,7]:

- a) lamináty – vyztužené orientovanými vlákny nebo tkaninami;
- b) polymery plněné plnivem:
 - minerální plniva – talek, vápenec;
 - syntetická – skelná vlákna, uhlíková vlákna a trubičky, saze;
 - přírodní – přírodní vlákna, dřevní moučka, škrob.

2.1 Matrice

Matrice kompozitu zajišťuje dokonalé spojení vyztužujícího materiálu a také vytvoření vnějšího tvaru kompozitu. Hlavní výhodou polymerních matic v kompozitech je nízká hustota, díky které je jejich hlavní aplikací konstrukce letadel. Nejvýznamnější kompozity mají matrice termosetické, a to z polyesterových nebo epoxidových pryskyřic, z důvodů dobré adheze k vláknům [28], dobré odolnosti a nízkého smrštění během vytvrzování [4]. Hlavní funkcí matrice (pryskyřice) je držení vláken ve správných pozicích, ochrana před poškozením abrazií a pomoc při distribuci napětí [34]. Princip chování při zpracování termosetů a termoplastů je znázorněn na obr. 16.



Obr. 16: Rozdíl v chování termosetů a termoplastů při zpracování – podle [4].

2.2 Výztuž

Pro vyztužení kompozitu se používají takové materiály, které mají vyšší pevnost v porovnání s maticí a zároveň dobrou adhezi. Dle typu výztuže dělíme kompozitní materiály na částicové a vláknové [1] (viz obr. 17).



Obr. 17 Rozložení kompozitních materiálů dle geometrického tvaru výztuže – podle [22].

Kompozitní materiály lze dále rozlišit například podle materiálu výztuže na [33]:

- kovy (wolfram, železo, chrom, molybden, titan, nikl);
- nekovy – anorganické materiály – keramické materiály;
 - skla;
 - uhlíkové (grafit) a bórové materiály;
 - čedič;
- organické materiály – polymery (Kevlar, Nylon).

2.2.1 Částicové kompozitní materiály

Struktura částicových kompozitních materiálů je tvořena maticí zpevněnou drobnými částicemi obvykle o rozměrech menších než $1\ \mu\text{m}$. Částice mohou být typů [19]:

- kovy;
- kysličníky kovů;
- konstrukční keramika.

U kompozitu s částicovou výztuží nepřesahuje výrazně jeden rozměr útvaru rozměry ostatní. Částice mohou být kulovitého, destičkového, tyčinkového či nepravidelného tvaru. Vyztužení částicového charakteru se využívá zejména pro zvýšení tvrdosti, ořezuvzdornosti a odolnosti při zvýšených teplotách [22].

Nejvýznamnějšími částicovými kompozity na bázi polymerů jsou pryže. Plněním kompozitního materiálu pomocí sazí nebo oxidu křemičitého (SiO_2) lze dosáhnout až deseti-násobného zvýšení pevnosti [19].

2.2.2 Vlákňové kompozitní materiály

Naproti tomu u vláknových kompozitních materiálů mají výztuže v jednom směru výrazně větší rozměr než ve směrech ostatních. Vlákňové kompozity se dále dělí vzhledem k délce vyztužujících vláken na kompozity s krátkými vlákny, u nichž je jejich délka výrazně menší ve srovnání s celkovým rozměrem výrobku, a na kompozity s dlouhými (kontinuálními) vlákny, které mají délku vlákna téměř srovnatelnou s velikostí výrobku [1,22].

Významnou charakteristickou vlastností vláken je jejich pevnost v tahu ve směru osy, která je výrazně vyšší, než pevnost materiálu v kompaktní formě u konvenčních materiálů. Vlákna kompozitních materiálů mohou být anorganického nebo organického typu. Typickým příkladem polymerní výztuže jsou vlákna skelná, která jsou díky poměrně jednoduché výrobě v porovnání s ostatními typy nejlevnější. Skelná vlákna jsou vyráběna tažením z taveniny. Následně jsou ochlazeny a opatřeny ochrannou vrstvou, která brání oxidaci a zvyšuje adhezi a smáčivost organickými maticemi [33].

2.3 Plnivo

Pro vytvoření potřebného objemu materiálu při nízké ceně a zároveň dobrých vlastností se používají nejčastěji plniva [7]:

- **Talek (PP-T40)**

Jedná se o nejměkčí materiál s lamelární strukturou. Hlavní význam zastoupení v materiálu je z důvodu snížení ceny dílu. Talek má dobrý poměr tuhosti a rázové houževnatosti, zlepšuje pevnost v tahu, rozměrovou stabilitu a tepelnou odolnost.

- **Uhličitan vápenatý**

Uhličitan vápenatý tvoří 65 % celkové spotřeby plniv. Významně snižuje cenu a má zároveň vysoký stupeň bělosti. Je dostupný v širokém intervalu velikosti částic, dobře dispergovatelný a má nízký obsah vlhkosti.

2.4 Přísady

Polymerní přísady (aditiva) odstraňují nedostatky nebo zlepšují zpracovatelnost materiálu. Obecně se do směsi BMC přidávají přísady jako jsou: plniva, stabilizátory, mazadla, přísady zvyšující tekutost, tepelné stabilizátory a síťovací prostředky. Podle účinku lze aditiva dělit na [22]:

- přísady modifikující fyzikální vlastnosti;
- přísady s ochranným účinkem vůči degradaci.

3 BMC

Materiál typu BMC („*Bulk Moulding Compound*“) je termosetová kompozitní směs na bázi pryskyřice a vyztužujících vláken s minerálními plnidly a různými dalšími přísadami, které jsou navrženy tak, aby poskytovaly vhodné mechanické vlastnosti [35,36]. Materiál BMC se řadí do skupiny termosetických, dříve označované termínem „reaktoplastických“, polymerních hmot, které vznikly ve Spojených Státech kolem roku 1950 [4]. Díky možnosti změny poměru jednotlivých složek a úpravy vlastností různými vyztužemi a aditivami se jedná o unikátní materiál.

Nevytvrzený materiál ve formě plastické, pastovité směsi je dodáván ve vakuově balených dávkách – kostkách, odtud označení „*Bulk*“ (*Moulding Compound*). Typický vzhled nevytvrzené kompozitní směsi BMC je zobrazen na obr. 19.



Obr. 18 Termosetová kompozitní směs BMC.

Ve srovnání s ostatními plasty vyniká BMC svými mechanickými vlastnostmi (vysoký modul pružnosti a pevnost v tahu), velmi nízkým smrštěním a vlivem zesíťované struktury termosetu také dobrou tepelnou a chemickou odolností [32]. BMC se uplatňují zejména v případech, kde jsou výrobky náročné na zvýšenou teplotu, odolnost, nehořlavost, nízké smrštění a vyžadující dobré povrchové vlastnosti [4].

3.1 Složení směsi

Základní složkou BMC je polymerní matrice, která je nejčastěji tvořena nenasycenou polyesterovou nebo polyesterovou pryskyřicí. V nevytvrzeném BMC materiálu obsahuje pryskyřice akrylátové skupiny a styren. Jejich vzájemnou reakcí dochází k vytvrzení termosetu [3].

Další důležitou složkou jsou plniva, které lze rozdělit na [2]:

- vyztužující: krátká skelná vlákna;
- nevyztužující: minerální plniva, separační činidla, zahušťovadla a aditiva.

Obecně se plniva přidávají do směsi za účelem zvýšení odolnosti, pevnosti, tvarové stálosti, zpracovatelnosti, ale také pro snížení smrštění a ceny. Vyztužující plniva zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu jako jsou modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd. [3].

Ve snaze zvýšení materiálových vlastností a optimalizaci tvářecího procesu se přidávají do směsi další složky jako jsou katalyzátory, inhibitory, zahušťovadla, separační činidla, aditiva a pigmenty. Separací činidla umožňují snadné vyjmutí výrobku z formy a vytváří hladký povrch [2].

Přesné složení polyesterových lisovacích hmot je utajovanou informací. Dle druhu základních složek a jejich poměrů se mění forma a vzhled výsledného výrobku [2]. V různých zdrojích se složení směsi výrazně liší, avšak přibližné váhové procentuální zastoupení základních složek BMC je zobrazeno v následující tab. 3.

Tab. 3 Přibližné procentuální složení směsi BMC – podle [2,3,37].

Složky	Váhové procentuální zastoupení [hm. %]
Nenasycená polyesterová pryskyřice	10-45
Vyztužující plnivo (skelná vlákna)	10-40
Nevyztužující plnivo (CaCo ₃)	10-70
Kompenzátor smrštění (LPA)	2-7
Styren	1-2
Separátor	<1
Mazivo	0,5-3
Barevné pigmenty	Dle zbarvení
Zahušťovací složka (MgO)	<1
Inhibitor	Dle reaktivity a doby zatékání
Iniciátor	<0,2

3.1.1 Nenasycená polyesterová pryskyřice

Nejčastěji používaná matrice BMC, nenasyčená polyesterová pryskyřice, je charakterizována velkou reakční rychlostí, což v praxi znamená krátkou dobu vytvrzení a tím úsporu času [3]. Polyesterová pryskyřice se skládá z nenasyčených polyesterů rozpuštěných v reaktivním monomeru, nejčastěji styrenu [28].

Při vytvrzení přechází kapalná pryskyřice v nerozpustnou netavitelnou hmotu a vzniká tak zesíťovaná struktura. Vlivem chemické přeměny vytvrzení dochází u nenasyčené polyesterové pryskyřice k velkému objemovému smrštění, které však lze ovlivnit dalšími složkami jako jsou plniva, vyztužující vlákna a zejména aditiva [2].

3.1.2 Vyztužující plnivo – skelná vlákna

Vyztužujícím plnivem směsi BMC jsou skleněná vlákna – GF („*Glass Fibres*“), která zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu, zejména tuhost a rázovou pevnost materiálu. Pro vyztužení termosetických hmot typu BMC se používají skelná, azbestová nebo polyamidová vlákna [2].

V případě reflektorů jsou přidávána skleněná vlákna, vyrobená z E-skla, o délce 4-6 mm [12] a průměru 3,5 – 24 μm [7] (viz obr. 20). Procentuální zastoupení skleněné výztuže v materiálu BMC je obvykle 10–40 % [2].



Obr. 19 Sekaná skleněná vlákna – podle [38].

3.1.3 Nevyztužující plnivo

BMC směsi obsahují od 10 % až do 70 % práškových anorganických plniv v podobě uhličitanu vápenatého, mastku, slídy nebo oxidu hlinitého. Vedle hlavního důvodu snížení ceny výrobku také zmenšují smrštění, zabraňují vzniku trhlin a prasklin, zlepšují povrch vylisku a zvyšují tuhost a tvrdost vytvrzeného materiálu [4].

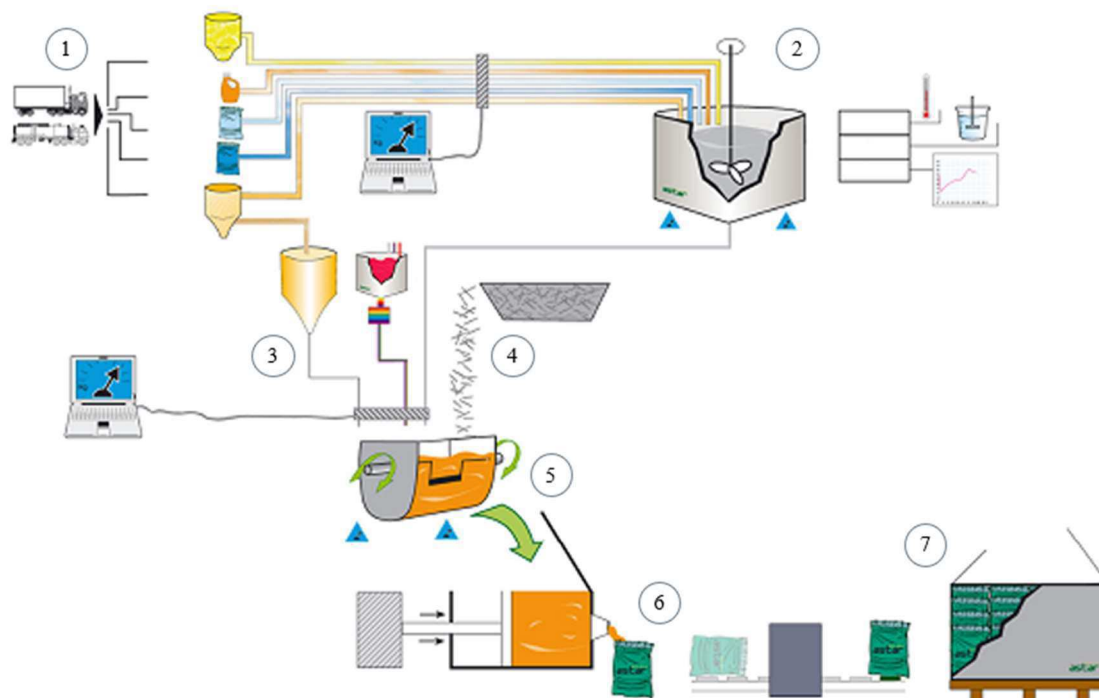
Nejlevnějším, a tedy i nejvhodnějším, minerálním plnivem ke snížení nákladů za materiál, ale i úpravy vlastností, je uhličitan vápenatý [4].

3.1.4 Aditiva

Vlivem chemické přeměny vytvrzení BMC dochází u nenasycené polyesterové pryskyřice k velkému smrštění pohybující se až okolo 9 % [2]. Pro zamezení smrštění, prasklin a vnitřního pnutí se do směsi přidávají nízko-profilové přísady zabraňující smrštění – LPA („*Low profile additives*“) v malém množství 3-7 % [4]. Jedná se o malé množství termoplastů, kterými lze vhodně ovlivnit smrštění při vytvrzování a zaručit tak tvarovou výrobní stálost BMC až na 0,04 % [39].

3.2 Výrobní proces BMC

Smícháním pryskyřice, plnidel a přísad dojde k vytvoření matné pasty. V následujícím kroku se plniva spolu s barevnými pigmenty a nasekanými vlákny automaticky váží a smíchávají dohromady. Schematicky je výrobní proces znázorněn na obr. 21.



Obr. 20 Výrobní proces materiálu BMC – podle [35].

- 1 – navážka směsi: pryskyřice, katalyzátory, aditiva, separátory a plniče;
- 2 – míchání složek (měření teploty, vizkozity);
- 3 – přidání vápence (barviv);
- 4 – přidání skleněných vláken;
- 5 – finální promíchání směsi;
- 6 – plnění do pytlů;
- 7 – balení a transport.

Při míchání směsi se používají hnětače, přičemž teplota směsi nesmí přesáhnout teplotu 35 °C z důvodu vysoké reaktivity směsi. Je nutno dodržet přesné navážení, pořadí a způsob přidávání surovin a směšovací dob [7].

Materiál BMC lze zpracovávat procesem lisování i vstřikováním. Pro zvýšení trvanlivosti formy pro zpracování vylisku (výstřiku) jsou doporučeny oceli s vysokým obsahem chromu [35], aby nedocházelo k poškození vlivem skleněných vláken. Povrch forem je z důvodu dosažení kvalitního vylisku pochromován a leštěn.

3.2.1 Příprava směsi

Proces přípravy směsi BMC sestává z hnětení a míchání. V první fázi se do pryskyřice zamíchá iniciátor. Po důkladném rozptýlení se dále přidává mazivo a nevyztužující plniva, která způsobí vznik „pasty“. Posledním krokem je přidání skleněné stříže. Doba mísení je volena s ohledem na zachování sklených nepolámaných vláken a zároveň dostatečnému promísení [2].

Výsledná směs jde do extruderu, který dávkuje BMC materiál pro transport. Takto připravená směs se vakuově balí do odolných styren-nepropustných polyethylenových (PE) obalů (obvykle po 10 kg), aby nedocházelo k uvolňování styrenu a změně vlastností materiálu [35].

Před následným tvářením do podoby hotového výrobku musí hmota vyzrát 2 až 4 dny pro dosažení optimálních tvářecích podmínek. Následné skladování nesmí překročit dobu 6 měsíců a teplotu 25 °C z důvodu zachování materiálových vlastností [35].

3.2.2 Vstřikování BMC

Materiál BMC se obvykle zpracovává vstřikováním do formy. Při vstřikovacím procesu je nutno zajistit správné rozložení pracovních teplot. Pístová a šneková část je udržována při nižší teplotě, přičemž vytvrzovací reakce musí být realizována až v dutině formy [3]. Celý výrobní proces sestává z následujících operací:

- vstřikování – v průběhu stlačení je materiál zahříván, což způsobuje lepší viskozitu pro plnění formy;
- manipulace – po vytvrzení se forma otevírá, výrobek je vysunut pomocí vyhazovacích kolíků a obvykle hned odebrán automatickým robotem, který následně provádí sekundární operace;
- přídatné operace – vyjmutý díl má v oblasti roviny formování přetoky, které je nutno mechanicky odstranit.

3.3 Výhody a nevýhody výrobků z BMC

Zhodnocení reálných vlastností materiálů BMC (ve srovnání s termoplasty) [7,14,36]:

Výhody:

- přesná reprodukce povrchů formy;
- dobré mechanické vlastnosti;
- velmi dobrá tepelná stabilita;
- žádné tvarové změny při mechanickém zatížení, či tepelném působení;
- vysoký modul pružnosti a tuhosti;
- téměř žádné výrobní smrštění;
- velmi nízký součinitel tepelné roztažnosti;
- cena materiálu.

Nevýhody:

- vyšší křehkost;
- vyšší náklady na zpracování – opracování ořepů;
- nutnost následného lakování (zajištění světelné odrazivosti).

Při zpracování na tvářecí teplotu je BMC tekutý, což přináší problémy s dokonalým utěsněním formy. To způsobuje nutnost následného mechanického odstranění přetoků v oblasti dělicí roviny. Další nevýhodou oproti termoplastu je nutnost lakování surového výlisku pro zajištění dostatečně hladkého povrchu pro následné pokovení.

3.4 BMC TETRADUR TD 492/2

Materiálové označení obchodním názvem TETRADUR TD 492/2 je typ směsi BMC standartně používané pro výrobu reflektorů v obchodní společnosti HELLA Autotechnik Nova, s.r.o. Výrobce materiálu je společnost Tetra-DUR patřící do skupiny Citadel Plastic. Jedná se o kompozitní termosetický materiál, určený pro vstřikování nebo lisování, na bázi nenasyčené polyesterové pryskyřice, minerálních plniv a vyztužujících skelných vláken.

Technické vlastnosti materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 dle materiálového listu výrobce [40] jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Technické vlastnosti materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 – podle [40].

Materiálové vlastnosti	Norma	Jednotka	Hodnota
Hustota	ISO 1183	[g·cm ⁻³]	2
Smrštění	ISO 2577	[%]	0,02
Pevnost v ohybu	ISO 178	[MPa]	110
Modul pevnosti v ohybu	ISO 178	[GPa]	13
Rázová houževnatost	ISO 179	[KJ·m ²]	15
Teplota průhybu při zatížení	ISO 75	[°C]	>250
Absorbce vody	ISO 62	[%]	<0,3
Povrchový odpor	IEC 60093	[Ω]	1·10 ¹²
Specifický vnitřní odpor	IEC 60093	[Ωcm]	1·10 ¹⁴
Dielektrický ztrátový činitel	IEC 60250		<0,05
Permitivita při 1 Mhz	IEC 60250		≈ 4,5
Elektrická pevnost	IEC 60243	[kV·m ⁻¹]	20
Odolnost vůči plazivým proudům	IEC 60112	[CTI]	600

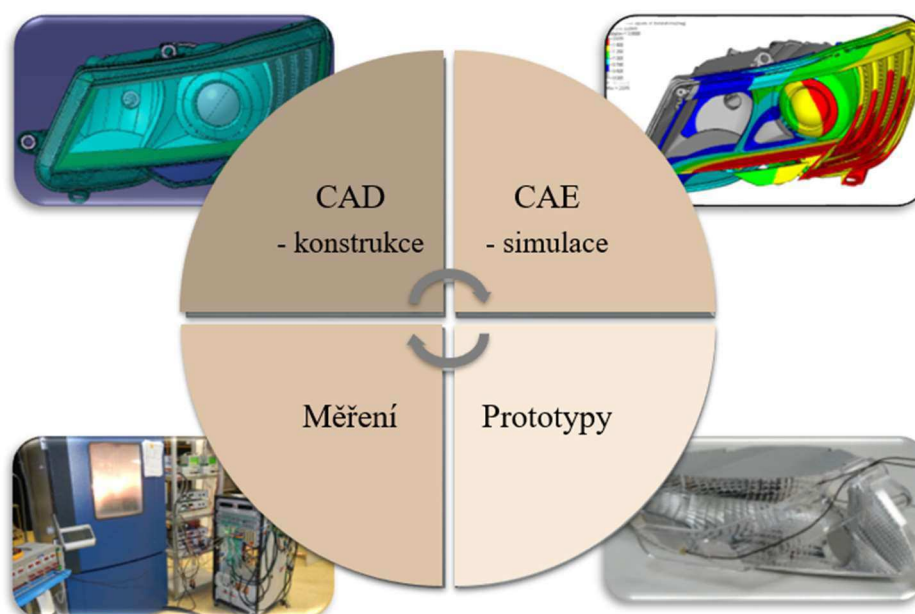
Materiál typu BMC Menzolit 3100, navržený speciálně pro účely automobilového průmyslu na výrobu reflektorů, dosahuje velmi podobných vlastností [36] a je používán pro výrobu reflektorů ve společnosti Automotive Lighting [3].

4 VÝVOJOVÉ A ZKUŠEBNÍ KVALIFIKACE

Testování slouží k odhalení možných slabín při návrhu, vývoji i výrobě produktu. Splnění požadovaných testů a zkoušek je zárukou provozuschopnosti a bezpečnosti výrobku při jeho používání.

Výsledky mechanických zkoušek jsou základními parametry, které je třeba zadat pro popis materiálu v případě simulačních výpočtů. Cílem zkoušení je ověření a deklarace interních, zákaznických a legislativních požadavků na mechanické, optické a elektronické parametry vyvíjeného produktu.

Vývojová smyčka produktu se skládá ze základních fází zobrazených na obr. 22.



Obr. 21 Vývojová smyčka produkt – podle [7].

4.1 Počítačové simulace

Důležitou fází při vývoji a výrobě plastových vstříků jsou simulační výpočty a jejich implementace do praxe. Simulace vstřikování a další typy výpočtů řadíme do konceptu digitálního (virtuálního) prototypu [41], který umožňuje kompletní testování a prověřování teoretického chování ještě předtím, než je reálně vyroben. Vývojovému oddělení techniků tento nástroj umožňuje odladit a zdokonalit budoucí výrobek.

Simulační programy vyžadují materiálová data jako vstupní hodnotu. Pokud nejsou potřebná data k dispozici, používají se i s vědomím jistých nepřesností data nejbližšího příbuzného materiálu [41].

4.2 Materiálové zkoušky

Pro zjištění vlastností polymerních materiálů jsou využívány zkoušky mechanických, chemických a fyzikálních vlastností. Pro výběr materiálu je důraz kladen zejména na mechanické zkoušky [42], při kterých je hodnoceno působení vnějších mechanických sil. Ve světlometu je pak důležitá zvláště rozměrová teplotní stálost a odolnost a v případě reflektoru také kvalita odrazného povrchu.

Mechanické zkoušky lze zhodnotit okrajově i na hotových součástech, avšak obvykle se provádí na speciálně zhotovených a normovaných vzorcích téhož materiálu [43]. Pro zajištění reprodukovatelnosti a věrohodného srovnání vlastností materiálů musí být zkoušky prováděny dle přesně definovaných postupů a podmínek.

Vlastnosti materiálů můžeme rozdělit na:

Fyzikální vlastnosti [43]:

- hustota materiálu;
- teploty materiálových strukturních přechodů;
- objemová roztažnost, smršťivost;
- tepelná, elektrická vodivost.

Chemické vlastnosti:

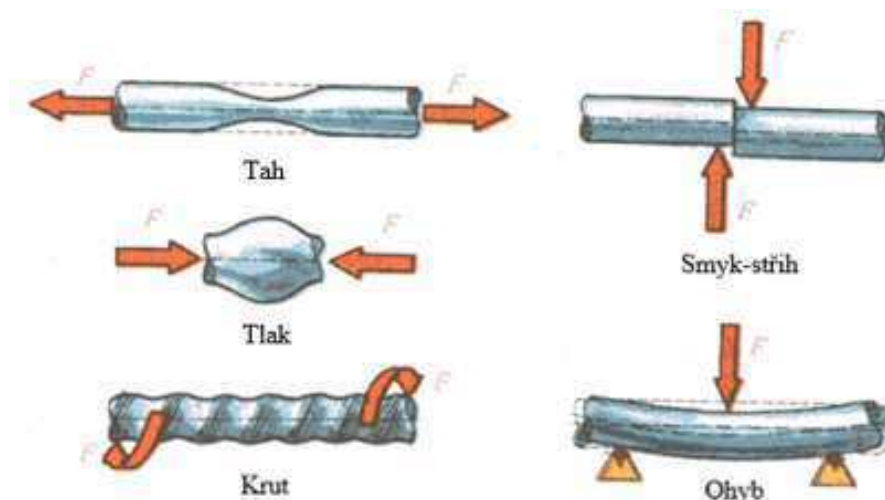
K narušení povrchu a vlastností materiálu dochází také vlivem chemických účinků různých kapalných nebo plyných prostředí [42]. Snahou laboratorních zkoušek je tedy co nejdříve napodobit reálné provozní podmínky, které mohou v běžném prostředí nastat. Pro zajištění maximální spolehlivosti je nutno uvažovat limitní nejnepříznivější podmínky pro světlomet. Laboratorně lze tyto nepříznivé podmínky zkoušet v klimatizačních komorách.

Mechanické vlastnosti:

Mechanické vlastnosti hodnotí chování materiálu při působení vnějších mechanických sil. Základními vlastnostmi jsou [22,24]:

- **pružnost** – neboli elasticita je schopnost materiálu vykazovat pružnou deformaci před porušením;
- **pevnost** – odpor materiálu proti deformaci a porušení vnějšími silami, důležitá pro dlouhodobě namáhané díly;
- **plasticita** – schopnost materiálu zachovat trvalé deformace vyvolané účinkem vnějších sil;
- **houževnatost** – schopnost materiálu odolávat bez porušení velkým napětím a zůstat bez trhlin.

V běžné praxi jsou materiály namáhány na různé kombinace zátěží: tah, tlak, krut, smyk-střih a ohyb (viz obr. 23).



Obr. 22 Základní druhy namáhání materiálu [43].

Druhy zkoušek mechanických vlastností materiálů z pohledu působící síly dělíme na [1,22]:

- **statické zkoušky** – zatížení je zvyšováno pomalu. Jedná se obvykle o minuty, při dlouhodobých zkouškách pak dny až roky;
- **dynamické zkoušky rázové a cyklické** – působení síly je nárazové, řádově zlomek sekundy. Při cyklických zkouškách ke zjištění únavy materiálu se zatížení proměnně cykluje ve velkém počtu opakování.

Z časového hlediska mechanické charakteristiky dělíme na [28,42]:

- **krátkodobé** – jejich stanovení netrvá déle než několik minut;
- **dlouhodobé** – vyjadřují vlastnosti polymerů z dlouhodobého hlediska až 10^5 hodin.

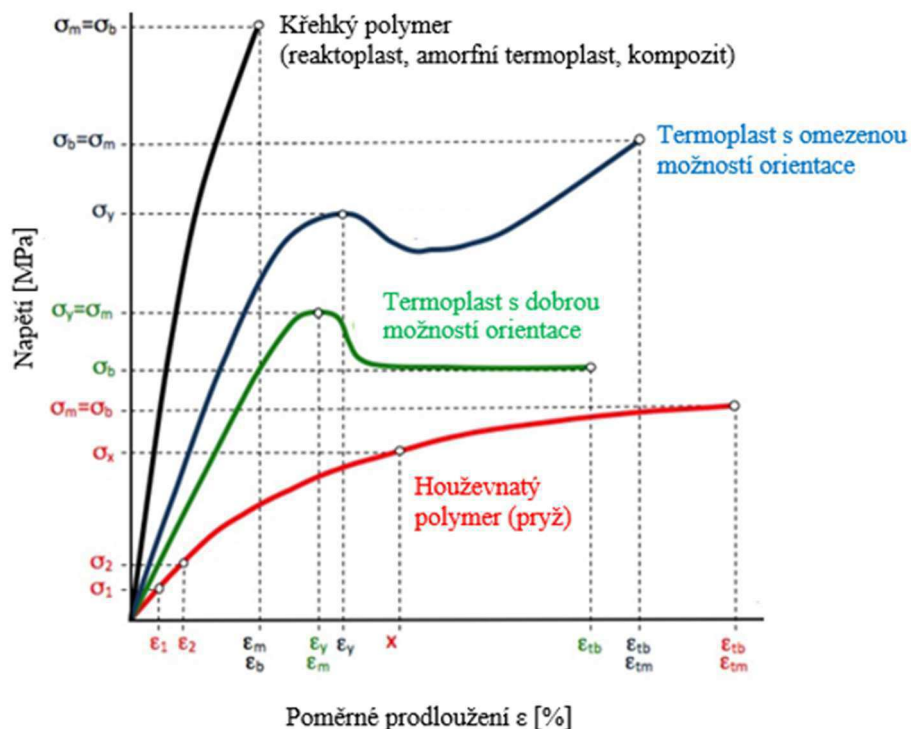
Polymerní materiál, který se při statickém namáhání (tahová zkouška/ohybová zkouška) poruší při větším prodloužení/průhybu anebo vůbec, se zároveň při vyšší rychlosti namáhání (rázová zkouška) poruší již při malém vychýlení. Pevnost je tedy v nepřímé úměrnosti s houževnatostí materiálu, jejíž protiklad je materiállová křehkost.

Praktickým příkladem je právě světlomet automobilu, který je zatěžován dlouhodobými vibracemi a na který je kladen požadavek houževnatosti – odolnosti proti šíření trhlin. Z tohoto důvodu je většina částí světlometu vyrobena z termoplastu. Při návrhu BMC směsi byl kladen důraz zejména na výslednou houževnatost.

4.2.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška je nejzákladnější zkušební metodou hodnotící vlastnosti materiálu. Cílem je stanovení tahového diagramu a základních mechanických charakteristik (pro termosety jsou to hodnoty mezi pevnosti a modulu pružnosti) [44].

Při tahové zkoušce je zkušební těleso uchyceno v čelistech a namáháno jednoosým tahem. Během tahové zkoušky je zaznamenávána zatěžující síla F [N] resp. napětí [MPa] na poměrném prodloužení zkušební vzorku ΔL [mm]. Závislost napětí na poměrném prodloužení je vykreslena pomocí deformační křivky (viz obr. 24), která poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu [28,42].



Obr. 23 Typické deformační křivky polymerů v tahu – podle [28].

Tahový diagram končí v okamžiku lomu (přetržení) zkušební vzorku. Jedná se o oddělení jednotlivých částí vlivem působení mechanické tahové síly. Na porušení vzorku však nemá vliv pouze pevnost chemických vazeb, ale také defekty (vady) v mikrostruktuře materiálu jako jsou mikrotrhliny (vznikající pnutím materiálu) a dutiny (způsobené například smrštěním, změnou teplot) [22].

Z deformační křivky se určují pevnostní charakteristiky [28,44,45]:

Mez pevnosti (σ_m) – určuje hodnotu, kdy má materiál nejvyšší pevnost. Po jejím překročení nastává porušení soudržnosti materiálu doprovázené poklesem napětí a lomem. Jedná se o okamžik destrukce materiálu. Mez pevnosti v tahu odpovídá maximálnímu tahovému napětí při tahové zkoušce a vypočítá se dle vztahu (1):

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa] \quad (1)$$

Napětí na mezi kluzu (σ_y) - napětí, při kterém začíná vznikat plastická (trvalá) deformace a začíná se tvořit tzv. krček, který se dále s rostoucím napětím rozšiřuje. Na tahové křivce (pro termoplasty) vymezuje bod, kdy se zkušební vzorek začíná deformovat, aniž by se zvyšovala tahová síla. Vyztužené termosety se však vlivem síťované struktury nenatahují, a tudíž se hodnota σ_y neměří [7].

Napětí při přetržení (σ_b) - napětí, kdy dojde k porušení zkušebního tělesa. U křehkých polymerů může být shodné s napětím na mezi pevnosti.

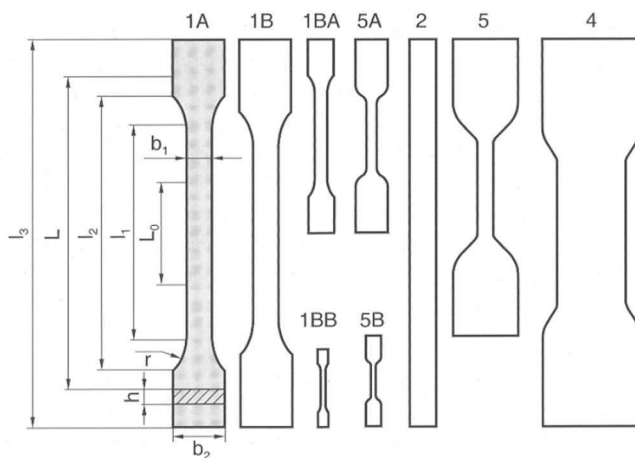
Modul pružnosti v tahu (E) – je další důležitou materiálovou charakteristikou polymerů, který nás informuje o tuhosti materiálu. Jeho hodnota se stanoví z deformační křivky v oblasti lineární závislosti napětí (σ) na poměrném prodloužení (ε) a vypočítá se dle vztahu (2):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (2)$$

Pro oblast lineární závislosti ($\sigma - \varepsilon$) platí Hookův zákon, popisující pružnou deformaci materiálu, která po uvolnění vymizí. Po překročení koncového bodu lineární oblasti Hookovského chování, označovaného jako mez úměrnosti, dochází s rostoucím zatížením k zakřivení křivky vlivem pružné i plastické deformace. Mez pružnosti je bod, do kterého je deformace vratná. Po jeho překročení však již dochází k výrazné deformaci (i při malém zvýšení napětí) a nastává plastická – trvalá deformace – mez kluzu. Za horní mez kluzu se označuje bod, po kterém napětí poklesá a minimum na pokračující křivce se označuje jako dolní mez kluzu [28,44].

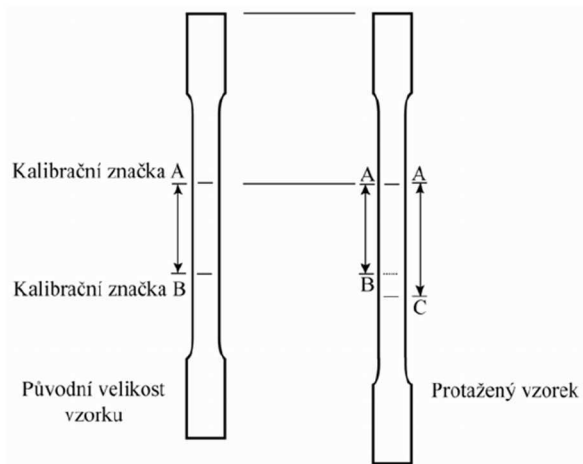
U semikrystalických polymerů dochází za dolní mezí kluzu opět k nárůstu napětí až do přetržení zkušebního tělesa nebo k porušení soudružnosti doprovázené poklesem napětí a lomem. V případě křehkých polymerů dochází k lomu těsně za mezí pružnosti, při relativně nízkých deformacích [28].

Tvar a rozměry zkušebních těles jsou přesně definovány normou pro konkrétní materiál. Z důvodu možného poškození v místě uchycení do čelistí mají zkušební tělesa tvar lopatek [42,45].



Obr. 24 Tvary zkušebních těles pro tahové zkoušky [46].

V normě pro tahovou zkoušku ČSN EN ISO 527-2 je uvedeno 6 typů standartních zkušebních těles (viz obr. 25). Pro vzorky připravené metodou obrábění je preferováno těleso typu 1 B [42]. Prodloužení vzorku při tahové zkoušce je zobrazeno na obr. 26.

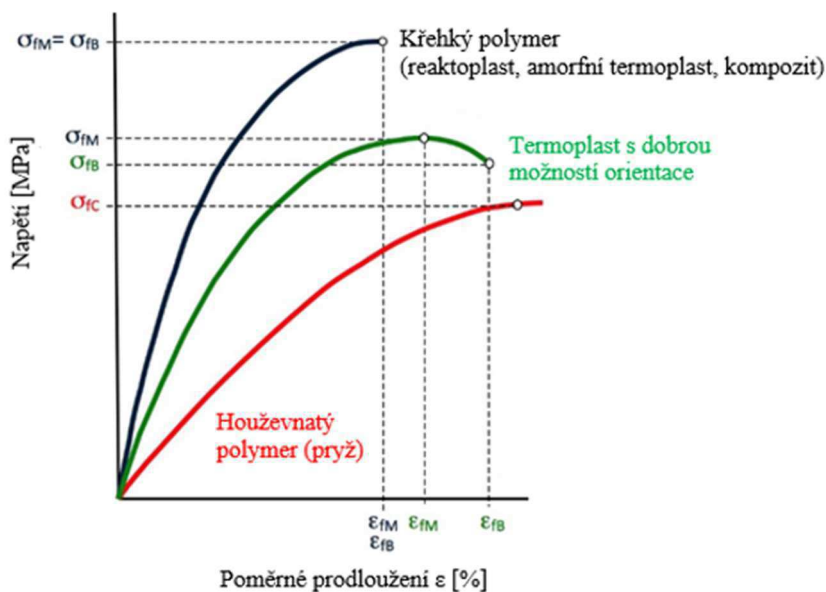


Obr. 25 Prodloužení pracovní části vzorku při tahové zkoušce [42].

4.2.2 Ohybová zkouška

Zkouška ohybem udává důležité informace o chování polymerního materiálu v ohybu. Zejména se využívá pro stanovení modulu pružnosti u polymerů s malou tažností, u kterých to není možné vlivem nepřesností z tahových či tlakových zkoušek [46]. Zkoušky ohybu jsou vhodnější pro tuhé a křehké materiály, které vykazují malé průhyby při přetržení než pro velmi měkké a tažné materiály [47].

Vlastnosti ohybové zkoušky vychází z tzv. deformační křivky (viz obr. 27) a vyjadřují závislost ohybového napětí na ohybové deformaci.

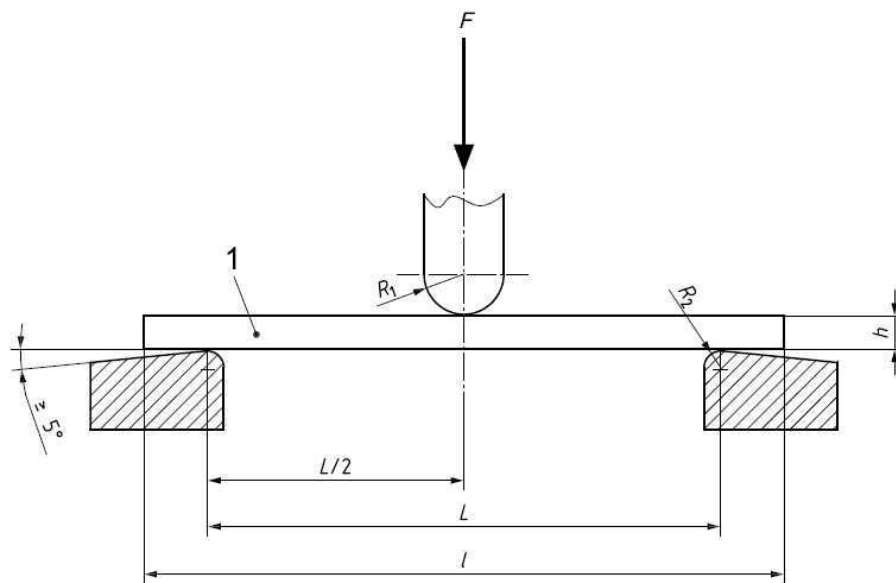


Obr. 26 Typické deformační křivky polymerů v ohybu – podle [28].

Z deformační ohybové křivky se určují typické pevnostní charakteristiky [42,46]:

- **Modul pružnosti v ohybu (σ_y)** – odpovídá napětí v závislosti na ohybové deformaci a vyjadřuje schopnost materiálu odolávat ohybovému zatížení;
- **Mez pevnosti v ohybu (σ_{fM})** – maximální namáhání v ohybu zkušebním tělesem během zkoušky ohybem. Odpovídá napětí v okamžiku destrukce materiálu (matrice) – okamžik ztráty pevnosti (nikoliv při přetržení);
- **Napětí v ohybu při přetržení (σ_{fB})** – napětí v ohybu při přetržení zkušebního tělesa;

Schématické znázornění tříbodové ohybové zkoušky je na obr. 28.



Obr. 27 Schématické znázornění tříbodové ohybové zkoušky [47].

l – zkušební vzorek, F – aplikované zatížení, R_1 – poloměr indentoru ($R_1 = 5,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$),
 R_2 – poloměr podpěry ($R_2 = 5,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, pro zkušební vzorky tloušťky $> 3 \text{ mm}$), h –
tloušťka zkušebního vzorku, l – délka zkušebního vzorku, L – rozteč mezi podpěrami.

4.2.3 Zkouška rázové houževnatosti

Rázová houževnatost materiálu úzce souvisí se schopností materiálu rychle absorbovat energii, tzn. deformovat se určitou rychlostí. Jedná se o materiálovou vlastnost zůstat při namáhání bez trhlin. Nejlepších výsledků dosahují elastomery, mající skvělé elastické charakteristiky. U termoplastů a termosetů však může obecně docházet vlivem rázového namáhání k porušení křehkým nebo houževnatým lomem [28].

Rázovým namáháním se rozumí namáhání s rychlostí 1 až 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Polymerní materiál, který se při statickém namáhání poruší až při větším zatížení anebo vůbec se při větší rychlosti namáhání stává křehčím. Deformace či porušení zkušebního tělesa se účinkem rázu projeví již při malém průhybu [46].

U plastových materiálů se zkoušky provádí zejména pomocí kyvadla metodami [42]:

- stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy;
- stanovení rázové houževnatosti metodou Izod.

Obecně proces porušování probíhá ve dvou krocích [28]:

- 1) iniciace trhliny ve zkušném objektu;
- 2) šíření trhliny až do úplného dolomení.



Obr. 28 Průběh rázové zkoušky metodou Charpy [28].

Rázová houževnatost metodou Charpy je definována jako kinetická energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa vztažená na jeho původní průřez [48].

Zkušební těleso tvaru hranolu je umístěné vodorovně na podpěrách a následně přeraženo úderem kladiva v místě středu tělesa (viz obr. 29). Během zkoušky se zaznamenává energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa a typ přeražení: úplné, částečné nebo nepřeraženo. Pro polymery vykazující tak vysokou houževnatost, že k přeražení nedojde, jsou zkušební tělesa opatřena vrubem. V jeho okolí dochází při rázu ke koncentraci napětí a nastává porušení těles. Hovoříme o tzv. vrubové houževnatosti [42].

4.2.4 Zkouška tvrdosti

Pod pojmem tvrdost materiálu se rozumí odpor materiálu vůči vnikání jiného, tvrdšího materiálu [49]. Nejvyšší tvrdosti u polymerů dosahují termosety a nejnižší kaučuky [28].

Pro zkoušky tvrdosti se používají obecně metody [43]:

- a) vrypové;
- b) vnikací;
- c) odrazové.

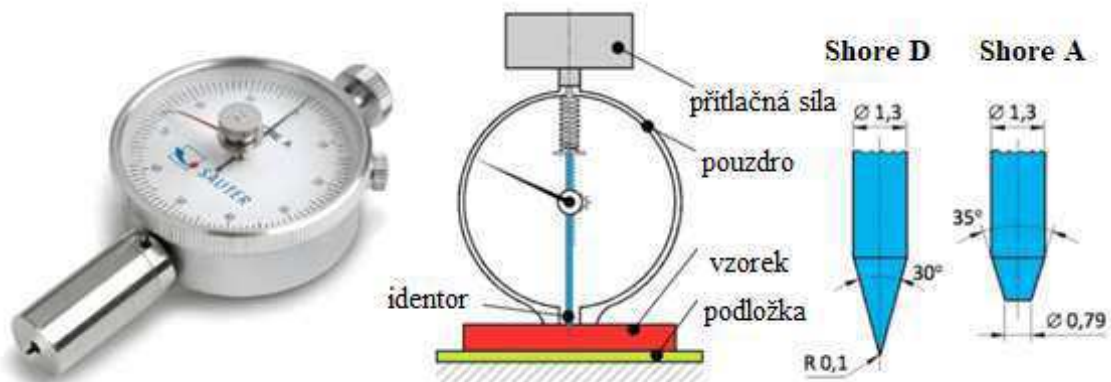
Podstata měření vnikacích zkoušek, které se řadí mezi nejpoužívanější zkušební metody hodnocení tvrdosti, spočívá ve vtláčení zkušebního tělíska („indentoru“) definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. Následně se hodnotí hloubka vniknutí zkušebního tělíska do materiálu. Na rozdíl od kovů musí být u elastomerů uvažován podíl plastické i elastické deformace a celkové vniknutí tedy měřeno již v průběhu zatížení po definované době [44,50].

Pro relevantní výsledky zkoušek tvrdosti je nutno uvažovat faktory, které negativně ovlivňují výsledky měření. Zejména se jedná o přesnost zařízení, teplotu vzorku, dobu zatížení, povrch vzorku i jeho tloušťku. Na okrajích vzorků bývá obvykle tvrdost menší, a naopak se snižující se tloušťkou materiálu lze očekávat nárůst tvrdosti, vzhledem ke zkrácení kvůli tvrdší podložce [28]. V případě umístění hrotu na dutinu nebo naopak shluk vyztužujících částic může dojít k nechtěným odchylkám vlivem nehomogenity povrchu. Z tohoto důvodu je doporučeno alespoň 10 měření na 1 vzorek [49].

Pro měření tvrdosti polymerů se v praxi nejčastěji používají vnikací zkoušky metodou vtláčování kuličky anebo metodou Shore [42,46], jejíž schématické znázornění je na obr. 30.

Zkoušky tvrdosti materiálů se obecně dělí dle charakteru zátěžné síly na [46], [44]:

- statické – měření tvrdosti podle Brinella, Vickerse, Rockwella;
- dynamické – Poldi kladívko, duroskop, odrazové zkoušky.



Obr. 29 Tvrdoměr Shore a jeho geometrie – podle [28].

4.2.5 Termogravimetrie

Metody termické analýzy jsou jedny z nejdůležitějších fyzikálně-chemických technik sloužících k analýze širokého spektra materiálů. Jedná se o soubor metod, kterými je v definované atmosféře sledována některá vlastnost vzorku v závislosti na čase nebo teplotě při současné změny teploty. Metoda termogravimetrie je použitelná pro kapaliny nebo pevné látky. Zkoumaný materiál je podroben teplotnímu režimu (ohřev, chlazení nebo konstantní teplota), při kterém dochází k pochodům zahrnujících dehydrataci, oxidaci, tání, polymeraci, fázové přeměny a podobně. Monitorována je změna vlastnosti materiálu, charakterizována změnou hmotnosti, rozměru, objemu či vodivosti. Výsledkem zkoušky je stanovení teploty a rychlosti rozkladu polymerů a zároveň určení množství jednotlivých složek, které materiál obsahuje [51,52].

Dle zkoumané vlastnosti, jejíž změna je sledována, se nazývá i příslušná analýza. Přehled základních metod termické analýzy zobrazuje tab. 5.

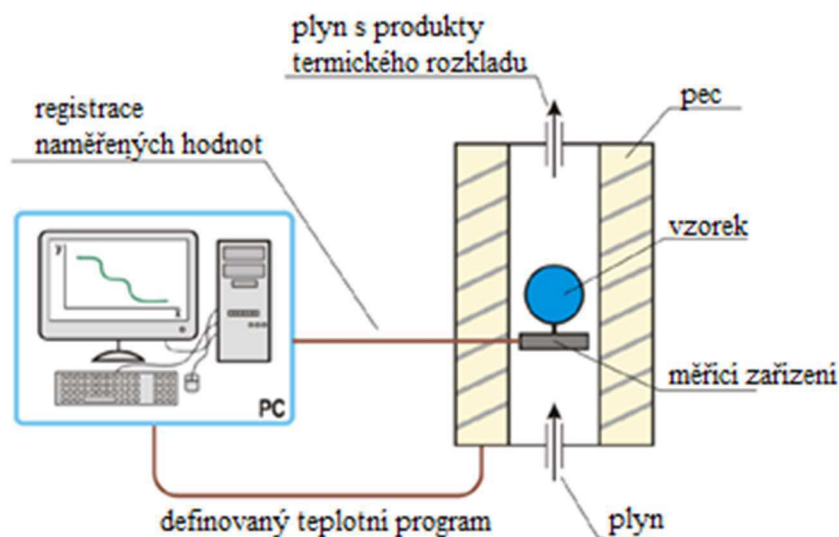
Tab. 5 Metody termické analýzy – podle [53].

Metoda	Studovaná vlastnost	Zkratka
Termogravimetrická analýza	hmotnost	TG
Diferenční termická analýza	rozdíl teplot	DTA
Diferenční skenovací kolorimetrie	entalpie, tepelný tok	DSC
Termomechanická analýza	rozměry a mechanické vlastnosti	TMA
Termoelektrická analýza	elektrické vlastnosti	TEA
Termomagnetická analýza	magnetické vlastnosti	-
Termooptická analýza	optické vlastnosti	TOA
Termoakustická analýza	akustické vlastnosti	-

Jednou ze základních metod termické analýzy je termogravimetrie (TG), která zkoumá změny hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě. Význam zkoušky spočívá ve stanovení tepelné nebo tepelně-oxidační stability vzorku a v popisu dějů, kterými dochází ke změně hmotnosti vzorku. Na základě zjištění úbytku dílčí a celkové hmotnosti určujeme složení materiálu a tepelný rozklad jednotlivých látek. Reakce, které způsobují změnu hmotnosti zkušební vzorku jsou rozklad, oxidační reakce nebo odpařování. Během měření se zkušební vzorek uchovává v kontrolované inertní nebo oxidační atmosféře [53].

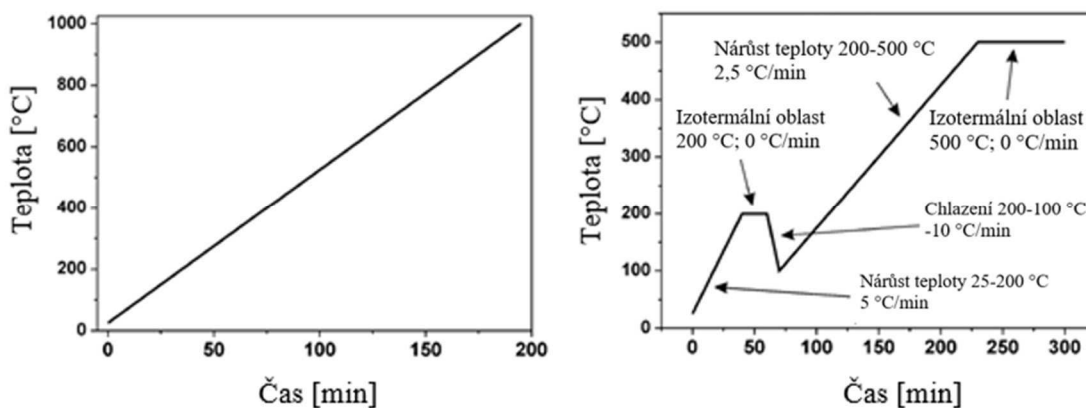
Vzorek (miligramy až gramy) vystaven tepelnému namáhání (až 1000 °C) a na citlivých mikrováhách je sledována změna jeho hmotnosti. Ke změně dochází uvolněním plynných produktů. Pomocí analýzy kroků degradace materiálu je pak možno usuzovat na jeho složení, obsah vlhkosti, obsah organické hmoty a anorganické hmoty [51].

Obecné schéma termického analyzátoru lze vidět na obr. 31.



Obr. 30 Obecné schéma termického analyzátoru – podle [53].

Základním parametrem nastavení termogravimetrické zkoušky je teplotní diagram (viz obr. 32). Termogravimetrická měření mohou být prováděna v dynamickém režimu (změna hmotnosti v závislosti na teplotě) anebo izotermickém režimu. V rámci programu je třeba uvažovat teplotní rozsah analýzy, teplotní gradient (obvykle 1-20 °C/min) a složení teplotního programu [52].

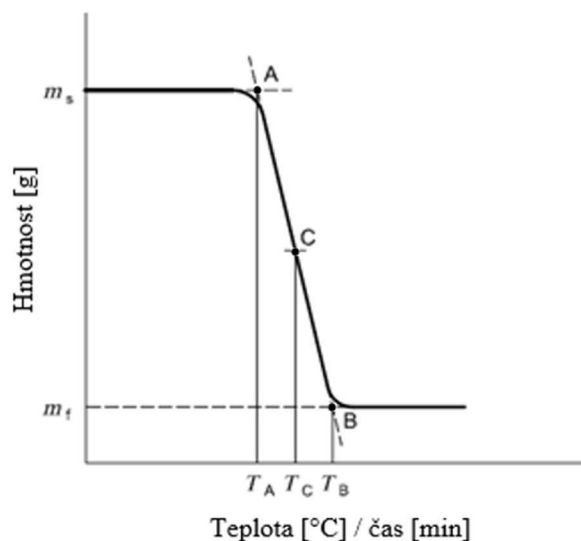


Obr. 31: Příklady teplotních programů – podle [53].

a) lineární nárůst teploty od 25 °C do 1000 °C při gradientu 5 °C/min; b) víceokrový teplotní program kombinující nárůst teploty a chlazení při různých teplotních gradientech a izotermální děje.

Výstupem analýzy je termogravimetrická křivka – TG křivka (viz obr. 33), která graficky znázorňuje sledovanou vlastnost – hmotnost jako funkci teploty $m=f(T)$, případně času $m=f(t)$. Standartně se TG křivka znázorňuje v procentech původní hmotnosti a vzhledem k teplotě [51].

Základem pro vyhodnocení je nalezení inflexního bodu křivky, respektive stanovení počátečního a koncového bodu.



Obr. 32 Metodika vyhodnocení TG křivky – podle [52].

Z TG křivky určíme [52]:

- A – počáteční bod – průsečík přímky počáteční hmotnosti a tečny TG křivky v místě nejvyššího gradientu;
- B – koncový bod – průsečík přímky konečné hmotnosti a tečny TG křivky v místě nejvyššího gradientu;
- C – středový bod – průsečík TG křivky se střední teplotou mezi body T_A a T_B .

Hmotnostní úbytek TG křivky je pak vypočítána dle vztahu [51] (3):

$$m = \frac{m_s - m_f}{m_s} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

kde: m_s [mg] – hmotnost v koncovém bodě B;
 m_f [mg] – hmotnost v počátečním bodě A.

Termínem „plato“ označujeme oblast termické stability testovaného vzorku, kdy se jeho hmotnost v závislosti na teplotě nemění. Oblast, ve které dochází ke změně hmotnosti je označována jako hmotnostní úbytek (nárůst).

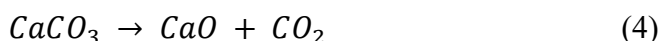
Hodnocení TG křivky umožňuje kvantitativní stanovení složek směsi, které mohou být rozlišeny na [52,53]:

- odpařitelné složky (převážně změkčovadla);
- pyrolyzovatelné složky (převážně polymery);
- oxidovatelné složky (převážně saze);
- neoxidovatelné složky, tzv. plniva (například křemičitany).

Popis křivky rozkladu materiálu BMC [3]:

- 0–200 °C – váhový úbytek těkavých složek materiálu, zejména vlhkost a zbytkový styren (nespotřebovaný pro síťování materiálu);
- 200–400 °C – rozklad polymerní, organické části materiálu (polymerní matrice);
- 600–800 °C – rozklad anorganického plniva: uhličitanu vápenatého (CaCO₃), který se projeví uvolněním oxidu uhličitého (CO₂);
- 800 °C – zbytek po spálení: oxid vápenatý (CaO) + skelné vlákno.

V případě BMC se termickým zahříváním v oblasti 600-800 °C uhličitan vápenatý (CaCO₃) rozkládá za vzniku oxidu vápenatého (CaO) a oxidu uhličitého (CO₂). Rozklad neboli kalcinace probíhá dle vztahu (4):



Výpočet procentuálního zastoupení se následně vypočítá dle znalosti molárních hmotností sloučenin v tab. 6.

Tab. 6 Molární hmotnosti sloučenin termického rozkladu TG zkoušky.

Sloučenina	Vzorec	Molární hmotnost [$g \cdot cm^{-3}$]
Oxid uhličitý	CO ₂	44,01
Oxid vápenatý	CaO	56,08
Uhličitan vápenatý	CaCO ₃	100,08

Zvláště je třeba poznamenat, že při odběru nebo přípravě vzorku je třeba zabránit jakékoli kontaminaci zkušebnímu kusu a jakémukoli zahřívání.

4.3 Testování světlometu

Prokazování a zaručení dostatečně robustnosti výrobku a schopnosti odolávat všem vlivům, které mohou v provozu nastat, je v dnešní době již samozřejmostí. V praxi se nejčastěji používají urychlené laboratorní zkoušky, z důvodu přijatelné časové a cenové náročnosti [54].

Základní oblasti testování světlometu pro zaručení požadavků mezinárodních norem či specifických automobilových koncernů obsahují zkoušky [7]:

- fotometrie;
- termální analýzy;
- měření rozměrů;
- klimatické;
- mechanické;
- chemické a materiálové;
- těsnosti;
- elektronických vlastností;
- tzv. “měření padání hranice světlo – tma”.

4.3.1 Klimatické zkoušky

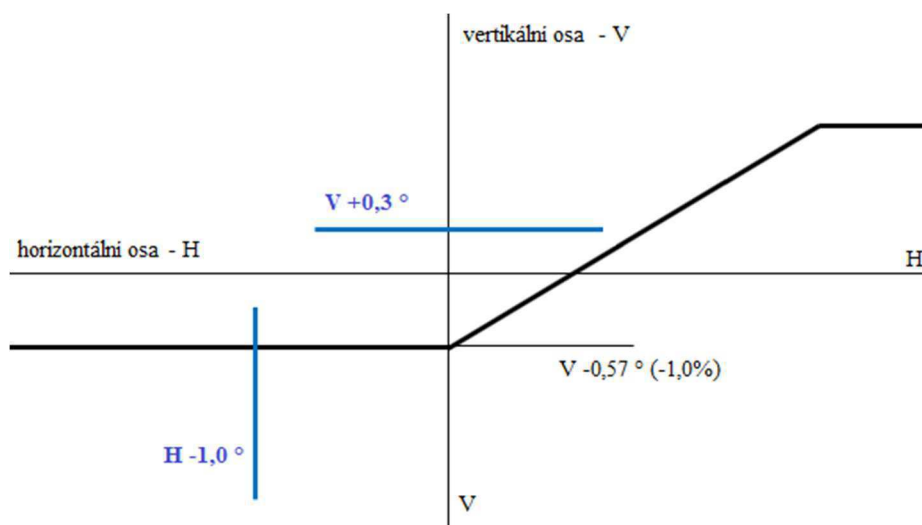
Pomocí zkoušek se změnami klimatických podmínek ("klimatickým stresem") se prokazuje odolnost světlometů a svítílen v laboratorních podmínkách vůči vlivům teploty a vlhkosti. Klimatické zkoušky mohou mít cyklický nebo konstantní průběh teplot a vlhkosti. Obvykle se jedná o dvě základní skupiny zkoušek, a to zkoušky založené na kondenzační atmosféře a zkoušky se solnou mlhou [54].

Klimatické komory mají obvykle následující dispozice [7]:

- teplotní rozsah komory -70 °C až $+180\text{ °C}$;
- relativní vlhkost: 10–100 %;
- rychlost teplotních změn 5-100 K/min (při velmi rychlých změnách teplot 100 K/min se jedná o teplotní šoky).

4.3.2 Fotometrické zkoušky

Zkouškami fotometrie se hodnotí stabilita svícení světlometu a jeho rozložení na vozovce před vozidlem (viz obr. 34). Konkrétní hodnoty jsou definovány mezinárodními zákonnými požadavky a mnohdy ještě přísněji specifikovány konkrétní automobilovou společností. Provedení fotometrických zkoušek ověřuje navržené simulace a deklaruje požadované parametry výrobku.



Obr. 33 Měření fotometrie – rozložení osvětlení na 10 m stěně pro potkávací světlo (pravosměrný provoz).

4.3.3 Vibrační zkoušky

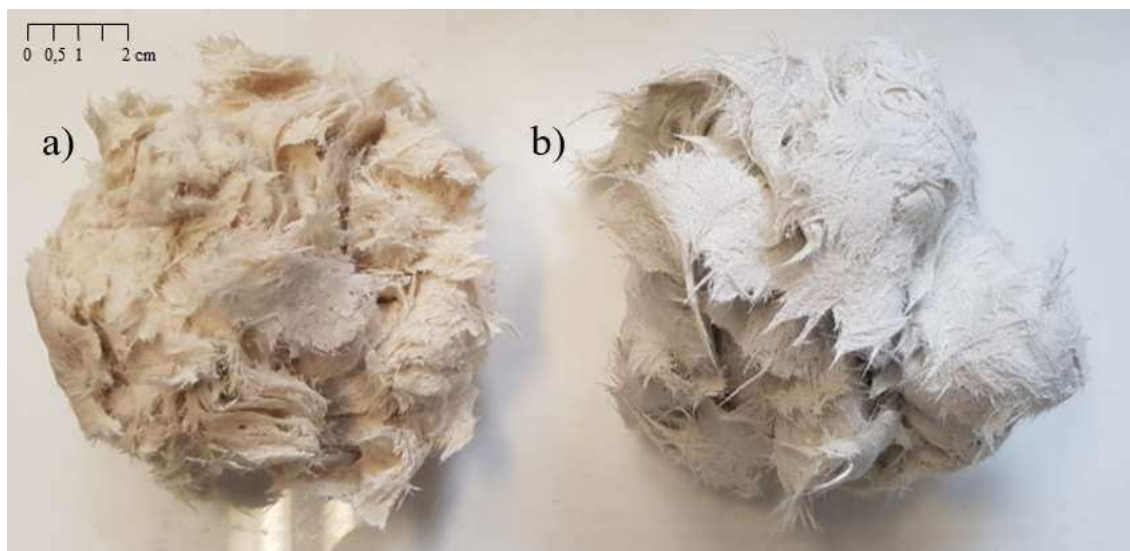
Důvodem provedení vibrační zkoušky je zaručení mechanické odolnosti světlometu a zajištění robustnosti světlometu v reálném provozu. Výsledky jsou nutné pro splnění homologací, případně pro rychlé ověření navrženého konceptu konstrukce.

Zkouškami mechanických šoků se hodnotí odolnost vůči různým druhům nárazů vznikajících při provozu automobilu (zavírání dveří, kapoty, přejíždění přes obrubník apod.)

- **PRAKTICKÁ ČÁST**

5 PROVEDENÍ ZKOUŠEK

Připravené směsi materiálů (viz obr. 35) jsou pro tuto studii dodány obchodní společností HELLA Autotechnik Mohelnice, s.r.o. Jedná se o standardní aktuálně používaný materiál BMC TETRADUR TD 492/2 dodavatele Tetra-DUR a nově vyvíjenou směs stejného typu BMC.



Obr. 34 Vzhled směsi BMC: a) materiál A – TETRADUR TD 492/2; b) alternativní materiál B.

Pro rozlišení materiálů je použito označení:

A – Aktuálně používaný materiál BMC TETRADUR TD 492/2 (označení A);

B – Alternativní materiál BMC (označení B);

C – Hodnoty materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 dle materiálového listu výrobce (označení C).

Naměřené hodnoty vzorků materiálů A i B budou srovnávány mezi sebou a tam kde je to možné a dostupné i s udávanými hodnotami výrobce dle materiálového listu BMC TETRADUR TD 492/2 [40]. Způsob přípravy vzorků A, B však není totožný s přípravou vzorků dle výrobce materiálu, a proto je srovnání s hodnotami „C“ pouze informativního charakteru. Hodnoty v materiálového listu výrobce jsou uvedeny bez odchylky a tolerance. Proto je jejich interpretace v grafech bez směrodatné odchylky. Pro interpretaci naměřených výsledků je použit aritmetický průměr jednotlivých měření a jejich směrodatná odchylka.

Vzorky před testováním byly kondicionovány standardními podmínkami, uvedenými v normě ČSN ISO 291 Plasty – Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení [55] (na kterou se odkazují jednotlivé zkoušky): 24 hodin před zkouškou při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 %.

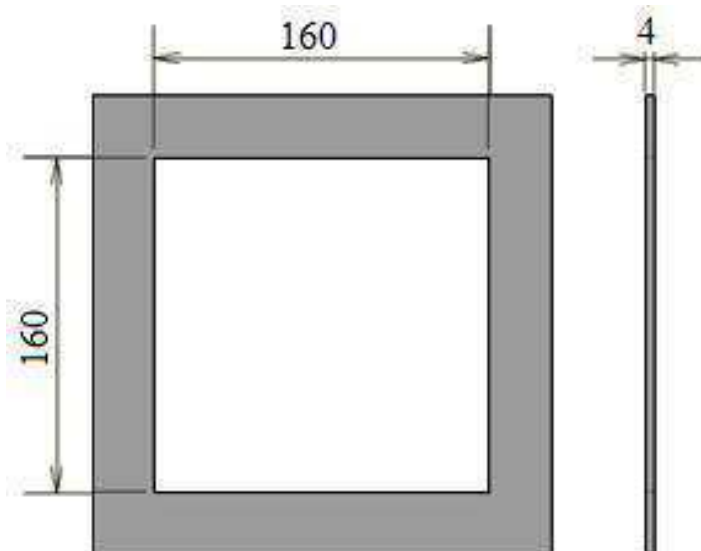
Praktická část práce je členěna do následujících celků.

- V první části této kapitoly (podkapitoly 5.2 až 5.5) jsou prováděny materiálové zkoušky na speciálně vyrobených zkušebních tělesech odpovídajících normám pro jednotlivé zkoušky.
- V další části (hustota, adheze a termogravimetrie) jsou zkoušky prováděny na reálných dílech vyrobených vstřikováním při sériovém procesu na vstřikovacích lisech.
- Poslední podkapitola (testování světlometu) se věnuje zkušebním kvalifikačním pokovených reflektorů, nosných rámců a světlometů dle interních a zákaznických požadavků. Do světlometu automobilu je zasazen díl (reflektor a nosný rám modulu) z alternativního materiálu a zkompletován na montážní lince. Díly jsou zpracovány na sériových vstřikovacích lisech při standardních podmínkách. Jedná se o zkoušku klimatické odolnosti, fotometrie a vibrační zkoušku.

Materiál A již několik let splňuje požadavky, které jsou na něj kladeny a všechny jeho vlastnosti spolu se zákaznickými požadavky jsou již otestovány. Některé zkoušky tedy budou prováděny pouze na novém materiálu. U těch zkoušek, kde lze věrohodně porovnat výsledky budou srovnány tyto 2 materiály.

5.1 Příprava zkušebních těles

Směsi obou materiálů (A, B) byly zpracovány lisováním na průmyslovém hydraulickém lisu. Dle normy *ISO 295 Plasty – Lisování zkušebních těles z termosetických materiálů*, je doporučena tloušťka destičky 4 mm [5]. Z toho důvodu byla zvolena forma (distanční rámeček – viz obr. 36) stejné tloušťky a celkovými rozměry 160x160x4 mm. Destičky byly zpracovány v počtu 6 kusů od každého materiálu.



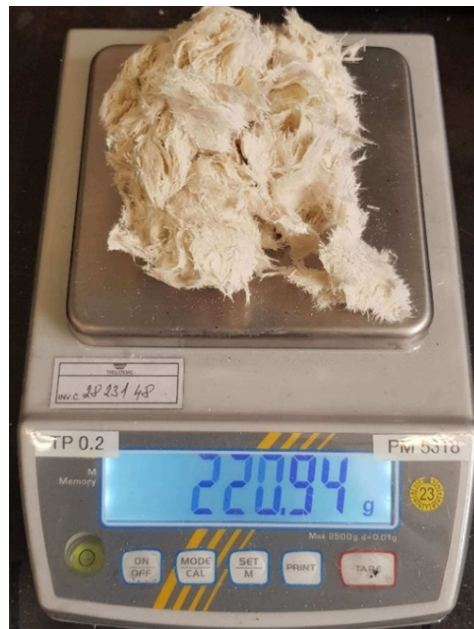
Obr. 35 Lisovací forma.

Dle rozměrů formy a hustoty materiálu bylo určeno množství dávky směsi a přidáno okolo 15 % na přetoky. Pro hustotu materiálu byl použit aritmetický průměr z výsledků měření hustoty obou materiálů (viz podkapitola 5.6. *Zkouška hustoty*), $\rho = 1,87 [g \cdot cm^{-3}]$. Hmotnost dávky se pak vypočítala dle vztahu (5):

$$m_{dávky} = \rho \cdot V \cdot 1,15 [g] \quad (5)$$

$$m_{dávky} \cong 220 [g] \quad (6)$$

kde: ρ $[g \cdot cm^{-3}]$ – hustota;
 V $[mm^3]$ – objem;
 k $[-]$ – konstanta přídatku materiálu na přetoky ($k = 1,15$);



Obr. 36 Navážka materiálu dle vypočítané hmotnosti dávky.

Vzorek materiálu se odvážil na laboratorních vahách (viz obr. 37) a poté byl vložen na kovové desky lisu s distančním rámečkem, vymežujícím tvar zkušební destičky. Z důvodu zaručení čistoty povrchu destiček a zamezení lepení na kovový rámeček a desky lisu byl materiál vypodložen separační PET fólií.

Schéma lisování tedy vypadalo následovně:

- 1) Lisovací deska
- 2) Forma (distanční rámeček 160x160x4mm)
- 3) PET fólie
- 4) Směs BMC
- 5) PET fólie
- 6) Lisovací deska



Obr. 37 Průmyslový lis pro přípravu destiček.

Parametry lisování jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Parametry lisování .

Rozměry lisovací formy	160x160x4 mm
Navážka směsi	220 g
Doba lisování	3 min
Teplota lisování	150 °C
Tlak lisování	20 MPa

Zejména tlak lisování se ukázal jako velmi důležitý faktor při zpracování lisování. Prvotní vzorky zkoušky lisování na laboratorním hydraulickém lisu (který vyvinul maximální tlak 6,5 MPa) vykazovaly velmi nehomogenní povrchovou strukturu. Vlivem nedostatečného tlaku se nevytlačily na povrch potřebné složky materiálu a zůstaly tak zakonzervovány uvnitř struktury.

Vhodně vylisované destičky na průmyslovém lisu (viz obr. 38) dle parametrů lisování (viz tab. 7) jsou zobrazeny na obr. 39. Povrch destiček je celistvý, hladký a homogenní. Podmínky pro lisování obou směsí byly stejné a pro každé lisování byly použity nové PET fólie. Ačkoliv byla použita forma pro lisování o tloušťce 4 mm, výsledná tloušťka vylisovaných destiček byla 4,2 mm. Rozdíl vysvětluje fakt, že přídavek materiálu (který je nutný na úplné vyplnění formy při lisování) tvořil mírné přetoky.



Obr. 38 Vhodně vylisované destičky:

a) materiál A – TETRADUR TD 492/2; b) B – alternativní materiál.

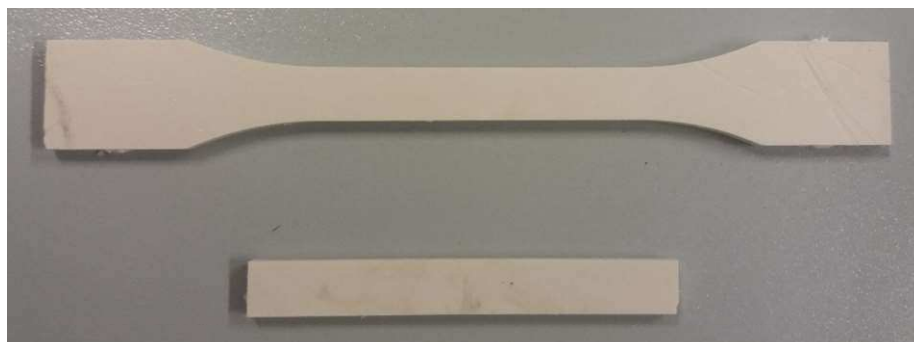
5.1.1 Tvar a rozměry zkušebních těles

Zkušební tělíska pro materiálové zkoušky byla vyrobena z odlisovaných destiček s rozměry dle norem [45,47,48,49] pro jednotlivé zkoušky (rozměry zobrazeny v tab. 8). Zpracování destiček na jednotlivá zkušební tělíska bylo provedeno frézováním na CNC.

Tab. 8 Rozměry zkušebních těles pro mechanické zkoušky a použité normy.

Typ zkoušky	Jednotky	Rozměry	Normy
Stanovení tahových vlastností – typ 1B	[mm]	160x20	ČSN EN ISO 179-1
Stanovení ohybových vlastností	[mm]	80x10	ČSN EN ISO 178
Stanovení rázové houževnatosti met. Charpy	[mm]	80x10	ČSN EN ISO 527-1
Stanovení tvrdosti metodou vtlačení kuličky	[mm]	20x20	ČSN EN ISO 2039-1

Pro každou zkoušku bylo vyrobeno 10 kusů zkušebních vzorků, a navíc několik kusů z každého druhu pro nastavení parametrů metody (například u zkoušky rázové houževnatosti nutné 2 vzorky na „slepý pokus“ pro zvolení vhodného kladívka). Připravené zkušební vzorky jsou zobrazeny na obr. 40.



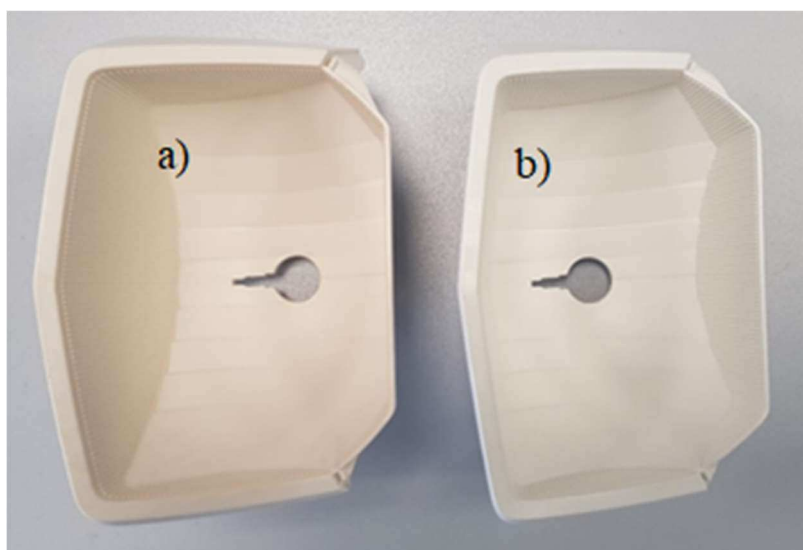
Obr. 39 Vzorky pro mechanické zkoušky.

5.1.2 Testované díly světlometu

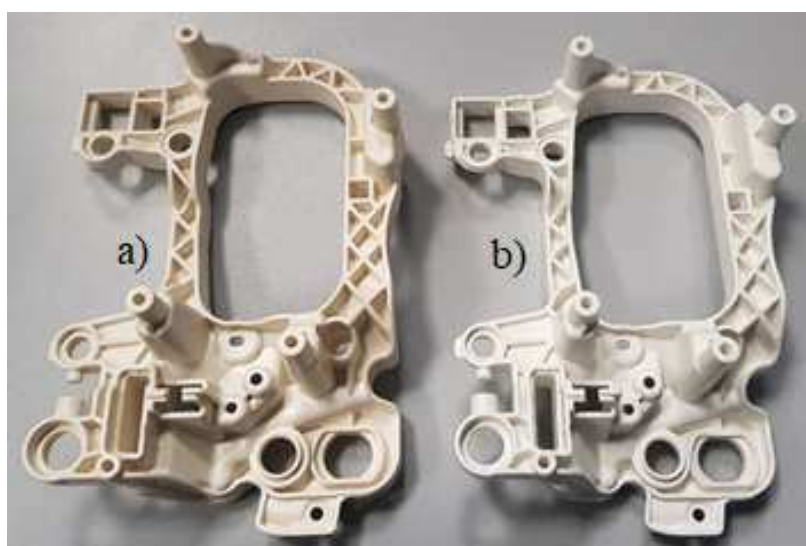
Pro využití ve světlometu automobilu se materiály BMC používají jako:

- reflektory;
- nosné rámy optických modulů.

Z tohoto důvodu byly vybrány vhodné „velko-rozměrové“ díly, u kterých by byla lepší viditelnost případných změn. Díly pro zkoušky byly zpracovány na hydraulickém vstřikovacím lisu Krauss Maffei KM 200-2000 CX POL v sériových formách za standardních podmínek. Reflektory a nosné rámy jsou zobrazeny na obr. 41 a obr 42.



Obr. 40 Testované reflektory světlometu: a) materiál A – TETRADUR TD 492/2; b) alternativní materiál – B.



Obr. 41 Testované nosné rámy světelného modulu světlometu: a) materiál A – TETRADUR TD 492/2; b) B – alternativní materiál.

5.2 Tahová zkouška

Provedení tahové zkoušky se zakládá na normě *ČSN EN ISO 527-1 Plasty – Stanovení tahových vlastností – Části 1: Obecné zásady*. Princip zkoušky spočívá v natahování vzorku podél jeho hlavní podélné osy konstantní rychlostí do okamžiku přetržení anebo předem stanovené deformace/napětí [45].

V případě termosetických (kompozitních) materiálů, mezi které patří testované BMC, se stanovuje mez pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu, případně napětí při přetržení. Další hodnoty napětí a jednotlivých prodloužení na specifických mezích (mez kluzu, mez pevnosti v tahu a při přetržení), které se běžně vyhodnocují z tahové zkoušky pro termoplastické materiály, nemají u termosetů význam. Prostorové zesílení řetězců totiž neumožňuje významnější deformaci materiálu [1]. Například hodnota napětí na mezi v kluzu v tahu pro měřené materiály (A, B) typu BMC byla totožná s hodnotou napětí na mezi pevnosti v tahu.

Závislost napětí na poměrném prodloužení ($\sigma - \varepsilon$) pro vykreslení deformační křivky [45] se vypočítá dle základních vztahů (7 a 8):

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [mm]} \quad (8)$$

kde:	σ	[MPa]	–	tahové napětí;
	ε	[mm]	–	poměrné prodloužení;
	F	[N]	–	velikost působící síly;
	S_0	[mm ²]	–	počáteční průřez zkušebního tělesa;
	L_0	[mm]	–	počáteční měřená délka zkušebního tělesa.

Tab. 9 Podmínky testování při tahové zkoušce.

Zkušební norma	ČSN EN ISO 527-1 (527-2): 2012
Zkušební zařízení	Univerzální zkušební stroj Istron 3369
Typ indikátoru prodloužení	Kontaktní, 50 mm
Typ upínacího zařízení	Manuální čelist, 50 kN
Typ talkového snímače	Dynamometr, 50 kN
Upínací vzdálenost mezi čelistmi	115 mm
Rychlost zkoušení	2 mm/min
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 23,4 °C; vlhkost 48,9 %
Testovací vzorky (počet, rozměr)	10 ks, (typ 1B) 160x20x4,2 mm

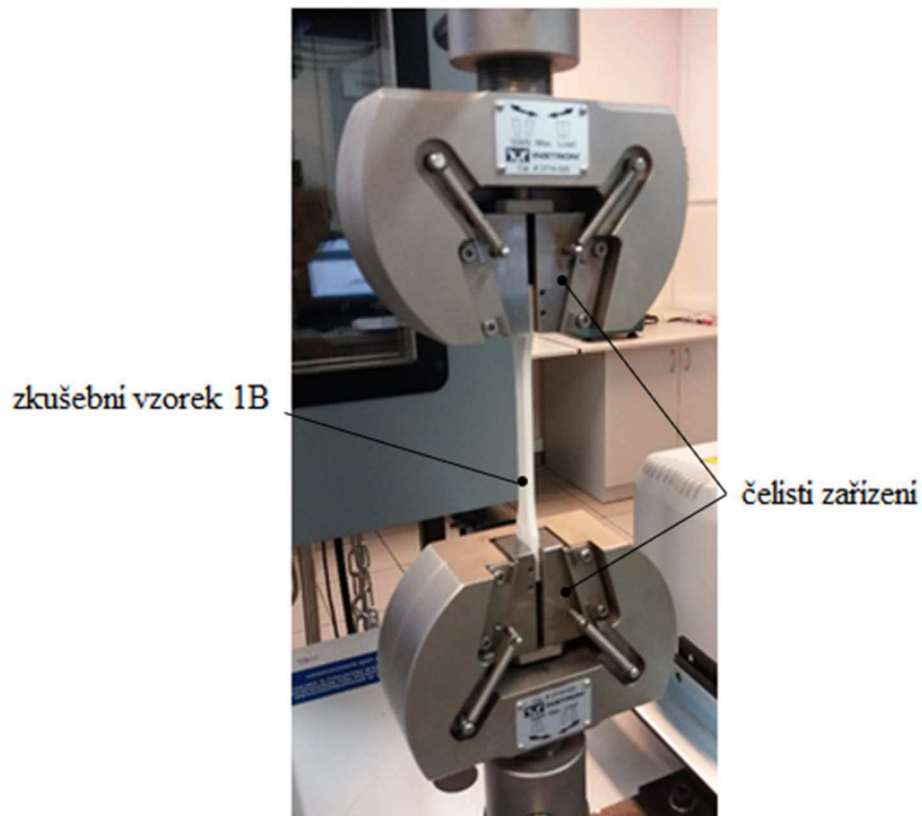
Postup:

Před vlastním provedením zkoušky byla proměřena všechna zkušební tělesa pro ověření, zda jsou v limitních tolerancích a zajištění správnosti budoucích výsledků (viz tab. 9 a tab. 10).

Tab. 10 Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku.

Rozměr	Jednotka	Požadovaná hodnota	Min	Max	Aritmetický průměr
Šířka pracovní části tělesa	[mm]	10±0,2	9,99	10,17	10,08
Tloušťka pracovní části tělesa	[mm]	4,2±0,2	4,11	4,2	4,16

Zkušební vzorek byl umístěn a upnut do čelistí zkušebního zařízení tak, aby byla podélná osa zkušebního vzorku totožná s osou zkušebního stroje (viz obr. 43). Po upnutí a vyrovnaní předpětí se nastavil kontaktní indikátor prodloužení na počáteční měřenou délku. V průběhu zkoušky byla zaznamenávána hodnota tahové síly a jí odpovídající velikost prodloužení. Pro záznam a vykreslení kompletní křivky závislosti napětí na poměrném prodloužení ($\sigma - \varepsilon$) byl použitý automatický systém. Vyhodnocován byl modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a napětí při přetržení.



Obr. 42 . Uchycení zkušebního vzorku při tahové zkoušce.

Výsledek:

Výsledky tahové zkoušky jsou zobrazeny v tab. 11-13.

Tab. 11 Modul pružnost v tahu.

Číslo měření	A	B
	[MPa]	
1	10675	11122
2	12185	11232
3	12354	11006
4	13035	11637
5	12488	11253
Aritmetický průměr	12147	11250
Směrodatná odchylka	883	238

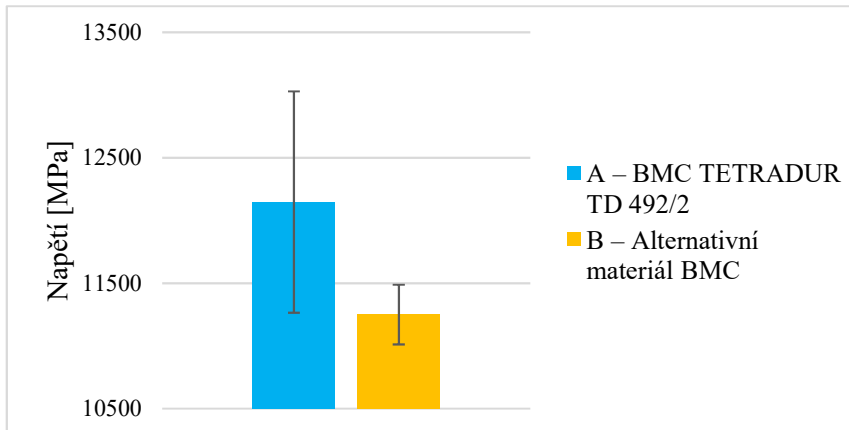
Tab. 12 Mez pevnosti v tahu.

Číslo měření	A	B
	[MPa]	
1	30,4	38,2
2	39,7	31,4
3	35,5	36,8
4	44,4	31,8
5	35,5	34,3
Aritmetický průměr	37,1	34,5
Směrodatná odchylka	5,3	3,0

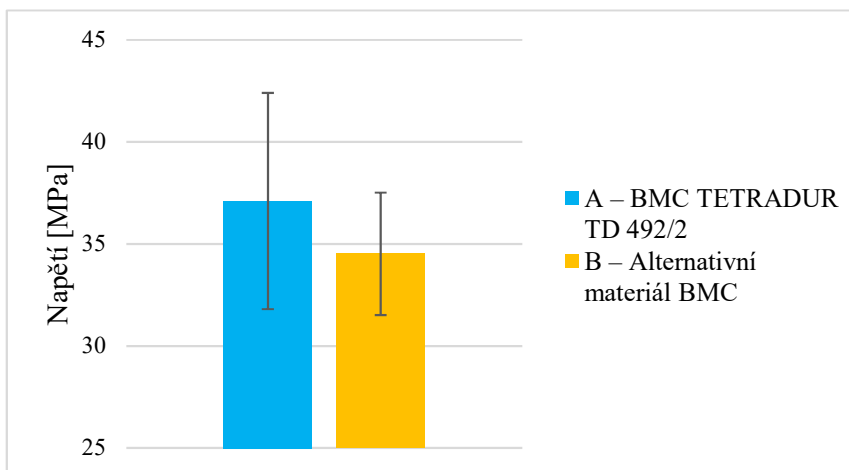
Tab. 13 Napětí při přetržení.

Číslo měření	A	B
	[MPa]	
1	23,9	30,9
2	32,4	19,5
3	30,2	27,8
4	41,5	28,5
5	29,5	27,9
Aritmetický průměr	31,5	26,9
Směrodatná odchylka	6,4	4,3

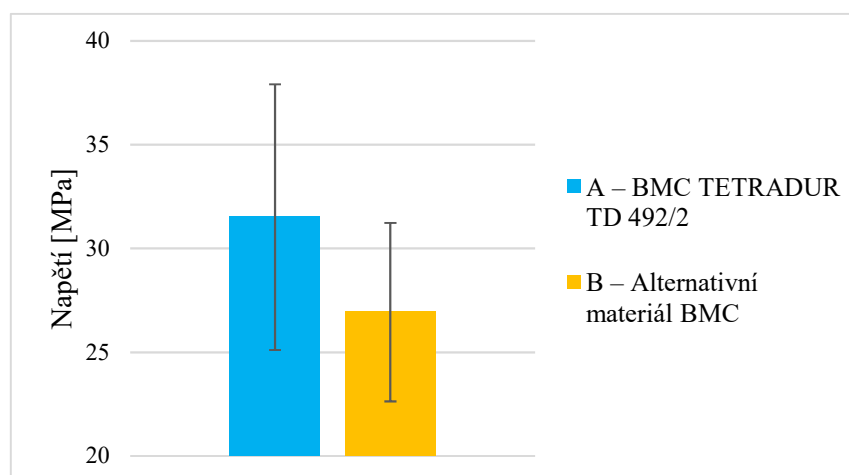
Vyhodnocení:



Obr. 43 Modul pružnosti v tahu.

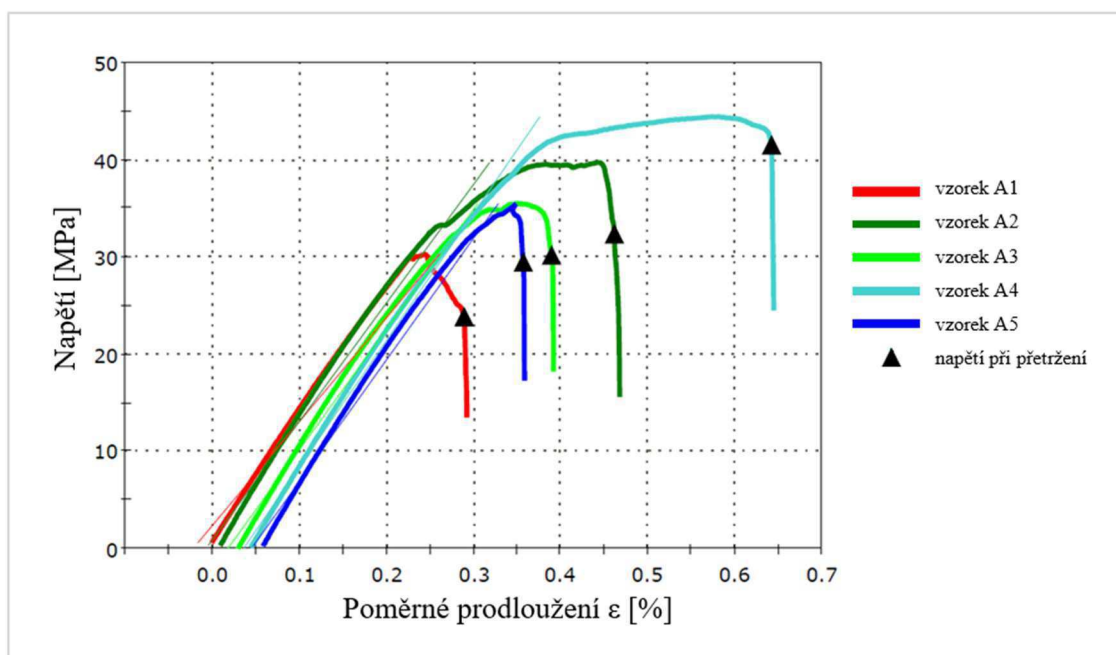


Obr. 44 Mez pevnosti v tahu.

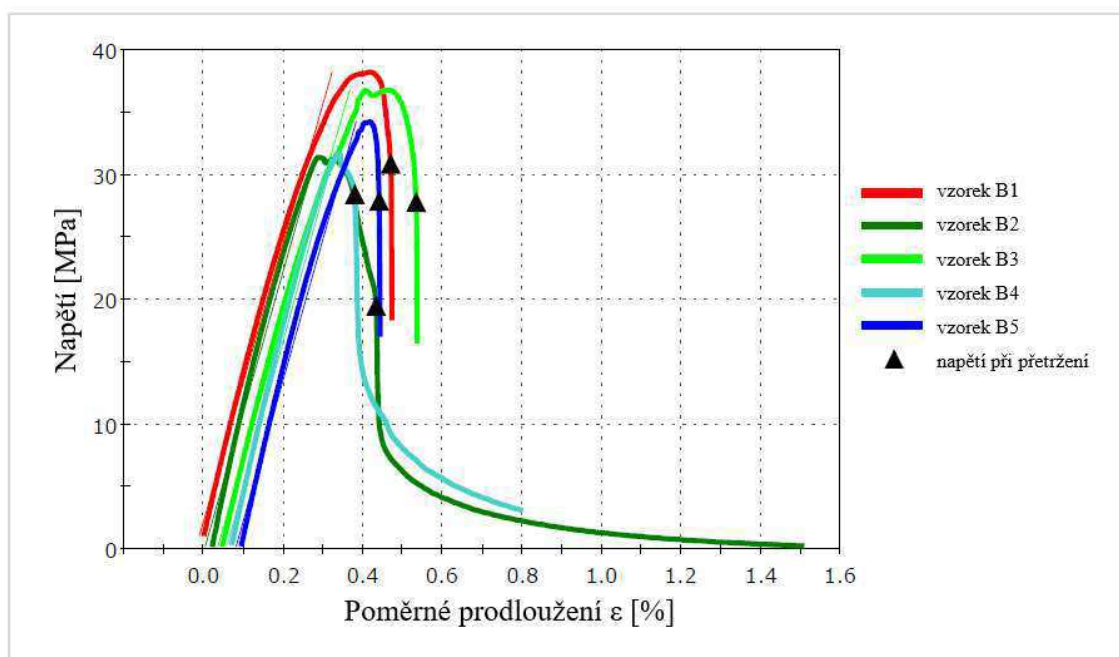


Obr. 45 Napětí při přetržení.

Grafické vyhodnocení specifických hodnot napětí z tahové zkoušky je zobrazeno obr. 44-46. Tahové deformační křivky, zaznamenané automatickým přístrojem, jsou zobrazeny na obr. 47 a obr. 48.



Obr. 46 Deformační tahová křivka současného materiálu A.



Obr. 47 Deformační tahová křivka alternativního materiálu B.

Po změření tahové zkoušky vyplynulo, že modul pružnosti v tahu materiálu A je 12147,4 MPa a materiálu B 11250,0 MPa. Výsledek odpovídá o 7,41 % vyšší hodnotě materiálu A než u materiálu B. Při stejném napětí tedy dosahuje materiál A nižší deformace.

Mez pevnosti v tahu určuje bod na tahové křivce, kdy má materiál nejvyšší pevnost. Po jejím překročení nastává porušení soudržnosti. K destrukci materiálu dochází pro materiál A na 37,1 MPa a pro materiál B na 34,5 MPa. Napětí na mezi pevnosti v tahu je o 7 % vyšší u materiálu A.

Napětí při přetržení materiálu A je 31,5 MPa, což odpovídá o 14,5 % nižší hodnotě nižší než u materiálu B, který dosahuje hodnoty 26,9 MPa. Pro materiál BMC se nejedná o směrodatnou hodnotu, neboť destrukce materiálu nastala již na mezi pevnosti v tahu porušením matrice. Hodnota napětí v tahu tedy odpovídá přetržení natahované výztuže – skelných vláken.

Z výsledků zkoušek – modulu pružnosti v tahu, mezi pevnosti v tahu a napětí při přetržení – vyplývá, že materiál A je, ve srovnání s materiálem B, pevnější a k jeho zdeformování musíme vyvinout vyšší tahovou sílu. Zároveň však lze tvrdit, že nemá natolik houževnaté chování jako materiál B, a tudíž je rigidnější (křehčí).

5.3 Ohybová zkouška

Stanovení ohybových vlastností materiálů BMC bylo provedeno dle normy *ČSN EN ISO 178 Plasty – Stanovení ohybových vlastností*, která specifikuje metodu zkoušení pro tuhé a polotuhé plasty a také termosety. Zkouška se používá ke zkoumání chování zkušebních těles při ohybovém zatížení a ke stanovení vlastností jako je pevnost v ohybu, modul pružnosti a dalších napětíových charakteristik. Dle normy [47] metoda není vhodná pro stanovení konstrukčních parametrů, ale může být použita při testování/srovnání materiálů a jako kontrola kvality.

Podstatou zkoušky je vychýlení zkušební vzorku, umístěného na 2 podpěrách, prostřednictvím zatěžovací "hrany" působící na vzorek uprostřed mezi podpěrami.

Ohybové napětí σ_y je definováno v literatuře [46,47] jako poměr ohybového momentu M_0 a průřezového modulu W a vypočítá se dle vztahu (9):

$$\sigma_y = \frac{M_0}{W} [MPa] \quad (9)$$

kde: M_0 [MPa] – ohybový moment;
 W [mm²] – modul průřezu zkušební vzorku.

Tab. 14 Podmínky testování při ohybové zkoušce.

Zkušební norma	ČSN EN ISO 178: 2011
Zkušební zařízení	Univerzální zkušební stroj Istron 3369
Typ indikátoru prodloužení	Bez průtahoměru
Typ upínacího zařízení	Příslušenství pro tříbodový ohyb
Upínací vzdálenost mezi čelistmi	64 mm
Rychlost zkoušení	2 mm/min
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 23,4 °C; vlhkost 48,7 %
Testovací vzorky (počet, rozměr)	10 ks, 80x10x4,2 mm

Postup:

Před vlastní zkouškou byla změřena šířka a tloušťka vzorků, přičemž všechny náměry musely být splněny s přesností 0,2 mm (viz tab. 14 a tab. 15).

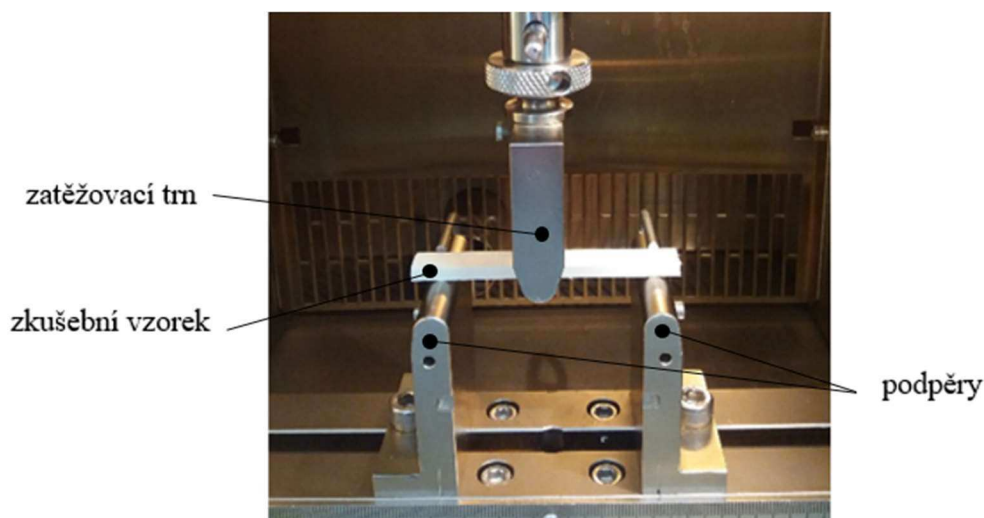
Tab. 15 Rozměry zkušebních těles pro ohybovou zkoušku.

Rozměr	Jednotka	Požadovaná hodnota	Min	Max	Aritmetický průměr
Šířka pracovní části tělesa	[mm]	10±0,2	10,01	10,03	10,02
Tloušťka pracovní části tělesa	[mm]	4,2±0,2	4,15	4,37	4,26

Rozteč podpěr byl upraven tak, aby odpovídala normě [47] dle vztahu (10):

$$L = (16 \pm 1)h \text{ [mm]} \quad (10)$$

Zkušební vzorek byl umístěn do středu podpěr testovacího zařízení (viz obr. 49). Následně bylo aplikováno zatížení do středu vzorku s konstantní rychlostí ($2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). V průběhu zkoušky byla zaznamenávána působící síla automatickým záznamovým zařízením v závislosti na průhybu zkušebního vzorku. Vyhodnocováno bylo maximální ohybové napětí (mez pevnosti v ohybu), modul pružnosti v ohybu a napětí v ohybu v okamžiku lomu.



Obr. 48 Zkušební vzorek při ohybové zkoušce.

Výsledek:

Výsledky ohybové zkoušky jsou zobrazeny v tab. 16-18.

Tab. 16 Modul pružnosti v ohybu.

Číslo měření	A	B
	[MPa]	
1	14742	12084
2	13948	12561
3	14058	12177
4	14322	11720
5	14119	12188
Aritmetický průměr	14238	12146
Směrodatná odchylka	313	300

Tab. 17 Mez pevnosti v ohybu.

Číslo měření	A	B
	[MPa]	
1	109,4	86,3
2	96,3	86,8
3	93,4	68,6
4	88,4	94,4
5	92,6	73,3
Aritmetický průměr	96,0	81,9
Směrodatná odchylka	8,0	10,6

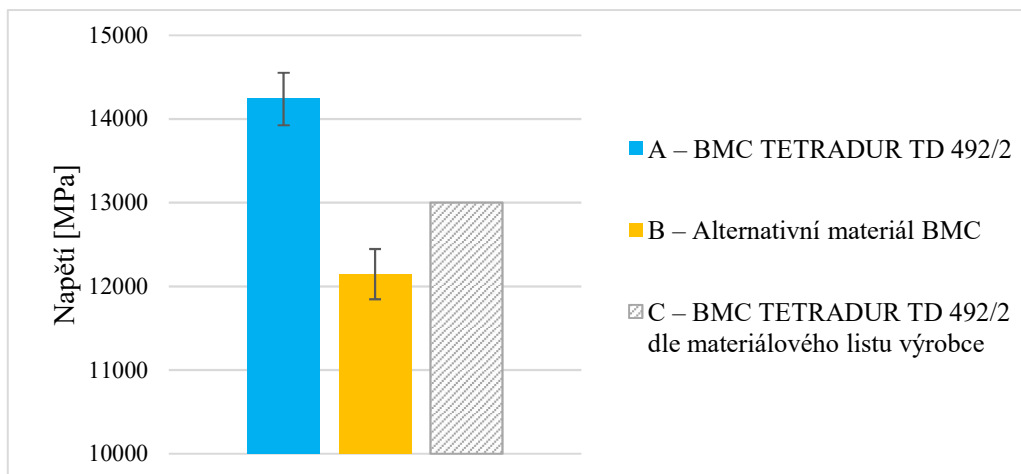
Tab. 18 Napětí v ohybu v okamžiku lomu.

Číslo měření	A	B
	[MPa]	
1	108,7	84,0
2	82,0	76,8
3	88,8	63,1
4	79,9	76,5
5	80,7	65,9
Aritmetický průměr	88,0	73,3
Směrodatná odchylka	12,1	8,6

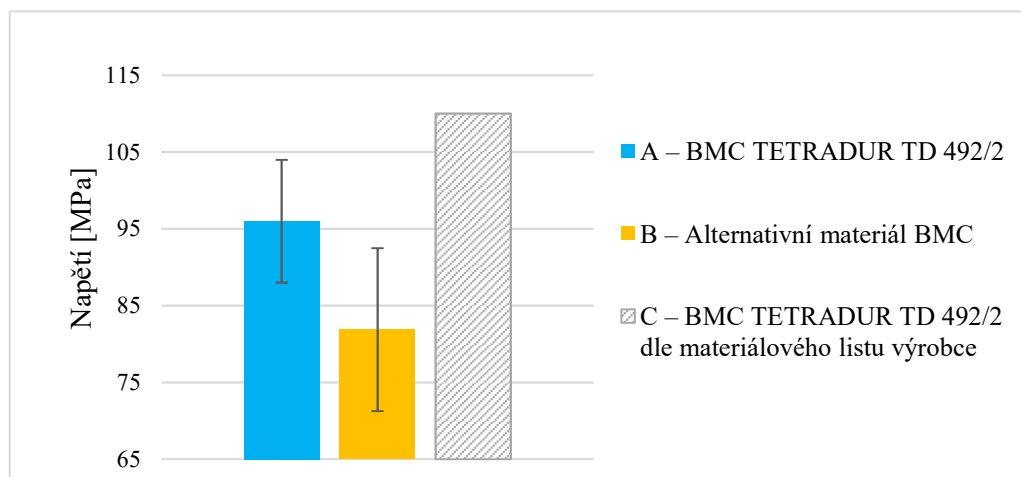
C – dle hodnot modulu pružnosti a mezi pevnosti v ohybu z technického listu materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 [40], uváděných výrobcem.

Vyhodnocení:

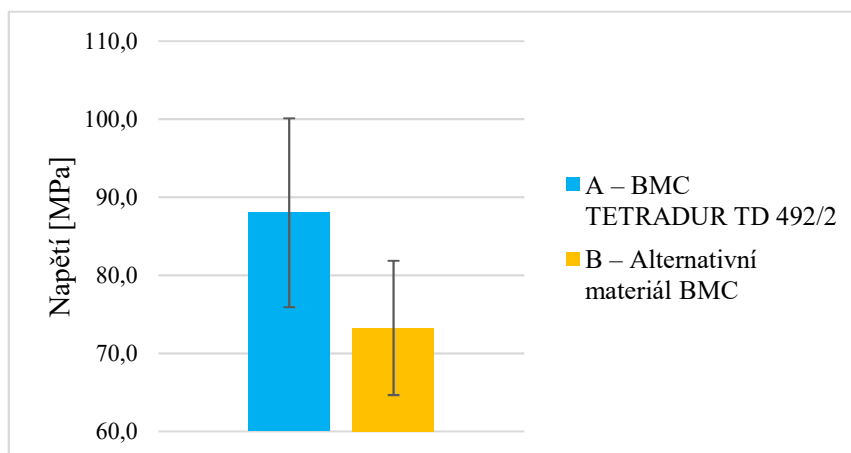
Graf. zobrazení specifických hodnot napětí z ohybové zkoušky je zobrazeno obr. 50-52.



Obr. 49 Modul pružnosti v ohybu.



Obr. 50 Mez pevnosti v ohybu.



Obr. 51 Napětí v ohybu v okamžiku lomu.

Modul pružnosti v ohybu, který vyjadřuje míru napětí potřebnou k dosažení určité deformace, je u materiálu A 14237,8 MPa a u materiálu B 12146,0 MPa. Materiál A tedy vykazuje o 14,7 % vyšší hodnotu modulu pružnosti v ohybu. Pro srovnání – teoretická hodnota modulu pružnosti v ohybu materiálu TETRADUR TD 492/2 je 13000 MPa.

Mez pevnosti v ohybu udává napětí v okamžiku destrukce matrice. Hodnota 96,0 MPa pro materiál A je o 14,7 % vyšší než hodnota materiálu B 81,9 MPa. Pro srovnání – dle materiálového listu výrobce materiál TETRADUR TD 492/2 dosahuje mezi pevnosti v ohybu 110 MPa.

Napětí v ohybu v okamžiku lomu materiálu A je 88,0 MPa, což odpovídá o 16,8 % vyšší hodnotě než u materiálu B 73,3 MPa. Opět se (stejně jako u tahové zkoušky) nejedná o směrodatnou hodnotu, neboť napětí v ohybu v okamžiku lomu udává napětí již porušeného kompozitního materiálu – po destrukci na mezi pevnosti.

Výsledky ohybové zkoušky – modul pružnosti, mez pevnosti a napětí v okamžiku lomu v ohybu – dokazují, že materiál A je, ve srovnání s materiálem B, pevnější vůči ohybovému napětí a odolává tak vyšší ohybové deformaci.

5.4 Zkouška rázové houževnatosti

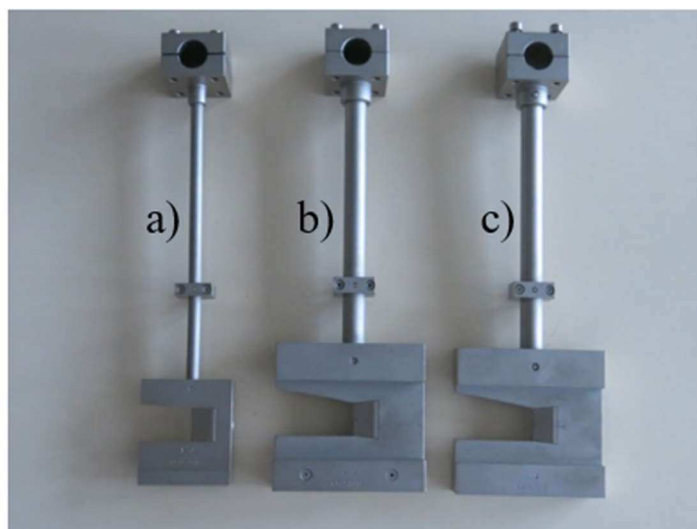
Stanovení houževnatosti termosetických vláknů vyztužených kompozitních hmot se zakládá na normě ČSN EN ISO 179-1 *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Ne-instrumentovaná rázová zkouška*. V případě kompozitních materiálů vyztužených dlouhými vlákny se užívají zkušební vzorky bez vrubu [48].

Podstata zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy spočívá v přeražení zkušební vzorku jedním úderem kladiva, a to v místě středového bodu mezi podpěrami zkušebního zařízení, na kterém je usazen zkušební vzorek. Princip stanovení obnáší stanovení velikosti nárazové práce, která se spotřebuje během iniciace a šíření trhliny do lomu [42].

Rázová houževnatost metodou Charpy a_{cU} popisuje energii nutnou k přeražení zkušební vzorku vztaženou na jeho průřez [22,48] a vypočítá se dle vztahu (11):

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hb} \cdot 10^3 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (11)$$

kde: E_c [J] – energie absorbovaná při přeražení zkušební vzorku;
 h [mm] – tloušťka zkušební vzorku;
 b [mm] – šířka zkušební vzorku;

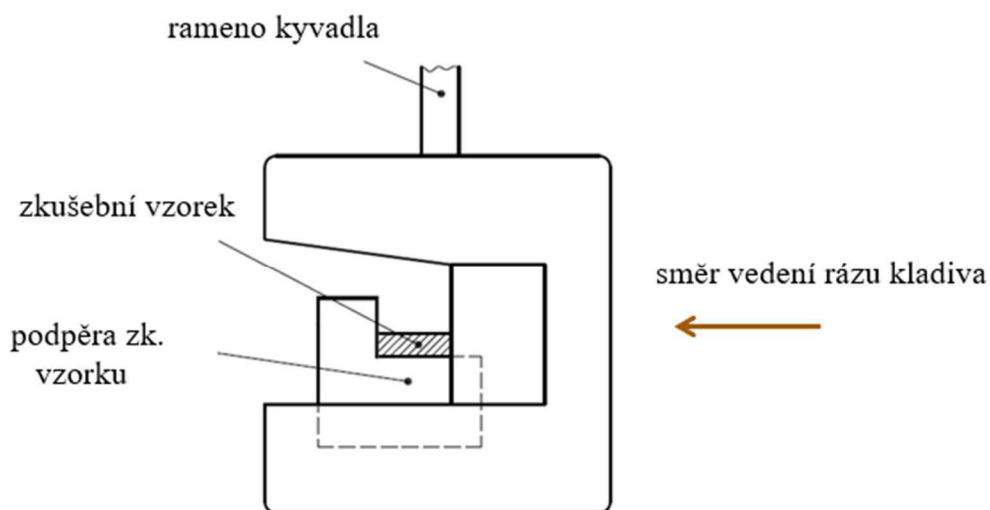


Obr. 52 Sada kladívek pro zkoušku rázové houževnatosti polymerů metodou Charpy [3].

a) 1 J, b) 2 J, c) 4 J.

Testovací přístroj se skládá z podpěry, na kterou je uloženo zkušební těleso, a pohyblivého kyvadla s břitem (Charpyho kladivo – znázorněno obr. 53), které slouží jako nosič energie. Pracovní energie (uvedená na kladivu v jednotkách joulů) je daná hmotností a potenciální energií kladiva, která je při uvolnění během volného pádu převedena na kinetickou energii. Pro zkoušení polymerů dostačují obvykle kladiva menších hmotností – energií, řádově v jednotkách joulů [43].

Směr vedení rázu kladiva byl zvolen na základně doporučení normy [48] – typu boční náraz (hrana kladiva dopadající na užší stranu hranolu – viz obr. 54).



Obr. 53 Schematicky znázorněný boční ráz Charpyho kladiva – podle [48].

1 – směr nárazu; 2 – rameno kyvadla; 3 – zkušební vzorek; 4 – vrub (pouze při zkoušce vrubové rázové houževnatosti); 5 – podpěra zkušební tělesa.

Tab. 19 Podmínky testování při zkoušce rázové houževnatosti.

Zkušební norma	ČSN EN ISO 179-1: 2010
Zkušební zařízení	Impactor II (Ceast)
Vzdálenost opěr	62 mm
Energie kladiva	4 J
Rázová rychlost	2,9 m/s
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 24 °C; vlhkost 48,6 %
Testovací vzorky (počet, rozměr)	10 ks, 80x10x4,2 mm

Postup:

Před vlastní zkouškou byly změřeny rozměry vzorků (tloušťka h , šířka b) a vzdálenost rozpětí podpěr, na kterých byl ustaven zkušební vzorek (viz tab. 19). Tzv. „slepým pokusem“ byly vyzkoušeny různé typy nárazových nástrojů (Charpyho kladívek) tak, aby absorbovaná energie při přeražení byla v rozmezí 10 až 80 % dostupné energie při nárazu, přičemž při shodě více kladívek je použito to s nejvyšší energií. Pro náš případ testování bylo v souladu s výše uvedeným vybráno kladívko typu 4 J.

Kladívko bylo zvednuto do předepsané výšky a podepřeno a zkušební vzorek umístěn na podpěry zkušebního zařízení (viz obr. 55) tak, aby hrana kladívka zasáhla střed vzorku. Uvolněním kyvadla došlo k přeražení vzorku (typ C – úplné rozdělení na 2 kusy) a zaznamenání rázové energie absorbované vzorkem při jeho přeražení.



Obr. 54 Uložení zkušebního tělesa na podpěrách při rázové zkoušce metodou Charpy.

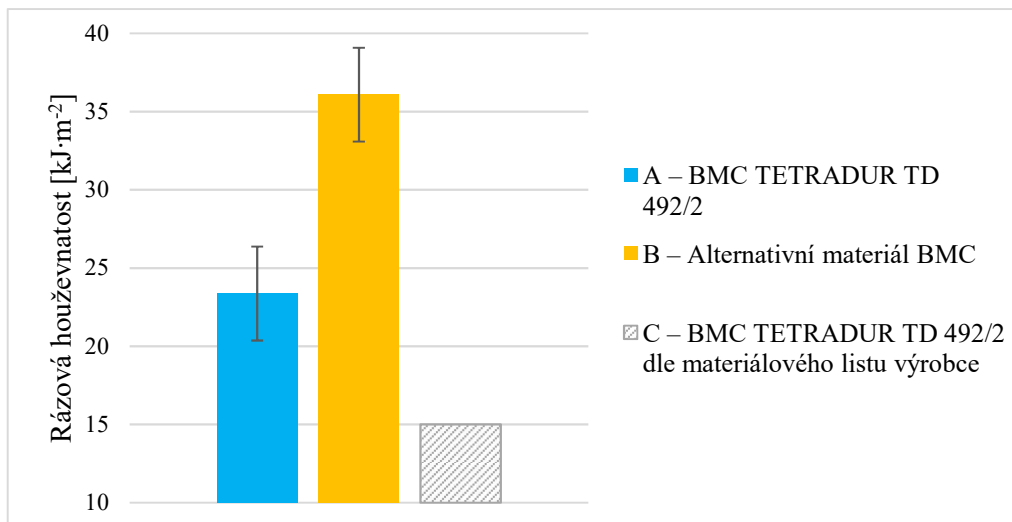
Výsledek testu:

Tab. 20 Rázová houževnatost metodou Charpy.

Číslo měření	A	B
	[kJ·m ⁻²]	
1	25,3	30,9
2	21,9	32,7
3	21,9	36,8
4	23,3	34,4
5	22,2	33,1
6	31,1	32,1
7	20,5	34,3
8	23,5	38,7
9	22,5	39,1
10	21,5	48,8
Aritmetický průměr	23,4	36,1
Směrodatná odchylka	3,0	3,0

C – dle hodnoty rázové houževnatosti z technického listu materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 [40], uváděné výrobcem. Výsledek měření rázové houževnatosti metodou Charpy zobrazuje tab. 20 a jeho grafické znázornění obr. 56.

Vyhodnocení:



Obr. 55 Rázová houževnatost metodou Charpy.

Parametr rázové houževnatosti materiálu je zásadní v případě automobilu, respektive světlometu, kvůli rázům (vibracím) způsobených nerovnostmi vozovky při jízdě. Dle naměřených hodnot je hodnota rázové houževnatosti materiálu A 23,4 kJ·m⁻² a materiálu B 36,1 kJ·m⁻². Alternativní materiál typu B dosahuje o 54,4 % vyšší hodnotu rázové houževnatosti, což znamená výrazně vyšší míru schopnosti absorbovat rázy a odolávat mikrotrhlinám. Pro srovnání – dle materiálového listu výrobce je hodnota materiálu TETRADUR TD 492/2 15 kJ·m⁻².

5.5 Zkouška tvrdosti

Stanovení tvrdosti polymerních a kompozitních materiálů se zakládá na normě ČSN EN ISO 2039-1 *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtlačení kuličky* [49], která specifikuje metodu testování pomocí vtlačování kulového profilu („*indentoru*“).

Zkouška tvrdosti spočívá ve vtlačování kuličkového profilu definovanou silou do povrchu testovacího vzorku. Hloubka otisku se měří při zatížení a je následně přepočítána na plochu vtlačení. Výsledná tvrdost metodou vtlačení kuličky se vypočítá jako poměr použitého zatížení a plochy vtlačení [49] dle vztahu (12):

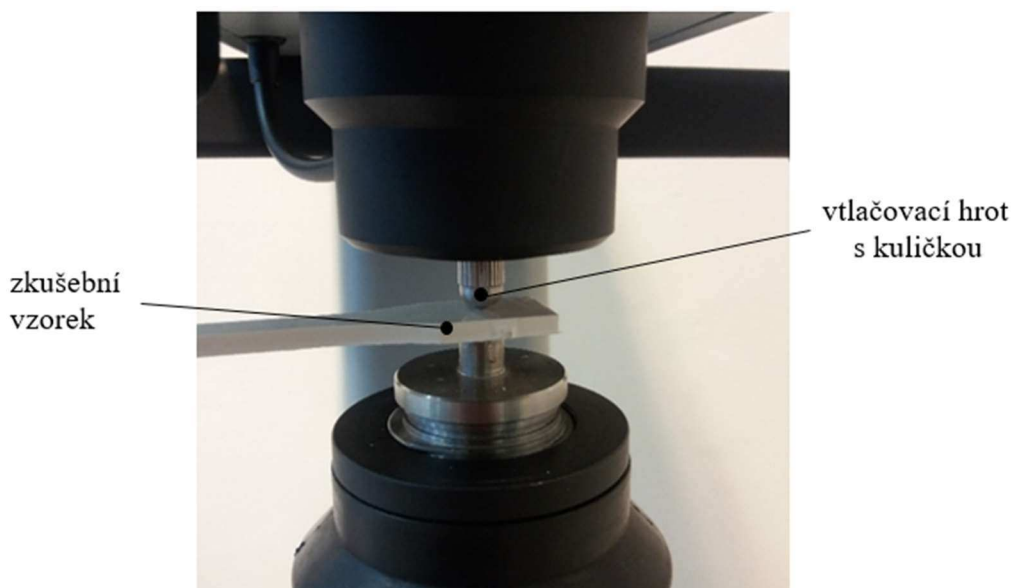
$$HB = \frac{F_r}{\pi d h_r} [N \cdot mm^{-2}] \quad (12)$$

kde: F_r [N] – redukované zkušební zatížení;
 h_r [mm] – redukovaná hloubka vtlačení;
 d [mm] – průměr vtlačované kuličky.

Testovací přístroj (viz obr. 21) se skládá z desky pro podepření zkušebního tělesa, vtlačovacího hrotu s kuličkou a vyhodnocovací jednotky, která automaticky přepočítává tvrdost materiálu ze získaných hodnot měření. Zkušební zařízení je vybaveno zařízením pro měření hloubky vtlačení v rozsahu 0,4 mm a s přesností $\pm 0,005$ mm.

Tab. 21 Podmínky testování při zkoušce tvrdosti.

Zkušební norma	ČSN EN ISO 2039-1: 2003
Zkušební zařízení	Stolní tvrdoměr Brinell CHB-3000
Zkušební zatížení	961 N
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 24 °C; vlhkost 48,9 %
Testovací vzorky (počet, rozměr)	10 ks, 20x20x4,2 mm



Obr. 56 Zkušební tvrdoměr s uchycením zkušební vzorku.

Postup:

Zkušební vzorek byl umístěn na desku přístroje určenou k podepření tak, aby jeho povrch byl kolmý ke směru zatížení (viz obr. 57). Ještě před zkušebním zatížením bylo aplikováno počáteční zatížení $F_0 = 9,8 \pm 0,1 \text{ N}$ do místa středu zkušební tělesa. Z několika možností zkušební zatížení F_m (49 N; 132 N; 358 N a 961 N) bylo vybráno redukované zatížení $F_r = 961 \text{ N}$ s tolerancí 0,1 % tak, aby hloubka vtisku h byla v rozmezí 0,15 mm až 0,35 mm. Zařízení pro měření hloubky bylo vynulováno a následně aplikováno zkušební zatížení F_r po dobu 10 s (dle normy požadováno alespoň 3 s [48]).

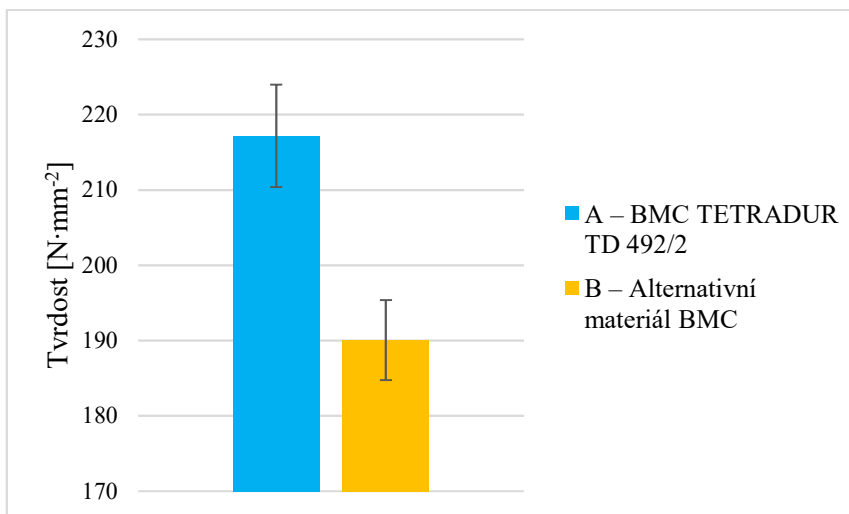
Výsledek:

Tab. 22 Tvrdost metodou vtlačení kuličky.

Číslo měření	A	B
	[N·mm ⁻²]	
1	202,3	189,1
2	219,2	196,2
3	230,1	193,6
4	216,8	199,7
5	215,2	183,3
6	215,8	187,3
7	215,7	192,1
8	219,0	187,2
9	217,9	183,3
10	219,8	188,9
Aritmetický průměr	217,2	190,1
Směrodatná odchylka	6,8	5,3

Výsledky zkoušky tvrdosti zobrazuje tab. 22 a obr. 58.

Vyhodnocení:



Obr. 57 Srovnání tvrdosti testovaných materiálů.

Zkouška tvrdosti hodnotí materiál z pohledu jeho odolnosti vůči vnikání jiného, tvrdšího materiálu [49]. V případě materiálu dílu, který je uzavřen v tělese světloometu a tím pádem nedochází k žádnému otěru ani nárazům cizích tělísek, není výsledek zkoušky zásadní z pohledu využitelnosti materiálu.

Výsledkem zkoušky tvrdosti metodou vtláčení kuličky je o 12,5 % vyšší hodnota tvrdosti u materiálu s označením A ($HB = 217,2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) ve srovnání s materiálem B ($HB = 190,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$). Nižší hodnota materiálu B vychází ze skutečnosti, že směs materiálu obsahuje aditivum za účelem zvýšení houževnatosti způsobující nárůst elasticity/pružnosti materiálu.

5.6 Zkouška hustoty

Jedním ze základních požadavků při srovnání materiálů je jeho hustota, respektive hmotnost. Zkouška hustoty pro pevné plasty se zakládá na normě *ČSN EN ISO 1183-1 Plasty – Metody stanovení hustoty nelehčených plastů – Část 1: Imerzní metoda, metoda s kapalinovým pyknometrem a titrační metoda* [56].

Stanovení hustoty vychází ze vztahu (13):

$$\rho = \frac{m}{V} [g \cdot cm^{-3}] \quad (13)$$

Za pomoci analytické váhy je možno na základě Archimedova zákona stanovit hustotu materiálu [56] dle vztahu (14):

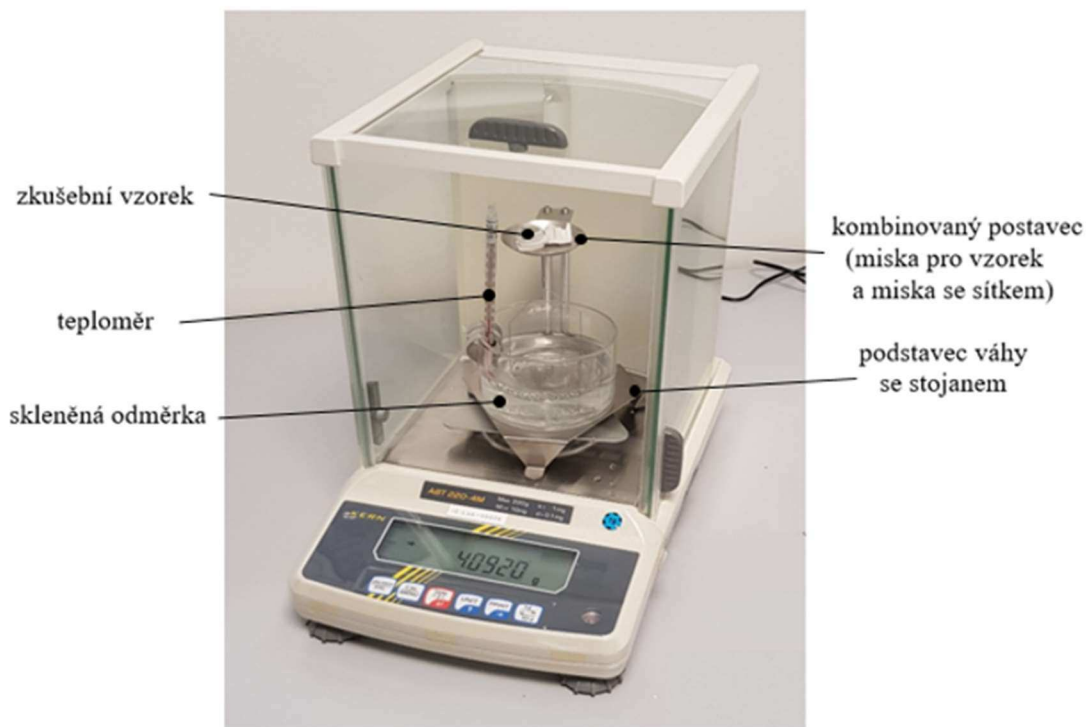
$$\rho = \frac{M}{M - N} \cdot \rho_0 [g \cdot cm^{-3}] \quad (14)$$

kde ρ $[g \cdot cm^{-3}]$ – hustota;
 M $[g]$ – hmotnost vzorku ve vzduchu;
 N $[g]$ – hmotnost v kapalině ke stanovení hustoty (voda);
 ρ_0 $[g \cdot cm^{-3}]$ – hustota kapaliny (vody) ke stanovení hustoty.

Testování hustoty bylo provedeno za podmínek v tab. 23.

Tab. 23 Podmínky testování při zkoušce hustoty.

Zkušební norma	ČSN EN ISO 1183-1: 2013
Zkušební zařízení	Analytické váhy Kern ABT220 – 4MSN
Použitá kapalina	Destilovaná voda
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 21,9 °C; vlhkost 45,3 %
Testovací vzorky (počet, rozměr)	10 ks, odkrojené části 20x15x8 mm



Obr. 58 Laboratorní analytické váhy - měření hmotnosti vzorku ve vzduchu.

Postup:

Prvním krokem byla příprava vzorků materiálu pomocí pákového mechanismu. Na základě doporučení obsluhy zařízení byla odhadována ideální hmotnost jedné navážky cca 4 g (dle normy [56] minimálně 1 g), obsahující 2 až 3 kousky odštípnutého materiálu (viz obr. 59).

Výchozím dílem, ze kterého byly oddělovány kousky materiálu, byl nosný rám světelného modulu vyrobený procesem vstřikování při sériové produkci.



Obr. 59 Oddělené vzorky pro zkoušku hustoty: a) materiál A; b) materiál B.

Testované vzorky (viz obr. 60) byly prve zváženy na vzduchu a poté v tekutině o známé hustotě (destilovaná voda). Použitím vztahu pro výpočet hustoty byly vypočteny hustoty jednotlivých vzorků.

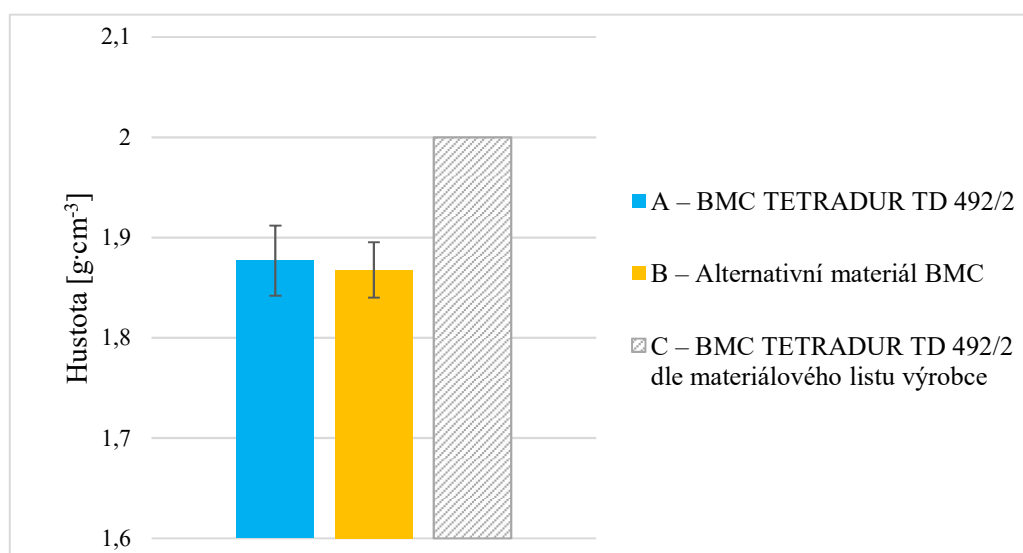
Výsledek:

Tab. 24 Měření hustoty.

číslo měření	A	B
	[g·cm ⁻³]	
1	1,875	1,870
2	1,836	1,894
3	1,911	1,826
4	1,856	1,869
5	1,917	1,894
6	1,867	1,853
Aritmetický průměr	1,877	1,868
směrodatná odchylka	0,032	0,026

C – dle hodnoty hustoty z technického listu materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 [40], uváděné výrobcem. Výsledky měření hustoty jsou zobrazeny tab. 24 a obr. 61.

Vyhodnocení:



Obr. 60 Hustota materiálu.

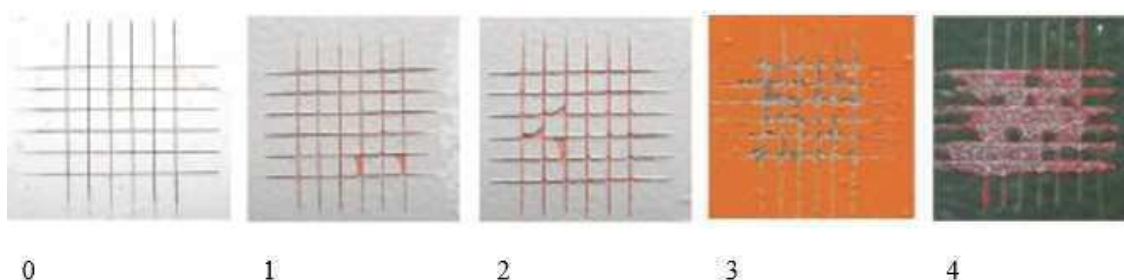
Z grafu je patrné, že se výsledky měření hustoty v laboratorních podmínkách dle normy ČSN EN ISO 1183 výrazně odlišují od hodnoty z materiálového listu TETRADUR TD 492/2 udávané výrobcem ($\rho = 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Vzhledem k tomu, že bylo měření provedeno s dodržением všech podmínek a směrodatná odchylka výsledků je relativně malá, si dovoluji tvrdit, že hodnota v materiálovém listu dodavatele je hrubě zaokrouhlena.

Hodna hustoty materiálu A je $1,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a materiálu B $1,87 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Materiál B vykazuje vzhledem k materiálu A o 0,5 % nižší hustotu. Z toho plyne, že při použití alternativního materiálu do výroby bude výsledná hmotnost výrobků (reflektorů, nosných rámců optických modulů) o 0,5 % nižší.

5.7 Zkouška adheze – mřížkový test

Hodnocení přilnavosti povlaku na podkladovém materiálu se provádí pomocí mřížkové zkoušky dle normy ČSN EN ISO 2409 Barvy a laky – mřížkový test („Cross-cut test“). Pro svou jednoduchost se dá tato zkouška provést nejen v laboratoři, ale také přímo v provozu.

Princip metody spočívá ve vytvoření definovaných vrypů do materiálu, přičemž musí být vytvořeno 6 rovnoběžných řezů a 6 dalších, které jsou na ty první kolmé. Řezy musí proniknout na podkladový, základní materiál. Následně se provádí odtržení pomocí definované adhezní pásky pod úhlem 45°, jak je vidět na obr 62, a vizuální vyhodnocení. Norma hodnotí 6 klasifikačních stupňů přilnavosti (0 až 5), přičemž stupeň 0 znamená nejlepší přilnavost [57].



Obr. 61 Ukázka vzhledu mřížky po odtrhu páskou [57].

Podmínky a vzorky testování jsou zobrazeny v tab. 25.

Tab. 25 Podmínky testování při mřížkové zkoušce.

Zkušební norma	ČSN EN ISO 2409: 2013
Zkušební zařízení	Ruční řezací nástroj s břitem
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 23,5 °C; vlhkost 47,3 %
Testovací vzorky (počet)	3 ks, reflektor světlometu

Postup:

Zkouška byla provedena na lakovaném reflektoru z materiálu BMC bez finálního pokovení, jelikož se hodnotila přilnavost základního surového materiálu a další vrstvy. Pomocí ručního řezacího nástroje s břitem (viz obr. 63) byla do povrchu vyřezaná mřížka. Z důvodu nenalezení dostatečně rovinné plochy na reflektoru (vlivem jeho členitosti parabolického tvaru) nemohl být použit řezný nástroj s více ostřími. Alternativně tedy byly řezy provedeny řezným nožem s jedním ostřím. Rovnoběžnost řezů tedy vlivem ručního provedení nebylo dodrženo (viz obr. 64), což však nemá vliv na další vyhodnocení. Následně byla na oblast mřížky přilepena normovaná páska a provedeno odtržení.

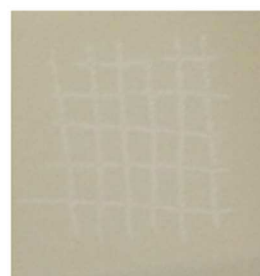


Obr. 62 Ruční řezací nástroj s břitem pro vytvoření mřížky [7].

lakovaný reflektor



vzhled mřížky po odtrhu



Obr. 63 Mřížkový test na lakovaném reflektoru.

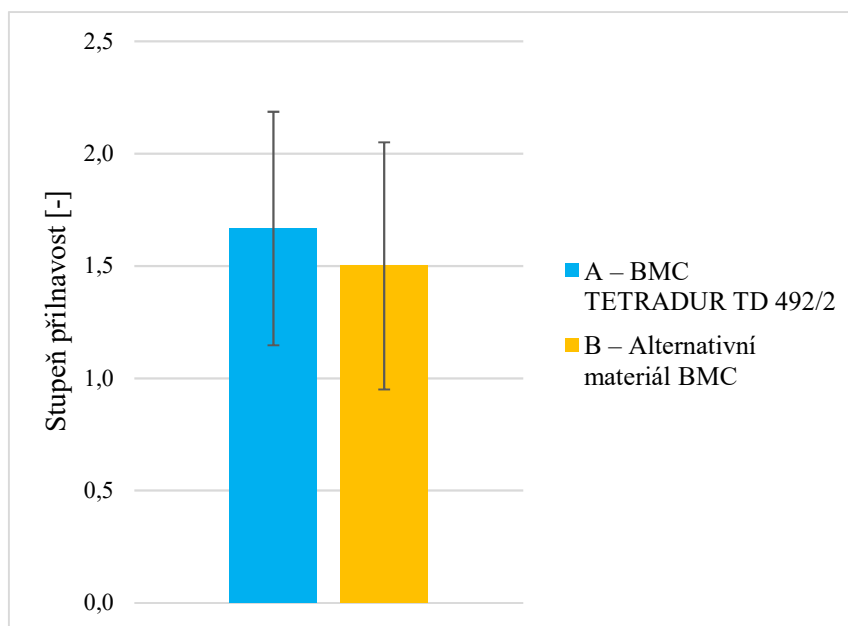
Výsledek:

Tab. 26 Měření adheze materiálu.

Číslo měření	A	B
	[-]	
1	2	2
2	1	1
3	2	1
4	2	2
5	2	2
6	1	1
Aritmetický průměr	1,67	1,50
Směrodatná odchylka	0,52	0,55

Zobrazení výsledků mřížkového testu lze vidět v tab. 26 a obr. 65.

Vyhodnocení:



Obr. 64 Mřížkový test.

Interním požadavkem na zkoušku je splnění kritéria ≤ 3 . Klasifikace řezů mřížek po odtržení páskou byla ≤ 3 pro všechny vzorky a oba materiály A i B splnily požadované adhezní požadavky. Stupeň přilnavosti materiálu A je 1,67 [-] a materiálu B 1,50 [-], avšak výsledky jsou zatíženy velkou směrodatnou odchylkou při malém počtu měření.

Dle výsledků lze vyvodit, že alternativní materiál s označením B vykazuje o 11,1 % lepší přilnavost laku na povrchu surového materiálu. Adhezní vlastnosti materiálu B jsou lepší, a tedy i vrstva lakování drží odolněji na povrchu.

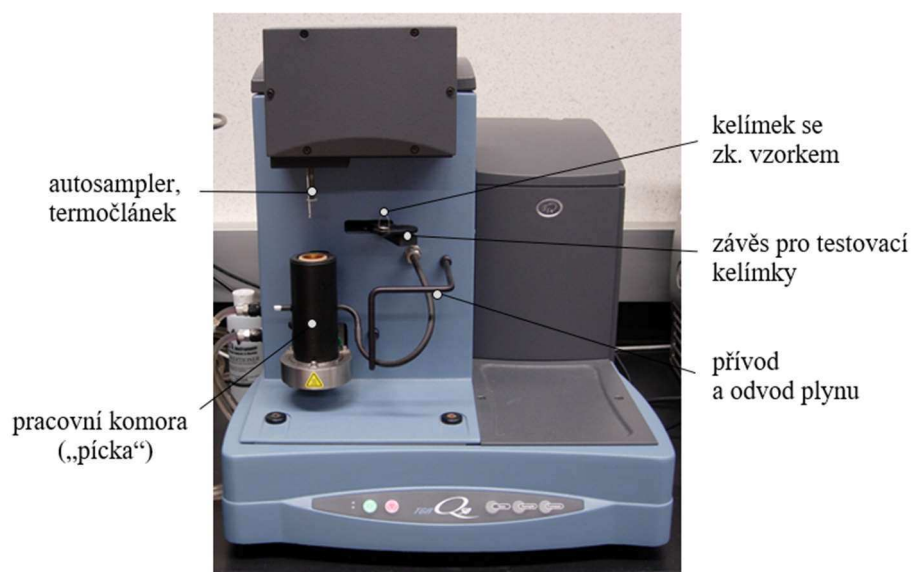
5.8 Termogravimetrie

Analýzu kvantitativního složení polymerního kompozitního materiálu BMC je možné provést pomocí termogravimetrické analýzy (TGA). Na základě závislosti hmotnostních úbytků na teplotě lze získat údaje o množství (hmotnosti) jednotlivých složek ve vzorku.

Zkouška termogravimetrie se zakládá na normě *ČSN EN ISO 11358 1: Plasty – termogravimetrie (TG) polymerů – Část 1: Obecné zásady*. Zvolenou metodou pro zkoušku je dynamické stanovení změny hmotnosti. Změna hmotnosti vzorku probíhá v závislosti na teplotě, která se zvyšuje s naprogramovanou rychlostí (10 °C/min do teploty 1000 °C). Testovací podmínky zkoušky jsou zobrazeny tab. 27.

Tab. 27 Podmínky testování při zkoušce termogravimetrie.

Zkušební norma	ČSN EN ISO 11358-1: 2014
Zkušební zařízení	TGA Q50 (TA Instruments)
Kalibrace teploty	Materiál: nikl; rychlost ohřevu: 20 °C/min; při 24 °C
Typ termovah	Horizontální
Typ teplotního čidla	Termočlánek Platinel II
Typ kelímku (pánvičky)	Platinový: 100 µl
Držák vzorku	Platinový závěsný drátek délky 89,5 mm
Metoda měření	RAMP: 10 °C/min do teploty 1000 °C
Použitý plyn	Atmosferický vzduch; průtok 90 ml/min
Testovací vzorky (počet, rozměr)	5 ks, (odkrojené části) 4x3 mm



Obr. 65 Zkušební přístroj „TGA Q50“, výrobce TA Instrumentes – podle [58].

Postup:

Vzorky pro zkoušky byly odřezány ze surového reflektoru materiálu BMC. Pro každý materiál bylo vytvořeno a měřeno 5 vzorků o rozměrech cca 3x4 mm.

Vzorek materiálu je umístěn na kelímek (zobrazený na obr. 66), který je pomocí automatického ramene přesunut na citlivou mikrováhu přístroje. Kelímek je poté umístěn do píčky s pracovním plynem – inertní dusíková atmosféra. Nastavení zkušebního přístroje bylo provedeno na základě informací dle tab. 27. Materiál kelímku je z důvodu vyšších teplot (1000 °C a vyšší) použit platinový. Pro měření byl zvolen režim snímání teploty, konkrétně lineární přírůstkový (10 °C/min do teploty 1000 °C). Vlastní měření započalo spuštěním teplotního programu a zaznamenáním TG křivky (hodnoty teploty a hmotnosti).

Vykreslení křivek a stanovení zlomových bodů (počátečních a koncových teplot) a hmotnostních úbytků bylo provedeno s využitím softwaru "TA Universal Analysis v. 4.7.B".

Výsledek:

Pro interpretaci výsledku byl použit aritmetický průměr z 5 vzorků s jejich směrodatnou odchylkou. Výsledky měření jsou zobrazeny v tab. 28 a tab. 29.

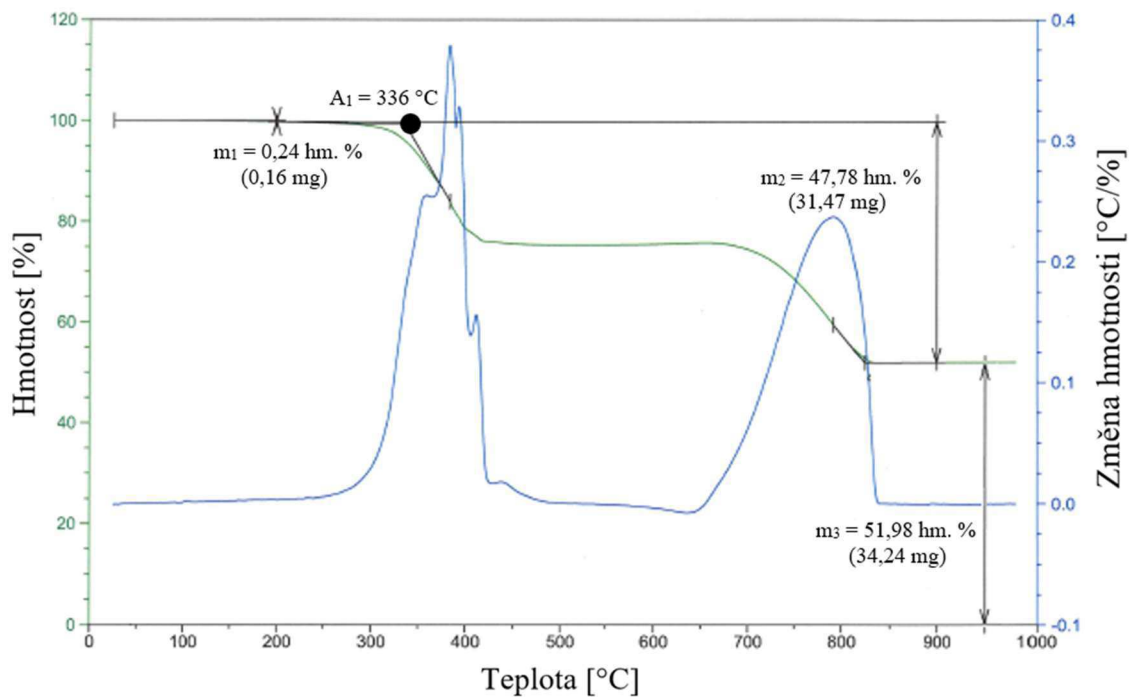
Tab. 28 Výsledky měření termogravimetrie – materiál A.

Č. vzorku	Hmotnost vzorku	Úbytek hmotnosti			Teplota – A ₁
		m ₁	m ₂	m ₃	
	[mg]	[hm. %]			[°C]
1	67,61	0,13	50,70	49,17	356
2	61,8	0,17	50,74	49,09	347
3	60	0,2	50,57	49,23	350
4	62,92	0,22	50,82	48,96	350
5	66,69	0,12	50,75	49,13	353
Aritmetický průměr	63,80	0,17	50,72	49,12	351,20
Směrodatná odchylka	3,24	0,04	0,09	0,10	3,42

Tab. 29 Výsledky měření termogravimetrie – materiál B.

Č. vzorku	Hmotnost vzorku	Úbytek hmotnosti			Teplota – A ₁
		m ₁	m ₂	m ₃	
	[mg]	[hm. %]			[°C]
1	65,87	0,24	47,78	51,98	336
2	67,72	0,23	47,74	52,03	337
3	56,82	0,25	47,51	52,24	333
4	62,48	0,26	47,57	52,17	334
5	67,67	0,25	47,56	52,19	342
Aritmetický průměr	64,11	0,25	47,63	52,12	336,40
Směrodatná odchylka	4,60	0,01	0,12	0,11	3,51

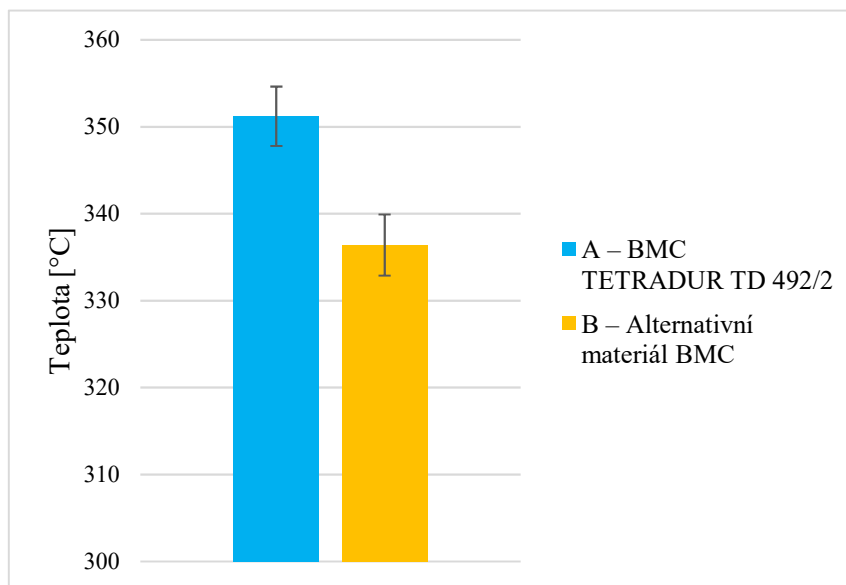
Z termogravimetrické křivky byly odečteny hmotnostní úbytky při jednotlivých redukčních změnách (m₁-m₂) [hm. %] a zbytek po spálení nad 800 °C – m₃ [hm. %]. Další hodnotou, která se dá použít z TG křivky je „počáteční bod – A₁“, který znázorňuje průsečík přímkou počáteční hmotnosti vzorku a tečny TG křivky v místě nejvyššího gradientu. TG křivka pro materiál B a vzorek č. 1 je zobrazena na další straně na obr. 67.



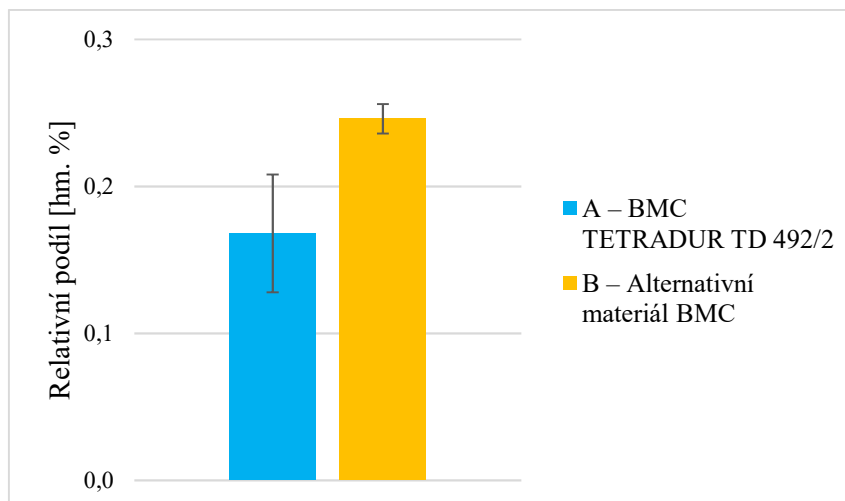
Obr. 66 Termogravimetrická křivka vzorku č. 1 materiálu B.

Vyhodnocení:

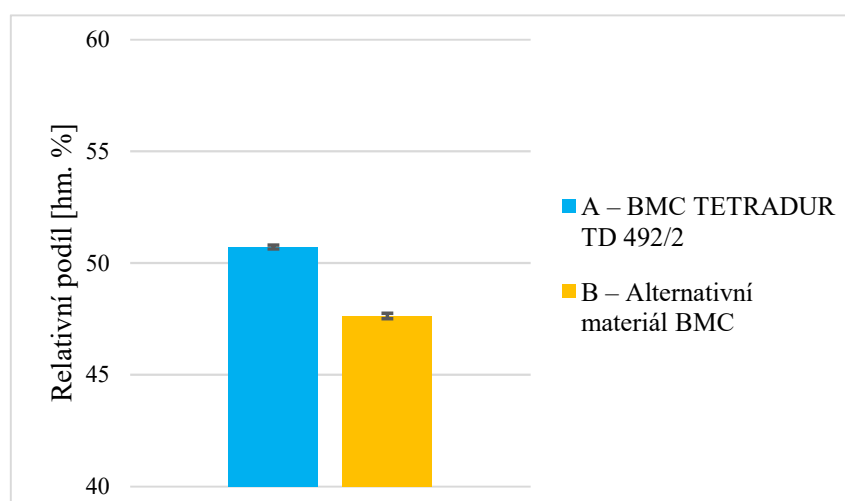
Grafické výstupy z měření zkoušky termogravimetrie jsou zobrazeny v obr. 68-71.



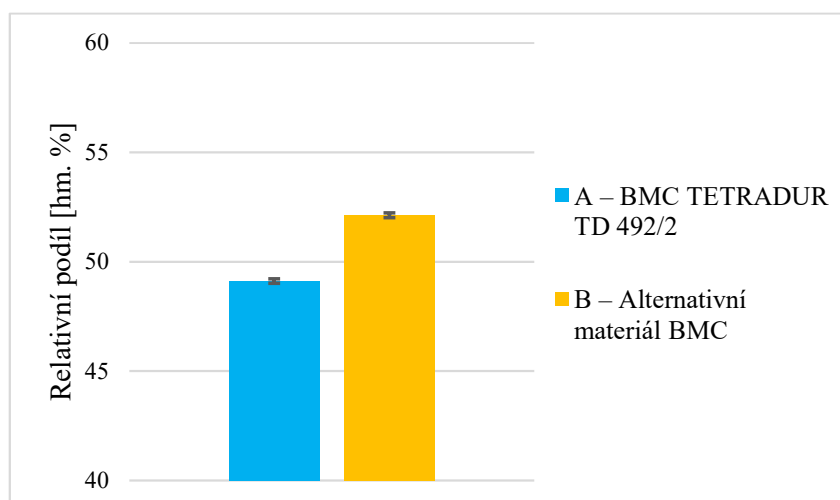
Obr. 67 Odolnost vůči tepelnému rozkladu.



Obr. 68 Relativní podíl těkavé složky v materiálu BMC – vlhkost a zbytkový styren.



Obr. 69 Relativní podíl nenasyceného polyesteru (polymerní matrice) a anorganického plniva (uhlíčitanu vápenatého) v materiálu BMC.



Obr. 70 Relativní podíl nespalitelné složky v materiálu BMC – oxid vápenatý a skelná vlákna.

Z výsledků zkoušek termogravimetrie je zřejmé, že složení obou materiálů se zakládá na jiných poměrech jednotlivých složek. Přesné chování na základě těchto poměrů však nelze s přesností předpovědět.

Vyhodnocením zkoušky je tedy popis složení materiálu BMC.

- První hmotnostní úbytek zaznamenaný na TG křivce (úbytek hmotnosti m_1), představuje těkavé složky materiálu, zejména obsah vlhkosti a zbytkový styren. Relativní podíl těkavých složek materiálu A je 0,17 hm. % a materiálu B 0,25 hm. %.
- Další změnou probíhající ve vzorku je uvolnění nenasyčeného polyesteru – polymerní matrice (v oblasti 250-450 °C).
- Poslední změna hmotnosti na TG křivce (v oblasti 700-800 °C) je spojena s rozkladem anorganického plniva – uhličitanu vápenatého. Rozpad polymerní matrice spolu s uhličitanem vápenatým je označen jako úbytek hmotnosti m_2 . Úbytek hmotnosti m_2 materiálu A je 50,72 hm. % a materiálu B 47,63 hm. %.
- Hmotnost zbytkové fáze (m_3) představuje nespalitelné složky materiálu, konkrétně obsah popela, oxidu vápenatého (CaO) a skelných vláken. Relativní podíl nespalitelných složek materiálu A je 49,12 hm. % a materiálu B 52,12 hm. %.

Odolnost materiálu A vůči tepelnému rozkladu je 351,2 °C, což odpovídá o 4,2 % vyšší hodnotě než u materiálu B (336,40 °C).

5.9 Zkoušky pokovení

Zkouškami pokovení se hodnotí kvalita povrchu a odolnost zrcadlicí kovové vrstvy reflektoru změnami teplot a vlhkostí v klimatických komorách (viz tab. 30).

Testovací série byla stanovena v následujících krocích, odpovídajících zákaznickým požadavkům dle normy TL 207 [54]:

- zkouška změnami podnebí;
- uložení v teple („sauna test“);
- kondenzační zkouška.

Vyhodnocení probíhá vizuální kontrolou lesklé hliníkové povrchové vrstvy. Po dokončení zkoušky nesmí být při vizuální kontrole vidět žádné uvolnění pokovení.

Tab. 30 Podmínky testování při zkouškách pokovení.

Zkušební norma	Interní Hella: TL 207
Zkušební zařízení	Klimatická komora Vötsch, Teplotní komora Binder FED 400, kondenzační komora HK310
Testovací vzorky (počet)	4 ks (reflektor světlometu)

5.9.1 Zkouška změnami klimatu

Zkušební norma PV 1200 [7] popisuje cyklický test změnami podnebí střídáním tepla a zimy pro zkoušku agregátů. Posuzováno je chování dílu při/ po zatížení pomocí změny teplot a vlhkosti (např. náchylnost k tvorbě trhlin, deformace, uvolnění vazby). Zkouška slouží k tomu, aby se v krátkodobém testu se zrychleným působením odhalila případná závada.

Postup:

Zkoušené reflektory byly uloženy volně v klimatické komoře (viz obr. 72).

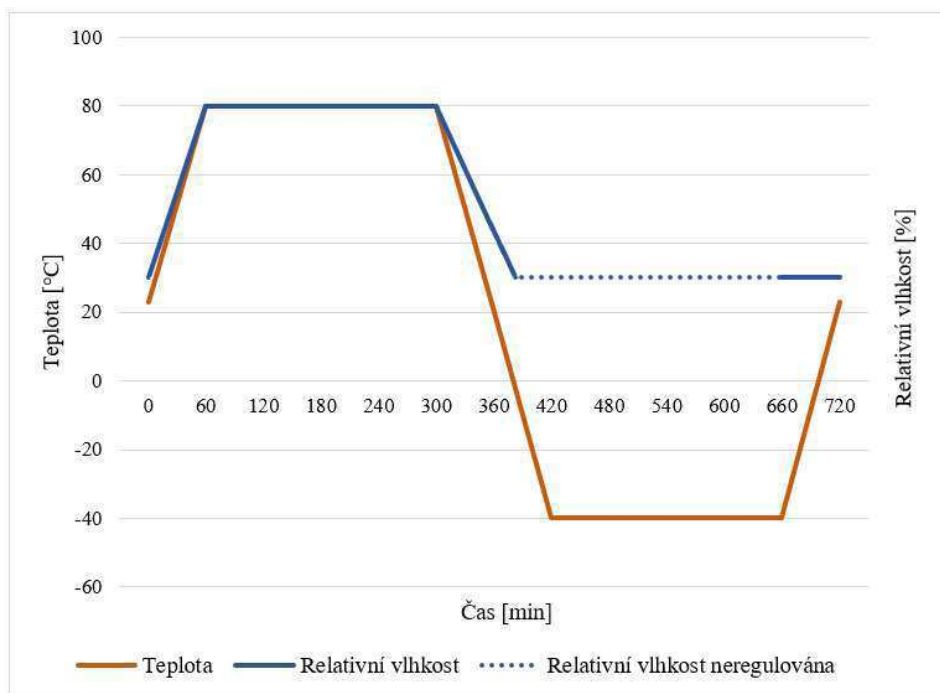


Obr. 71 Klimatická komora s testovanými reflektory.

Změny podnebí probíhaly po dobu 720 minut (dle obr. 73) s opakováním 8 cyklů. Jeden cyklus se skládá z následujících průběhů teplot a vlhkostí vzduchu:

- 1) 60 min zahřívací fáze, na $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 80 % relativní vlhkosti;
- 2) 240 min doba prodlevy, při $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 80 % relativní vlhkosti;
- 3) 120 min ochlazovací fáze, na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, při dosažení bodu mrazu: 30 % relativní vlhkosti, od $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ zůstává vlhkost vzduchu neregulována;
- 4) 240 min doba prodlevy, při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, vlhkost vzduchu zůstává neregulována;
- 5) 60 min zahřívací fáze, na $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, od $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je vlhkost regulována na 30 %.

Přičemž před vložením vzorku do klimatizační komory byla komora klimatizována na pokojovou teplotu ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$) a 30 % relativní vlhkosti. Teplota byla regulována na $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu na $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 72 Zkušební cyklus klimatických změn PV 1200.

5.9.2 Uložení v teple

Zkouška posuzuje stabilitu vzorku při jeho vystavení zvýšené teplotě specifikované zákazníkem.

Postup:

Reflektory byly volně uloženy v teplotní komoře, jak lze vidět na obr. 74. Následně byl spuštěn program s parametry: teplota 180 °C a trvání 240 hodin.



Obr. 73 Uložení reflektorů v teplotní komoře.

5.9.3 Kondenzační zkouška

Kondenzační test ve zkušební atmosféře, tzv. "sauna test" hodnotí odolnost materiálu (pokovení) vůči vlhkému prostředí se zvýšenou teplotou.

Postup:

Reflektory byly volně uloženy v kondenzační komoře po dobu 48 hodin při testovacích podmínkách teploty: 40 ± 3 °C a vlhkosti vzduchu: 100 %

5.9.4 Výsledky a vyhodnocení zkoušek pokovení

Po dokončení zkoušek pokovení nebyly zaznamenány na dílech žádné viditelné změny. Výsledky všech testů souhlasí s požadavky. Základní díly z alternativního termosetického materiálu i s jeho lakováním a pokovením splnily kritické požadavky, které mohou v provozu nastat, a tudíž je zaručena jeho spolehlivost v reálném zatížení světlometu. Na základně provedených testů lze tvrdit, že materiál je dostatečně odolný vůči klimatickým změnám a vhodný pro použití ve světlometu.

5.10 Testování světlometu

Testování nového materiálu pro základní komponent světlometu, který se významnou měrou podílí na podání světla, je nutno prověřit zkouškami fotometrie. V případě reflektoru se jedná primárně o kvalitu a stabilitu povrchu materiálu, pomocí kterého dochází k odrazu od světelného zdroje.

Další základní zkouškou, kterou musí světlomet – respektive alternativní materiál reflektoru a nosného rámu optického modulu – splnit, je vibrační zkouška, potvrzující jeho pružnost – odolnost proti různým nárazům vznikající při provozu automobilu.

5.10.1 Zkouška fotometrie

Světlomet je při zkouškách fotometrie uchycen do testovacích přípravků, které reprodukuje polohu testovaného dílu ve vozidle. Nosné body tedy odpovídají zástavbovému uchycení automobilu. Sekvence testování fotometrického výstupu sestává z prvotního měření světelných hodnot a nastavení správné hranice svícení světlo-tma. Následně je na světlomet aplikováno klimatické zatížení v kombinaci s vlastním svícením dle specifikace zákonných norem a požadavků zákazníka. Na závěr je provedeno opětovné měření světelného výstupu světlometu a porovnání s limitními hodnotami požadavků [7]. Podmínky zkoušky jsou zobrazeny tab. 31.

Tab. 31 Podmínky testování při zkoušce fotometrie.

Zkušební norma	Interní Hella: TL 909
Zkušební zařízení	Klimatická komora Vötsch VCS 7100-5, Multimetr Metex M3860M
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 22,5 °C; vlhkost 46,9 %
Testovací vzorky (počet)	6 ks, (světlomet automobilu)

Testovací série byla stanovena v následujících krocích:

- 1) měření fotometrie;
- 2) nastavení hranice světla-tmy;
- 3) zatížení světlometu kombinací světelných režimů (denní, noční) a krajních operačních teplot (-40 až 70 °C);
 - 4 hod noční režim při -40 °C
 - 30 min aklimatizace
 - 4 hod denní režim při 70 °C
 - 4 hod noční režim při 70 °C
- 4) kontrola hranice světla-tmy;
- 5) opětovné měření fotometrie po zatížení.

Zkouška fotometrie se provádí uchycením světlometu do přípravku, ustavením na goniometru, zapnutí požadovaných světelných funkcí (tlumené, dálkové) a následném měření svítivosti [cd] ve vzdálenosti 25 m. Rameno goniometru se spolu se světlometem natáčí dle naprogramovaného cyklu a čip na stěně proměřuje a zaznamenává hodnoty osvětlenosti v jednotlivých bodech. Hodnotí se dodržení maximálních a minimálních hodnot svítivosti prověřovaných bodů, zejména v okolí hranice světlo-tma.

Před zatížením světlometu se nastaví hranice světla-tmy potkávacího světla vertikálně na hodnotu -1.0 % a horizontálně na +0,3 %. Měření se provádí na stěně vzdálené 10 m před světlometem. Po aplikaci zatížení světlometu vlivem svícení a klimatických podmínek je fotometrie znovu proměřena.

Přípustná změna polohy hranice světlo-tma („Cut-Off-Line“) po zatížení je:

- vertikální maximálně $\pm 0,2 \%$ ($\pm 20 \text{ mm}/10 \text{ m}$);
- horizontální maximálně $\pm 0,3 \%$ ($\pm 30 \text{ mm}/10 \text{ m}$).

Po zatížení světlometu musí být splněny všechny kontrolní požadavky na těsnost, vibrační odolnost proti náhodným vibracím a zejména fotometrii. Zákonným požadavkem na splnění fotometrie po zatížení světlometu je 100 % dodržení minimálních a maximálních limitních hodnot svítivosti.

Výsledky:

Výstupy z měření fotometrie jsou zobrazeny tab. 32-33 a obr. 75-76.

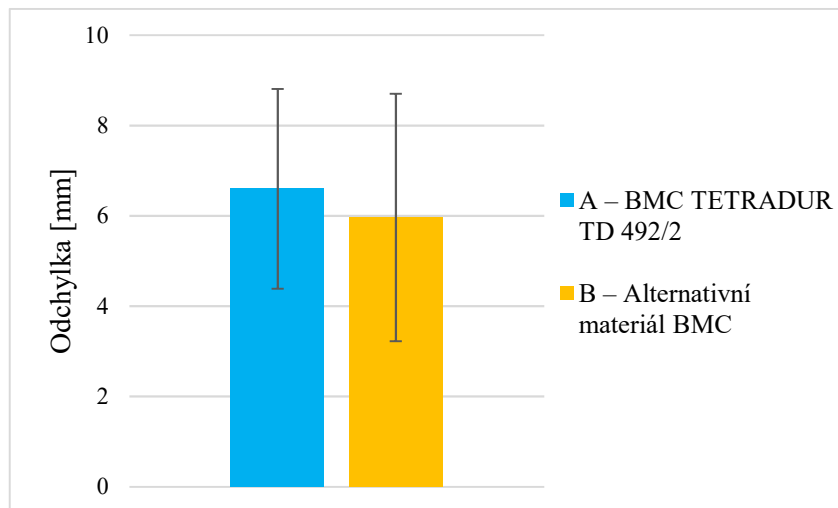
Tab. 32 Měření padání vertikální hranice světlo-tma.

Vzorek světlometu	A	B
	[mm]	
1	7,4	8,4
2	8,3	3
3	4,1	6,5
Aritmetický průměr	6,6	6,0
Směrodatná odchylka	2,2	2,7

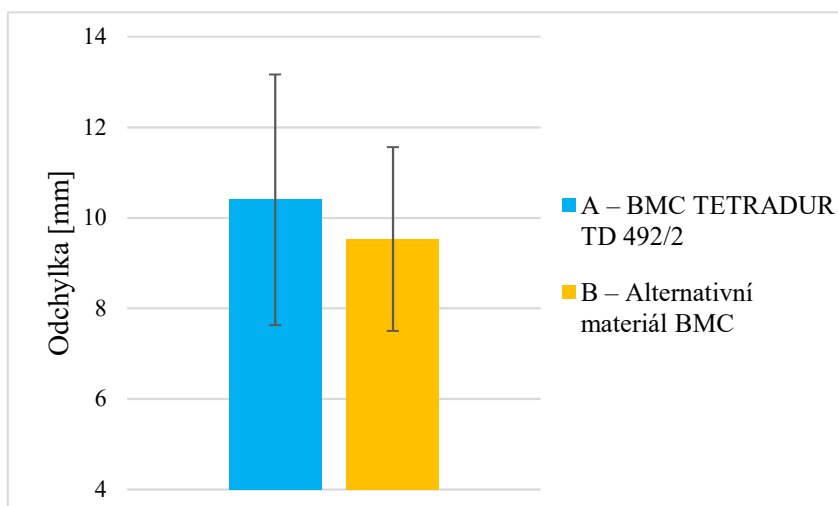
Tab. 33 Měření padání horizontální hranice světlo-tma.

Vzorek světlometu	A	B
	[mm]	
1	11,9	7,9
2	12,1	11,8
3	7,2	8,9
Aritmetický průměr	10,4	9,5
Směrodatná odchylka	2,8	2,0

Vyhodnocení:



Obr. 74 Vertikální odchylka hranice světlo-tma.



Obr. 75 Horizontální odchylka hranice světlo-tma.

Odchylka materiálu A od hranice světlo-tma po zatížení je 6,60 mm a u materiálu B 5,97 mm, což znamená rozdíl 9,6 %. V případě vertikálního měření se materiál A odchyluje o 10,40 mm a materiál B o 9,53 mm, což představuje o 8,3 % lepší hodnotu pro materiál B. Výsledky však vykazují velkou směrodatnou odchylku.

Z fotometrických měření změny hranice světlo-tma vyplývá, že je alternativní materiál reflektorů typu B odolnější vůči zatížení světlometu v extrémních podmínkách. Vlivem účinků tepelného působení klimatické komory a vlastního svícení dochází k menšímu narušení optických ploch reflektoru a stabilnějšímu podání.

5.10.2 Vibrační zkouška

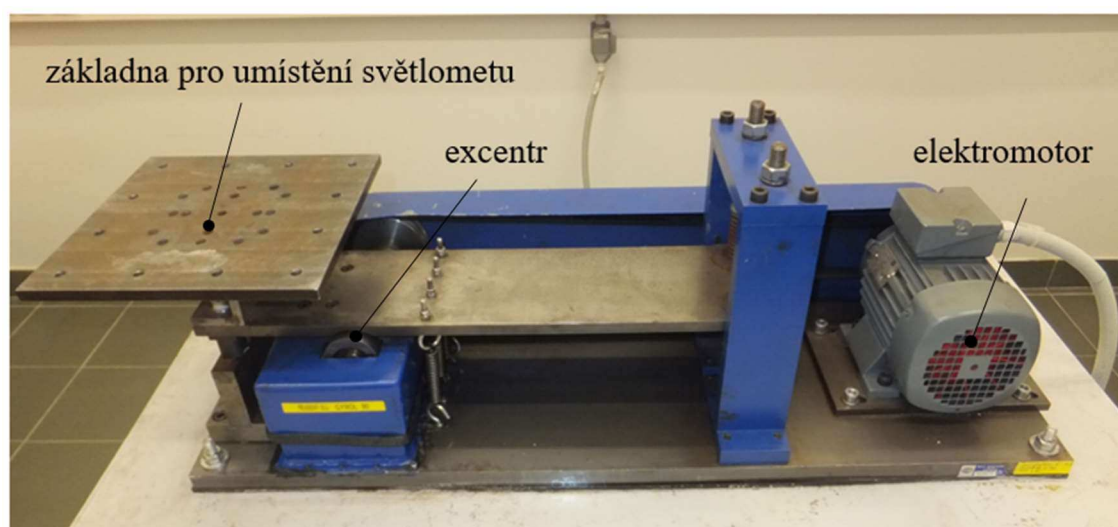
Specifikace testů se liší dle požadavků jednotlivých automobilních společností. Jedná se o zatěžování typu [7]:

- sinusové vibrace;
- "širokopásmový šum";
- rázy (mechanické šoky).

Pro testování vibrační odolnosti světlometu, respektive alternativního materiálu (díl reflektoru a nosného rámu optického modulu) bylo vybráno nejpřísnější zatížení typu rázových mechanických šoků na vibračním zkušebním přístroji (viz obr. 77). Podmínky testování jsou zobrazeny tab. 34.

Tab. 34 Podmínky testování při vibrační zkoušce.

Zkušební norma	Interní Hella: TL 909
Zkušební zařízení	Vibrační zařízení podle SAE J577
Klimatické podmínky při zkoušce	Teplota 21,4 °C; vlhkost 47,8 %
Testovací vzorky (počet)	6 ks, (světlomet automobilu)



Obr. 76 Vibrační zkušební přístroj.

Postup:

Reflektory z alternativního materiálu byly smontovány do světlometu. Světlomet byl upevněn do přípravku, reprodukcující polohu při zástavbě automobilu, a ustaven k vibračnímu zařízení (viz obr. 78). Vibrační program byl nastaven dle specifikace zákazníka (rázový vibrační program) s dobou trvání 1 hod ve vertikální ose.

Stejným postupem sestavení do světlometu a jeho zatížením prošel i nosný rám optického modulu z alternativního materiálu.



Obr. 77 Uchycení reflektoru v přípravku pro testování vibrací.

Výsledek testu a vyhodnocení:

Po dokončení vibrační zkoušky nebylo zaznamenáno žádné uvolnění částí světlometu, zejména sledovaného reflektoru a nosného rámu optického modulu a na těchto dílech nebyly nalezeny žádné viditelné změny. Výsledky testu souhlasí s požadavky vibrační zkoušky a pro danou sestavu je zaručena dostatečná robustnost.

6 VYHODNOCENÍ

6.1 Ekonomická využitelnost

Aktuální produkce materiálu BMC obchodní společnosti HELLA Autotechnik Nova, s.r.o. je 200 tun za měsíc. V roce 2020 je vzhledem ke trendu zmenšování velikosti LED reflektorů předpokládaná spotřeba o polovinu méně. Technologické zpracování alternativního materiálu (vstřikování, lakování, pokovení) je zcela stejné se současným materiálem, tudíž hraje roli při výhodnosti pouze cena.

Přesná nákupní cena materiálů nemůže být z důvodu utajení zveřejněna. Vzhledem k aktuálnímu BMC TETRADUR TD 492/2 je však alternativní materiál BMC dle nákupní ceny o 12,7 % levnější. Při zavedení a schválení zákazníkem (na základě prokázaných testů) v aktuální produkci by byla měsíční cenová úspora za nakupovaný materiál 700.000,- Kč.

6.2 Diskuse

Při rešeršní fázi tématiky byla snaha o nalezení institutu, který by připravil zkušební vzorky termosetu vstřikováním. Dle dostupných zdrojů však nebyla taková zkušebna nalezena.

Další úvahou bylo vyřezání části reflektoru zpracovaného vstřikovacím lisem při sériové produkci. Z důvodu nenalezení potřebné rovinné plochy dílu, ze které by bylo možno vyrobit testovací normované zkušební vzorky pro následné materiálové zkoušky (zvláště z důvodu velkých rozměrů pro tahovou zkoušku), byla zvolena dostupnější metoda zpracování materiálu – technologií lisování (stejně jako v dalších podobných studiích [2,3,39] ohledně zkoušení vlastností BMC).

S vědomím nepřesného zpracování materiálu (bez míchání ve šneku vstřikovacího lisu, tepelné předúpravy, náhodnému uspořádání vyztužujících vláken a odlišnému principu plnění dutiny formy) byly destičky zpracovány lisováním. Porovnání výsledků zkoušek na tělesech zpracovaných stejným pracovním postupem má přesto dobrou vypovídající hodnotu.

Výsledky materiálových zkoušek pevnostního charakteru (tah, tvrdost, ohyb) nejsou u světlometu automobilu zásadní a směrodatné. Pevnost je ovlivněna zejména velikostí skelných vláken, které při např. tahu a ohybu výrazně zlepšují výsledky, avšak je v nepřímé úměrnosti spolu s houževnatostí. Jednotlivé díly světlometu spolu v reálném provozu nepřichází do kontaktu, a proto je tvrdost pouze informativní materiálovou charakteristikou.

Rozhodující veličinou v případě světlometu je houževnatost. Automobil, respektive světlomet, musí odolat spíše častým mechanickým otřesům vlivem nerovnosti vozovky, než extrémnímu jednorázovému zatížení (zkouška tahem, ohybem). Vlivem častých vibrací při jízdě automobilu je materiál světlometu náchylný na vznik mikroprasklin až po následné porušení a lom.

Tato skutečnost směřuje k významné vypovídající hodnotě zkoušky rázové houževnatosti, která prokazuje pružnost materiálu, respektive absorbování rázů.

Pro vyhodnocení základních zákonných a interních firemních požadavků (fotometrie a adheze spolu s klimatickou a vibrační odolností), které jsou kladeny na světlomet, byl materiál použit pro výrobu reálných vzorků reflektorů a nosných rámu optických modulů.

Z důvodu komplikované přípravy směsi alternativního materiálu BMC, která byla pouze v laboratorních podmínkách, docházelo v prvotní fázi k mnohým problémům při zpracování materiálu. U vstřikovaných těles reflektorů docházelo k lepení materiálu na formu vstřikovacího stroje. V jiných případech byl zase nesprávný poměr inhibitorů/separátorů ve směsi pro konkrétní tvarový díl, a proto docházelo ke špatné polymeraci. S ohledem na časové dostupnosti lisů, odformování a přípravu materiálu byl proces validace a vzorkování nového typu BMC materiálu zdlouhavý. Po stanovení ideální formule složení materiálu již byl proces vstřikování (při standartních parametrech nastavení vstřikovacího stroje) bez problémů. Surové reflektory z alternativního materiálu vykazovaly lesklejší, bělejší povrch (viz v textu práce obr. 41 – *podkapitola 5.1.2 Testované díly světlometu*).

Pro uvolnění materiálu do sériové produkce zákazníkovi však chybí ještě řada kroků, simulací a schvalování. Na základě vyhodnocených hodnot mechanických zkoušek a dalších verifikačních testů, které byly obsahem této práce, bude možno aplikovat materiál do simulačních programů. Konstrukteři budou dále posuzovat tento materiál a jeho chování, a to již se znalostí materiálových vlastností.

Cílem této studie nebylo nahradit současný materiál, ale představit a porovnat vlastnosti, možnosti a využitelnost alternativního typu BMC. Na základě splnění požadovaných kvalifikačních zkoušek a výhodných vlastností by do budoucna mohl mít alternativní materiál využití pro reflektory, či nosné rámy optických modulů.

Díky relativně velké možnosti plnění a vyztužování materiálu BMC různými přísadami [59] může být do budoucna využitý pro různé typy aplikací. BMC s vysokým obsahem vodivých plničů, jako například nitrid bóru [60], by mohl být využit jako chladič, nahrazující běžně dostupný kovový materiál. Hlavní nevýhodou je zejména cena těchto vysoce plněných materiálů a současně obtížná zpracovatelnost. Výhody naopak spočívají ve snížení hmotnosti (při srovnání s kovovými), vyšším možností při tvarování a odvodu tepla přímo tam, kde je to nejvíce potřeba.

Téma diplomové práce bylo velmi zajímavé a poučné. Velkým přínosem pro mě byla spolupráce s obchodní společností HELLA Autotechnik Nova, s.r.o. V rámci zpracování jsem se podílel na koordinování všech dílčích úkolů uvnitř společnosti, pomáhal se sestavováním testů, prováděl zkoušky i jejich následné vyhodnocení. Zajímavé pro mě bylo zejména zpracování reálných dílů světlometu na vstřikovacích lisech a následné montáži do tělesa světlometu. Dále také možnost provádět zkoušky materiálových vlastností i specializované kvalifikační testy světlometů na moderních přístrojích firmy. Zpracováním této práce jsem tedy získal další cenné zkušenosti pro budoucí praxi.

6.2.1 Vyhodnocení výsledků

Výsledky práce jsou shrnuty v následující tab. 36.

Tab. 35 Výsledné srovnání testovaných vlastností materiálu BMC TETRADUR TD 492/2 (materiál A) a alternativního materiálu BMC (materiál B).

Měřená vlastnost	Současný materiál A	Alternativní materiál B	Jednotka	Rozdíl
Modul pružnosti v tahu	12147	11250	[MPa]	-7,4 %
Mez pevnosti v tahu	37,1	34,5	[MPa]	-7,0 %
Napětí v tahu při přetržení	31,5	26,9	[MPa]	-14,5 %
Modul pružnosti v ohybu	14238	12146	[MPa]	-14,7 %
Mez pevnosti v ohybu	96,0	81,9	[MPa]	-14,7 %
Napětí v ohybu v okamžiku lomu	88,0	73,3	[MPa]	-16,8 %
Houževnatost	23,4	36,1	[kJ·m ⁻²]	54,4 %
Tvrdost	217,2	190,1	[N·mm ⁻²]	-12,5 %
Hustota	1,877	1,868	[g·cm ⁻³]	-0,5 %
Mřížkový test	1,67	1,50	[-]	-10,0 %
Horizontální fotometrie	6,6	6,0	[mm]	-9,6 %
Vertikální fotometrie	10,4	9,5	[mm]	-8,3 %

Legenda: (Alternativní materiál B -> Současný materiál A)	HORŠÍ	LEPŠÍ
---	-------	-------

6.2.2 Návrhy pokračování

Jedním z nabízejících-se pokračování práce a možností zjištění dalších informací o typickém chování materiálu BMC lze získat provedením mechanických zkoušek při různém teplotním zatížení [3]. Pro vyšší vypovídající hodnotu a ověření předložených výsledků by mohly být provedeny zkoušky na zkušebních vzorcích připravených za odlišných podmínek s různými tloušťkami vzorků a podobně.

- **Návrh 2K vstřikování termosetu + termoplastu**

Dalším z alternativních návrhů z pohledu technologie výroby je spojení materiálu BMC spolu s termoplastem vstřikováním 2K dílu. Reflektor z takového celku by měl termosetické jádro materiálu typu BMC (vykazující výborné mechanické vlastnosti s rozměrovou výrobní stálostí) a vrchní odrazovou vrstvu z termoplastu, který je možný (na rozdíl od termosetu) pokovit přímo bez předchozí problematické operace lakování.

Kombinace vstřikování jádra z termosetického materiálu a termoplastické povrchové vrstvy do stejné formy se však jeví doposud jako neslučitelné [13]. Skutečnost je dána vlivem odlišných provozních podmínek vlastního vstřikování, a to zejména rozdílnost teplot tuhnutí/vytvrzení a teploty přivádění materiálu do formy. Cílem by tedy bylo navržení způsobu vstřikování dvou takto odlišných materiálů, mající termosetické jádro v kombinaci s termoplastickým povrchem a zajištění mechanického a chemického spojení mezi oběma materiály. V aktuální fázi vývoje je tento koncept předmětem patentových přihlášek a výzkumů.

- **Přímé pokovení**

V současné době se uvažuje a testuje speciálně navržený materiál BMC, který by měl výrazně lepší povrchové vlastnosti, v důsledku kterých by nebylo nutné provádět problematickou lakovací operaci. Hovoří se o takzvaném "přímém pokovení" anebo termínem z angličtiny "*no base coating*". Termosetické plasty, které lze přímo vakuově metalizovat, jsou v současnosti předmětem horlivých výzkumů [32]. Reálné aplikace však zatím nejsou dostupné.



Obr. 78 Srovnání pokovení: a) přímé (bez laku); b) standartní s předchozí operací lakování.

ZÁVĚR

Zadáním a předmětem této diplomové práce bylo zhodnocení využitelnosti nového termosetického materiálu pro konstrukci světlometů.

Na základě provedení tahové zkoušky a vyhodnocení výsledků – modulu pružnosti v tahu, mezí pevnosti v tahu a napětí při přetržení – vyplynulo, že současný materiál A (BMC TETRADUR TD 492/2) je ve srovnání s alternativním materiálem B tužší a pevnější. K jeho zdeformování tedy musí být vyvinuta vyšší tahová síla. Zároveň však lze tvrdit, že nemá natolik houževnaté chování jako materiál B, a tudíž je rigidnější (křehčí).

- Modul pružnosti v tahu současného materiálu A je o 7,4 % vyšší než u alternativního materiálu B.
- Mez pevnosti v tahu je oproti materiálu B o 7 % vyšší u materiálu A.
- Hodnota napětí v tahu při přetržení je u materiálu A o 14,5 % vyšší než u alternativního materiálu B.

Výsledky ohybové zkoušky – modul pružnosti, mez pevnosti a napětí v okamžiku lomu v ohybu – dokazují, že materiál A je ve srovnání s materiálem B odolnější vůči ohybovému napětí.

- Modul pružnosti v ohybu materiálu A je o 14,7 % vyšší než u materiálu B.
- Mez pevnosti v ohybu současného materiálu je o 14,7 % vyšší u materiálu A.
- Napětí v ohybu v okamžiku lomu je pro o 16,8 % vyšší ve srovnání s materiálem B.

Zkouškou rázové houževnatosti metodou Charpy byla prokázána hodnota houževnatosti alternativního materiálu B o 54,4 % vyšší než u současného materiálu A. Z výsledku vyplývá pro alternativní materiál B výrazně vyšší míra schopnosti absorbovat rázy a odolávat mikrotrhlinám. Pro porovnání materiálů, v případě dílu světlometu zatěžovaného téměř soustavnými vibracemi vlivem nerovností od vozovky, se jedná o nejdůležitější materiálovou vlastnost.

Výsledkem zkoušky tvrdosti metodou vtlačení kuličky je o 12,5 % vyšší hodnota tvrdosti u současného materiálu A ve srovnání s materiálem B. Nižší hodnota materiálu B vychází ze skutečnosti, že směs materiálu obsahuje aditivum za účelem zvýšení houževnatosti způsobující nárůst elasticity/pružnosti materiálu. V případě materiálu dílu, který je uzavřen v tělese světlometu a tím pádem nedochází k žádnému otěru ani nárazům cizích těles, není výsledek zkoušky z pohledu využitelnosti materiálu zásadní.

V případě hustoty vykazuje materiál B vzhledem k materiálu A o 0,5 % nižší hodnotu. Z toho plyne, že při použití alternativního materiálu do výroby bude výsledná hmotnost výrobků (reflektorů, nosných rámu optických modulů) o 0,5 % nižší.

Adheze materiálu, k následující technologické vrstvě lakování, je vlivem velké směrodatné odchylky neprůkazná, avšak s jistotou lze tvrdit, že alternativní materiál B splnil podmínky přilnavosti (splnění stupně ≤ 3) v požadovaném kritériu.

Po provedení zkoušek odolnosti pokovení nebyly zaznamenány na reflektorech žádné viditelné změny. Reflektory z alternativního termosetického materiálu B (s vrstvami lakování a pokovení) splnily kritické požadavky, které mohou v provozu nastat, a tudíž je zaručena spolehlivost v reálných podmínkách provozu. Na základně provedených testů lze tvrdit, že materiál je dostatečně odolný vůči klimatickým změnám a vhodný pro použití ve světlometu.

Stabilita osvětlenosti, měřená změnou hranice světlo-tma (na stěně před světlometem ve vzdálenosti 10 m) po zatížení světlometu, je v aritmetickém průměru o 9 % lepší u materiálu B ve srovnání s materiálem A. Z fotometrických měření tedy vyplynulo, že alternativní materiál reflektorů typu B je odolnější vůči zatížení světlometu v extrémních podmínkách. Vlivem účinků tepelného působení klimatické komory a vlastního svícení dochází k menšímu narušení optických ploch reflektoru.

Po dokončení vibrační zkoušky nebylo zaznamenáno žádné uvolnění či poškození sledovaného reflektoru a nosného rámu optického modulu. Výsledky zkoušky souhlasí se zákaznickými požadavky a pro danou sestavu je zaručena dostatečná robustnost.

Z hlediska nákupní ceny materiálu, která je rozhodujícím faktorem při výběru (pokud oba materiály splňují zákonné a zákaznické požadavky které jsou na ně kladené), je alternativní materiál B o 12,7 % levnější.

Na základě všech provedených zkoušek lze tvrdit, že testovaný alternativní materiál typu BMC dosahuje v souhrnu lepších vlastností oproti stávajícímu materiálu TETRADUR TD 492/2. Zejména vyzdvihují o 54,4 % vyšší houževnatost charakterizující výrazně vyšší schopnost alternativního materiálu absorbovat rázy a odolávat mikrotrhlinám, které bylo dosaženo na úkor snížení pevnosti materiálu – modulu pružnosti v tahu pouze o 7,4 %.

Výsledky provedených zkoušek a vyhodnocení využitelnosti nového alternativního materiálu BMC poskytují údaje pro následný výzkum, vývoj, kvalitu a přijetí nového materiálu dle specifikací automobilního průmyslu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *ZÁKLADY PROGRESIVNÍCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ZPKM/OPORA_PROGRESIVNI_MATERIALLY.pdf. Skriptum. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [2] *Vlastnosti lisovacích hmot* [online]. Zlín, 2015 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/33689>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [3] *Fyzikální vlastnosti BMC-Menzolitu* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/128895/ZIM0033_FMMI_N3923_3911T036_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava.
- [4] *Hodnocení kvality BMC na RPA* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40674/kost%C3%ADkov%C3%A1_1_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [5] *ČSN ISO 295 Plasty – Příprava zkušebních těles z reaktoplastů lisováním*. Technor, 2004.
- [6] DESLAURIERS, Michael. Top 10 New Features of the 2019 BMW X5. *The Car Guide* [online]. 2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.guideautoweb.com/en/galleries/47919/top-10-new-features-of-the-2019-bmw-x5/?im=1>
- [7] *HELLA* [online]. Hella Group: HELLA GmbH & Co. KGaA, b.r. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://www.hella.com/hella-com/index.html>
- [8] *Světlomety a elektronika světlometů* [online]. Škoda Auto, 2009 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/03~Partner%20-%20C5%A0KODA%20Auto/P2-06_Sv%C4%9Btlometry%20a%20elektronika%20-%20Hole%C4%8Dek.pdf. Prezentace. Škoda Auto.

- [9] Špičkové technologie pro každého: Světlometry IntelliLux AFL-LED Matrix promění noc v den!. *Cz-media.opel* [online]. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://cz-media.opel.com/cs/%C5%A1pi%C4%8Dkov%C3%A9-technologie-pro-ka%C5%BE%C3%A9ho-sv%C4%9Btlometry-intellilux-afl-led-matrix-prom%C4%9Bn%C3%AD-noc-v-den>
- [10] KILIÁN, Karel. Světlometry Digital Light od Mercedesu umí promítat na vozovku. *VTM* [online]. 2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/svetlometry-digital-light-od-mercedesu-umi-promitat-na-vozovku-komu-to-prospeje/sc-870-a-194737/default.aspx>
- [11] Matrix OLED pro osvětlení automobilů. *Technickytydenik* [online]. 2015 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/matrix-oled-pro-osvetleni-automobilu_33263.html
- [12] A thermoset plastic in the injection molding machine. *K-ZEITUNG* [online]. b.r., , 3 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://www.kraussmaffe.com/media/files/kmdownloadlocal/imm-en/K-Praxis_201702_Elba_en.pdf
- [13] *Method of producing a reflector for a headlight, particularly for an automobile, by two-material injection molding*. b.r. United States. Uděleno 1986.
- [14] *Návrh tlumeného a dálkového reflektoru světlometu* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104859/KOS418_FS_N2301_3909_T001_20_2014.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava.
- [15] Vývoj LED modulů. *Tvorimesvetlo* [online]. 2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.tvorimesvetlo.cz/vyvoj-led-modulu/>
- [16] První FULL LED světlomet Škoda Octavia. *Tvorimesvetlo* [online]. 2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.tvorimesvetlo.cz/prvni-full-led-svetlomet-skoda-octavia/>
- [17] *Motor vehicle headlamp reflector of thermosetting plastics material*. b.r.
- [18] SYNEK, Miloslav. *Ekonomická analýza*. Vyd. 1. Praha: Oeconomica, 2003, 79 s. ISBN 80-245-0603-3.

- [19] *Vlastnosti a zkoušení materiálu* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2016 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/330/cs/vlastnosti-a-zkouseni-materialu/>
- [20] Technologie II: PLASTY A JEJICH ZPRACOVATELSKÉ VLASTNOSTI. *Ksp.tul* [online]. b.r. [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#011
- [21] Fyzikální základy vědy o materiálu. *Ped.muni* [online]. 2013 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- [22] *Úvod do studia materiálů* [online]. 1. Praha: VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2019-03-27]. ISBN 80-7080-568-4. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pages-pdf/obsah.html
- [23] *Negribossi: Thermoset Moulding Application* [online]. b.r. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.negribossi.com/technologies/thermoset-injection-moulding/>
- [24] *Proto-cast: PLASTIC INJECTION MOLDING: THERMOPLASTIC VS. THERMOSET* [online]. USA, 2017 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://proto-cast.com/plastic-injection-molding-thermoplastic/>
- [25] Thermoset vs. Thermoplastics. *Modor plastics* [online]. USA, 2017 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.modorplastics.com/plastics-learning-center/thermoset-vs-thermoplastics/>
- [26] *Micron Products: Thermoset Vs. Thermoplastic Injection Molding: A Comparison* [online]. 2017 [cit. 2019-03-26].
- [27] Application of waste bulk moulded composite (BMC) as a filler for isotactic polypropylene composites. *Journal of Advanced Research* [online]. 2016, , 380 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123216000023>
- [28] *Technologie vstřikování: Speciální technologie vstřikování plastů* [online]. 2016 [cit. 2019-03-26]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/04.html>
- [29] *MSI: What Is Thermoset Molding* [online]. 2018 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://msicarolina.com/2016/05/02/what-is-thermoset-molding/>

- [30] *Headlamp reflectors for automobile vehicles manufactured by injection molding according to the coinjection process using poly(alkylene terephthalate)*. b.r. United States. Uděleno 1984.
- [31] Plazma – efektivní nástroj pro povrchové úpravy. *Technickytydenik* [online]. Praha: Business Media CZ, s.r.o, 2014 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/plazma-efektivni-nastroj-pro-povrchove-upravy_27718.html
- [32] *Molding of BMC molding materials having improved surface properties:* <https://patents.google.com/patent/US5558943A/en>. b.r.
- [33] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340. Skriptum. VUT Brno.
- [34] *Návrh a analýza kompozitních konstrukcí* [online]. Praha, 2007 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4294044-Vlaknove-kompozitni-materialy-jejich-vlastnosti-a-vyroba.html>. Skriptum. FS ČVUT v Praze.
- [35] What is BMC. *Astar.es* [online]. b.r. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: https://www.astar.es/products/bmc-bulk-moulding-compound/what-is-bmc_15-20-en
- [36] Menzolit Menzolit® BMC 3100 Unsaturated Polyester UP. *MatWeb* [online]. b.r. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=39491ac2f6f744e680540a723e628037>
- [37] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. : il. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [38] Chopped Glas fibre. In: *HP-textiles* [online]. b.r. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://shop.hp-textiles.com/shop/en/Chopped-glass-fibre-HP-GS3.html>
- [39] *Vliv doby zrání BMC materiálů na jejich reologické a zpracovatelské vlastnosti* [online]. Zlín, 2009 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/10431>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [40] *Tetra-DUR* [online]. 2019 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <http://www.tetra->

dur.de/web/index.php?section=home

- [41] ZEMAN, Lubomír. *Vstříkování plastů: teorie a praxe*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-80-271-0614-1.
- [42] *Zkoušení plastů* [online]. Brno, 2007 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/40381569_Zkouseni_plastu. Skriptum. VUT Brno.
- [43] *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. Olomouc, b.r. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf. Skriptum. UPOL.
- [44] *Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů* [online]. 2010 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/07-BUM%20-%20mechanicke%20vlastnosti%201.pdf>. Skriptum. VUT Brno.
- [45] *ČSN EN ISO 527-1 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Základní principy*. Technor, 2012.
- [46] *Kontrolní a zkušební metody* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/>. Skriptum. UTB.
- [47] *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. Technor, 2003.
- [48] *ČSN EN ISO 179 Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Technor, 2001.
- [49] *Plasty - Stanovení tvrdosti - Část 1: Metoda vtlačením kuličky*. Technor, 2003.
- [50] *Metody a způsoby měření tvrdosti nekovových materiálů. Mmspektrum* [online]. 2012, , 18 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/metody-a-zpusoby-mereni-tvrlosti-nekovovych-materialu.html>
- [51] *Termická analýza* [online]. Praha, 2012 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>. Skriptum. VŠCHT.
- [52] *Plasty - Termogravimetrie (TG) polymerů: ČSN EN ISO 11358-1*. Technor, 2014.

- [53] *Termická analýza* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: http://agch.upol.cz/userfiles/file/Termicka_analyza%20-%20ucebni_text.pdf. Skriptum. UPOL.
- [54] Trendy v ověřování výrobků, materiálů a povrchových úprav. *Mmspektrum* [online]. 2012 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-overovani-vyrobku-materialu-a-povrchovych-uprav.html>
- [55] *ČSN ISO 291 Plasty – Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*. Technor, 2008.
- [56] *Normy: České technické normy* [online]. 2010 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.normy.cz/>
- [57] Zkušební metody pro hodnocení přilnavosti organických povlaků. *Tribotechnika* [online]. TechPark, b.r. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52013/zkusebni-metody-pro-hodnoceni-prilnavosti-organicky-povlaku.html>
- [58] Thermal Analysis. *Kutztown University* [online]. b.r. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.kutztown.edu/academics/colleges-and-departments/liberal-arts-and-sciences/departments/physical-sciences/chemistry-and-biochemistry/instrumentation/thermal-analysis.htm>
- [59] *Handbook of Thermoset Plastics* [online]. 3. 2013 [cit. 2019-05-18]. ISBN 1455731099, 9781455731091. Dostupné z: https://books.google.de/books?id=OVYXAAAQBAJ&dq=heat+sink+BMC&hl=cs&source=gbs_navlinks_s
- [60] Heat sinks made from plastics: thermal conductivity by Boron Nitride. *Technical-ceramics* [online]. 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://technical-ceramics.3mdeutschland.de/en/projects/3m-new-paths-in-design.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMPOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
ABS	akrilonitril-butadien-styren
AFS	„ <i>Adaptive Frontlighting System</i> “ – adaptivní přední světlomet
BMC	„ <i>Bulk Moulding Compound</i> “ – termoset s nepravidelně rozloženými vlákny
CAD	„ <i>Computer Aided Design</i> “ – počítačem podporované navrhování
CAE	„ <i>Computer Aided Engineering</i> “ – počítačem podporované konstruování
CFD	„ <i>Computational Fluid Dynamics</i> “ – simulace proudění
CNC	„ <i>Computer Numerical Control</i> “ – počítačem řízený obráběcí stroj
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN ISO	Česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou ISO
DSC	Diferenční skenovací kolorimetrie
DTA	Diferenční termická analýza
EPDM	ethylen-propylen pryž
FF	„ <i>Free-Form reflector</i> “ – reflektor s vícenásobnou parabolickou odrazovou plochou
GF	„ <i>Glass fibers</i> “ – skelná vlákna
LED	„ <i>Light Emitting Diode</i> “ – elektroluminiscenční dioda
LPA	„ <i>Low profile additives</i> “ – nízkoprofilové přísady zabraňující smrštění
MKP	Metoda konečných prvků (angl. zkratka FEM – „ <i>Finite Element Method</i> “)
OLED	„ <i>Organic Light Emitting Diode</i> “ – „organická světlo emitující dioda“
PA	polypropylen
PBT	polybutylentereftalát
PC	polykarbonát
PC-HT	„ <i>High heat polycarbonate</i> “ – vysoce tepelně odolný polykarbonát
PE	polypropylen
PEI	polyetherimid
PET	polyethylentereftalát
PMMA	polymethylmetakrylát

POM	polyoxymetylen
PP	polypropylen
PTE	termoplastický elastomer
PVC	polyvinylchlorid
TEA	Termoelektrická analýza
TG	Termogravimetrická analýza
TMA	Termomechanická analýza
TOA	Termooptická analýza
UV	„ <i>Ultraviolet</i> “ – ultrafialové
CaCO ₃	uhličitan vápenatý
CaO	oxid vápenatý
CO ₂	oxid uhličitý
SiO ₂	oxidu křemičitého

Symbol	Popis	Jednotka
E ₁	osvětlenost	[lux]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
E _c	energie absorbovaná při přeražení zkušebního vzorku	[J]
F	velikost působící síly	[N]
F _r	redukované zkušební zatížení	[N]
F ₀	počáteční zatížení	[N]
HB	tvrdost metodou vtlačení kuličky	[N · mm ⁻²]
I	svítivost	[cd]
ΔL	poměrném prodloužení zkušebního vzorku	[mm]
L	rozteč mezi podpěrami zkušebního zařízení	[mm]
L ₀	počáteční měřená délka zkušebního tělesa	[mm]
M	hmotnost vzorku ve vzduchu	[g]
M ₀	ohybový moment	[MPa]
N	hmotnost v kapalině ke stanovení hustoty (voda)	[g]
S ₀	počáteční průřez zkušebního tělesa	[mm ²]
V	objem	[mm ³]

W	modul průřezu zkušební vzorku	$[\text{mm}^2]$
a_{cU}	rázová houževnatost metodou Charpy	$[\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}]$
b	šířka zkušební vzorku;	$[\text{mm}]$
d	průměr vtlačované kuličky.	$[\text{mm}]$
h	tloušťka zkušební vzorku;	$[\text{mm}]$
h_r	redukovaná hloubka vtažení;	$[\text{mm}]$
k	konstanta přídatku materiálu na přetoky při lisování	$[-]$
l	délka zkušební vzorku	$[\text{mm}]$
m_1, m_2, m_3	úbytek hmotnosti	$[\text{hm. \%}]$
p	lisovací tlak	$[\text{MPa}]$
ε	poměrné prodloužení	$[\text{mm}]$
ρ	hustota	$[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$
ρ_0	hustota kapaliny (vody) ke stanovení hustoty	$[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$
σ	tahové/ohybové napětí	$[\text{MPa}]$
σ_b	napětí při přetržení	$[\text{MPa}]$
σ_{fB}	napětí v ohybu při přetržení	$[\text{MPa}]$
σ_{fC}	napětí v ohybu při konvenčním vychýlení	$[\text{MPa}]$
σ_{fM}	mez pevnosti v ohybu	$[\text{MPa}]$
σ_m	mez pevnosti	$[\text{MPa}]$
σ_y	modul pružnosti v ohybu	$[\text{MPa}]$
σ_y	napětí na mezi kluzu v tahu	$[\text{MPa}]$