

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VYSOCE PEVNÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO TEPELNÉ IZOLACE
HIGH-STRENGTH COMPOSITE MATERIALS FOR THERMAL
INSULATION

AUTOR: Jan Myslivec
STUDIJNÍ PROGRAM: TZSI
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Myslivec** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **475012**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vysoce pevné kompozitní materiály pro tepelné izolace

Název bakalářské práce anglicky:

High-strength composite materials for thermal insulation

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je posouzení kvality kompozitů před a po teplotní expozici.

1. Literární rešerše v problematice kompozitních materiálů.
2. Návrh metodického přístupu k řešení problematiky.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení a zpracování naměřených dat.
5. Diskuse a závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Bohumil Meissner, Václav Zilvar. Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. Praha: SNTL, 1988.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity. Praha: SNTL, 1987. ISBN 04-216-87.
- [3] Gottfried W. Ehrenstein. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2006.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Elena Čižmárová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

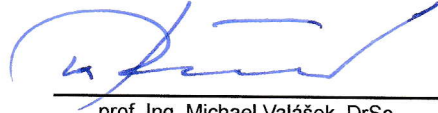
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

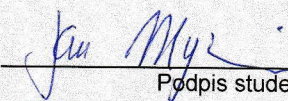

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26. 05. 2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

Podpis:

Anotace

Tato práce pojednává o kompozitních materiálech pro vysokoteplotní aplikace. Zabývá se simulací stárnutí polymerních kompozitních materiálů, tzv. umělým stárnutím a problematikou vyhodnocování mechanických vlastností ve stavech před a po teplotní expozici. Součástí práce je obecné seznámení s kompozitními materiály, jejich rozdělení a výroba. Hlavním tématem jsou však mechanické zkoušky kompozitních materiálů, které byly v rámci práce provedeny a vyhodnoceny.

Klíčová slova

kompozitní materiály, umělé stárnutí, tepelná degradace, mechanické vlastnosti

Annotation

This bachelor's thesis deals with composite materials suitable for high temperature application. It concerns simulation of polymer based composite ageing, also known as accelerated thermal ageing, and issues about assessment of mechanical properties of those materials before and after thermal exposition. It includes an explanation of composite materials in general, their sorting and technologies of production. However, key focus is an analysis of mechanical properties of composite materials.

Keywords

composite materials, accelerated thermal ageing, thermal degradation, mechanical properties

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí mé práce Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. za odborný dohled, cenné rady a připomínky při vypracování této práce a trpělivost, vstřícnost a čas, který věnovala konzultacím. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Plačkovi, Ph.D. z ÚJV Řež, a. s. za objasnění teoretických skutečností a cenné připomínky z praxe. V neposlední řadě patří mé poděkování firmě ISOMA, s. r. o. které připravila a dodala zkušební materiály.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Teoretická část	9
2.1. Obecná charakteristika kompozitů	9
2.2. Rozdělení kompozitů	11
2.2.1. Rozdělení podle disperzní fáze	11
2.2.2. Rozdělení podle rozměru výztuže.....	11
2.2.3. Rozdělení podle tvaru výztuže	12
2.2.4. Rozdělení podle materiálu výztuže	18
2.2.5. Rozdělení podle materiálu matrice	20
2.3. Technologie výroby kompozitů	23
2.4. Zatěžování kompozitů	25
2.5. Teplotní degradace kompozitů	26
2.6. Umělé stárnutí	27
3. Experimentální část	29
3.1. Použité materiály	29
3.1.1. Delmat Epoxy 68660	30
3.1.2. Durapol F200 SMC	31
3.1.3. Pamitherm 41140.....	32
3.1.4. Vetronit G11	33
3.2. Metodika určení mechanických vlastností.....	34
3.2.1. Určení parametrů umělého stárnutí	34
3.2.2. Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 527-4.....	40
3.2.3. Zkouška ohybem dle ČSN EN ISO 178.....	41
3.2.4. Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179-1	43
3.2.5. Výběrová směrodatná odchylka měření.....	44
3.3. Vyhodnocení a zpracování naměřených dat	44
3.3.1. Delmat Epoxy 68660	45
3.3.2. Durapol F200 SMC	50
3.3.3. Pamitherm 41140.....	55
3.3.4. Vetronit G11	60
3.4. Diskuse experimentálně určených hodnot mechanických vlastností	65
4. Závěr	68
5. Seznam citovaných zdrojů	69

1. Úvod

Kompozitní materiály se považují za nejpokrokovější materiály dnešní doby. Původní vojenská použití za druhé světové války podnítila v široké míře jejich komerční aplikace koncem 40. a začátkem 50. let minulého století zejména v lodním průmyslu. Dnes je na kompozitních materiálech závislý zejména letecký a automobilový průmysl, z kompozitních materiálů se čím dál více vyrábějí sportovní potřeby a výjimku netvoří ani použití kompozitů jako konstrukčních prvků. [1]

Věhlas kompozitních materiálů stojí na pomyslných pilířích, kterými jsou nízká hmotnost, atraktivní cena, variabilita, mechanické vlastnosti atd. Všechny zmíněné výhody souvisí se základní definicí kompozitů, která říká, že kompozit je takový materiál, který je zhotoven ze dvou či více různých fází. Nastává tedy situace, kdy je možné kombinovat například lehké a levné plasty s různě mechanicky odolnými vlákny. Výsledkem je materiál, který má nižší hmotnost, lepší mechanické vlastnosti a v případě velkosériové výroby je levnější, než kdyby měl být takový materiál zhotoven z materiálu výztuže v kompaktní formě.

S kompozitními materiály se čím dál víc experimentuje, a z toho důvodu se kompozity dostávají i do oblastí tepelné, případně elektrické izolace. Jedná se například o polymerní materiály vyztužené skleněnými vlákny nebo slídou. Důvody proč používat kompozity, když dodnes fungují izolační materiály na bázi polymerů nebo minerálních vat opět souvisí hlavně s variabilitou jejich mechanických i fyzikálních vlastností, nízkou hmotností, ale navíc jsou skloňovány i přednosti jako například nehořlavost, samozhášivost, nízká absorpce vody, snadná obrobitelnost atd.

Nejen materiály však postupem času stárnou a stávají se méně kvalitními. Cílem této práce je posoudit kvalitu kompozitních materiálů pro tepelné izolace před a po teplotní expozici. Jelikož jsou mechanické vlastnosti při vystavování určité teplotě garantovány na desítky tisíc hodin, pro laboratorní zkoumání je zapotřebí děj tepelného stárnutí zkrátit. Tomu se obvykle docílí zvýšením teploty. Dochází k tzv. umělému stárnutí, které s určitou rezervou nasimuluje, co se s materiálem stane po dobu jeho vystavování garantované, zpravidla nižší teplotě ve skutečnosti. [2]

2. Teoretická část

2.1. Obecná charakteristika kompozitů

Kompozitem je nazýván takový materiál, který je složen ze dvou nebo více složek, respektive fází, které se obvykle liší v chemickém složení, fyzikálních a mechanických vlastnostech. Obecně se jedná o matici a disperzní fázi (výztuž, plnivo). Za výztuž se v kompozitním materiálu považuje ta fáze, která je diskontinuální, tedy nespojitá a vykazuje podstatně lepší mechanické vlastnosti (tvrdost, tuhost, pevnost) než matrice, která je spojitá v celém objemu a je obvykle poddajnější. [3]

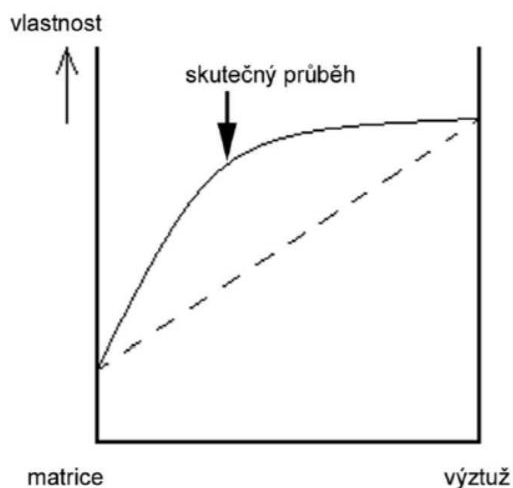
Podmínky při definování kompozitu

Za hlavní podmínku při definování kompozitu se považuje vícefázové složení materiálu, existují však i další podmínky, které musí být splněny, aby se materiál mohl považovat za pravý kompozit. Například podmínka o alespoň 5% podílu diskontinuální složky (výztuže) v materiálu. Navzdory splnění podmínky o vícefázovém složení se za pravé kompozity tím pádem nemohou považovat například plasty, které obsahují malé množství aditiv, maziv a pigmentů, právě proto, že podíl těchto zmíněných složek v materiálu není alespoň 5 %. Další podmínka definuje přípravu kompozitních materiálů, které se zužuje pouze na mechanické mísení složek. Proto ani slitiny kovů, ve kterých došlo při tepelném zpracování k vyloučení podstatně tvrdší fáze, se nedají považovat za kompozity. Naopak například hliníková slitina, zpevněná částicemi Al_2O_3 (oxidu hlinitého), k jejíž výrobě došlo technologií práškové metalurgie, je pravý kompozit, protože je splněna jak podmínka fázová, tak podmínka o podílu diskontinuální složky, a nakonec i podmínka o způsobu výroby. [4]

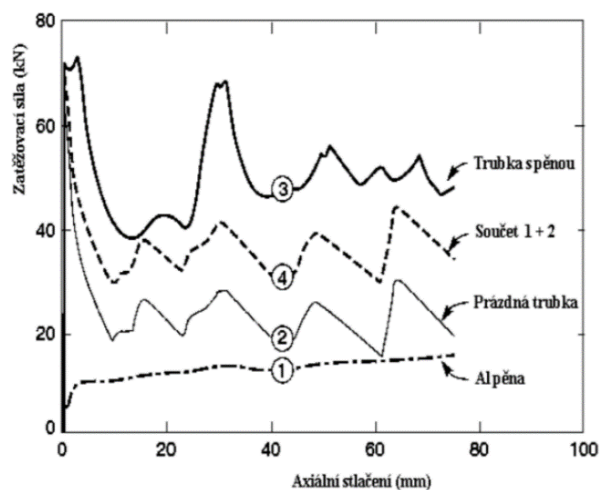
Synergismus

Základem synergismu je sečtení vlastností všech složek a fází, z nichž se bude kompozit skládat. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou zpravidla lepší, než by odpovídalo pouhému poměrovému sečtení vlastností dílčích složek. U kompozitních materiálů je výhodné, aby byl synergický efekt co možná nejvýraznější. Ke znázornění synergického efektu nejlépe poslouží *obr. 1*, kde je čárkovanou čarou zobrazen průběh součtu dané vlastnosti matrice a výztuže a plná křivka zobrazuje skutečný průběh dané vlastnosti

kompozitního materiálu. Stejně tak obr. 2 znázorňuje nejprve určitou vlastnost dílčích složek, dále součet těchto vlastností a skutečný průběh změřený na kompozitním materiálu složeného ze dvou zmíněných složek. [8]



Obr. 1 – Znázornění synergického efektu v kompozitním materiálu. [8]



Obr. 2 – Příklad synergického efektu v kompozitní sktruktuře z hliníkové pěny, kterou je vyztužena tenkostěnná hliníková trubka. [8]

Matrice

Matrice je obvykle poddajnější prvek kompozitního materiálu, který je spojený v celém objemu. Hlavním úkolem matrice je zajistit soudržnost celého kompozitu, vlákna mají v matici pevnou pozici. Dále matrice zajišťuje přenos vnějšího zatížení na zpevňující vlákna a chrání je například před korozí, oxidací či mechanickým poškozením. [4]

Matrice má obecně nízkou hmotnost a určuje další vlastnosti celého kompozitu, jako je teplotní a chemická odolnost, odolnost proti stárnutí, elektrické vlastnosti nebo smrštění při vytvrzování. Základní požadavek na materiál matrice je takový, že se při působení vnějších sil nesmí porušit dříve než výztuž. [4]

Výztuž

Výztuž je diskontinuální, nespojitá fáze kompozitu, která je obecně pevnější, tužší a tvrdší než matrice. Hlavní funkcí výztuže je přenos zatížení, dále také vyztužení materiálu a zlepšení mechanických vlastností. [4]

2.2. Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály se dělí podle mnoha kritérií, mezi které patří typ disperzní fáze, rozměr výztuže, tvar výztuže, materiál výztuže a materiál matrice. [12]

2.2.1. Rozdělení podle disperzní fáze

Každý kompozit se skládá ze spojitě fáze – matrice, která drží materiál pohromadě. zbylé fáze jsou nespojitě a v matrici jsou rozptýleny – dispergovány, a proto se označují jako disperze. [8]

Kompozity prvního typu

Jedná se o materiály, které mají disperzi tvořenou alespoň jednou pevnou fází. Tyto materiály mají v technické aplikaci nejširší využití. [8]

Kompozity druhého typu

Takové kompozity mají disperzi tvořenou alespoň jednou kapalnou fází. Nejčastěji se jedná o otevřené, nebo uzavřené pórovité struktury, které jsou vyplněny kapalinou – např. olejem. Typickým příkladem kompozitu druhého typu v technické praxi je samomazné ložisko. [8]

Kompozity třetího typu

Jedná se o všechny kompozity s plynou disperzní fází. V praxi se jedná například o pěnový polystyrén, případně různé druhy kovových pěn. [8]

2.2.2. Rozdělení podle rozměru výztuže

Makrokompozity

Kompozitní materiály, u kterých se průřez výztuže pohybuje řádově od jednotek do stovek mm. Takové materiály se využívají především ve stavebnictví a typickým příkladem je železobeton. [10]

Mikrokompozity

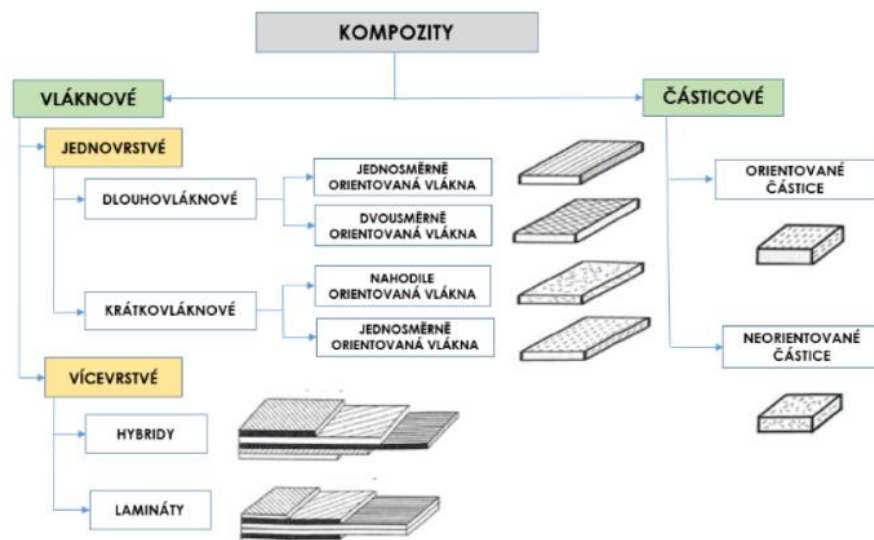
Výztuž má průměr řádově od jednotek do stovek μm . Jedná se o nejrozsáhlejší skupinu kompozitů a v průmyslu mají největší význam. Takové materiály často dosahují velkého měrného modu (E/ρ) a velké měrné pevnosti (σ_{pt}/ρ). [10]

Nanokompozity

Rozměr výztuže nanokompozitů se pohybuje v řádu desítek nanometrů. Nejčastěji se jako materiál k jejich výrobě používá celulóza a keratin. Výjimkou však nejsou ani keramika a sklo. Kompozity zhotovené ze skleněných a keramických nanovláken se používají jako bioaktivní materiál sloužící k náhradě kostí. [11]

2.2.3. Rozdělení podle tvaru výztuže

Výztuž se v kompozitu vyskytuje buď v podobě částic různého tvaru, nebo v podobě vláken o různých délkách. Obě podskupiny se dále dělí podle tvaru, délky a uspořádání vláken. V případě vícevrstevných kompozitů se uvažuje i povaha kladení jednotlivých vrstev. Rozdělení je graficky znázorněno na obr. 3. [4]



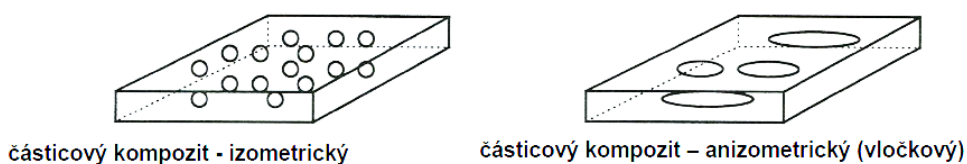
Obr. 3 – Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru jejich nosné části. [13]

Samostatnou a velmi čtou skupinu vedle částicových a vláknových kompozitů tvoří sendvičové kompozity, které jsou charakteristické slepením nebo svařením dvou tenkých, pevných vrstev spolu s lehkým, často dutým jádrem. Tyto kompozity se vyznačují právě svou nízkou hmotností, vynikající ohybovou pevností a tuhostí a skvělými izolačními vlastnostmi. Mají však i své nežádoucí vlastnosti v podobě rizika ztráty stability při tlakovém namáhání a vysoké hořlavosti z důvodu tenkých vrstev materiálu a velkému množství vzduchu ve struktuře. [5]

Částicové kompozity

Za částicovou výztuž se považují kuličky, destičky, trubičky a obecně všechny tvary, u nichž rozměr v jednom směru výrazně nepřesahuje rozměry ve směrech ostatních. [6]

Částice jako takové se dále dělí podle svého tvaru na izometrické, které se pro lepší ilustraci dají chápat jako kuličky, a anizometrické, které svým plochým tvarem připomínají vločky. Pro reprezentaci uvedených tvarů nejlépe poslouží obr. 4. [7]



Obr. 4 – Tvar částicové výztuže. [7]

Hlavním přínosem výztuže v podobě částic je lepší tepelná odolnost, útlum vibrací, nebo elektrická vodivost. Zajímavým záměrem použití částicových kompozitů je také ekonomický aspekt. Do řady drahých materiálů lze totiž během jejich zpracování přimíchat částice v podobě prášku, který je mnohem levnější. Konkrétně se přimíchává například křemen, korund, mastek a kaolin, zmíněným drahým materiálem jsou často polymery. [8]

Při výrobě částicových kompozitů je nutné věnovat pozornost rovnoměrnému rozložení výztuže v matrici. Pevné částice v roztavené matrici mají vlivem jejího tuhnutí tendenci shlukovat se. Pro správný výsledek je tedy důležité, aby byla směs při tuhnutí stále promíchávána. [8]

Typickým příkladem částicových kompozitních materiálů ve strojírenské praxi jsou slinuté karbidy, z nichž jsou metodou práškové metalurgie vyráběny řezné nástroje. [9]

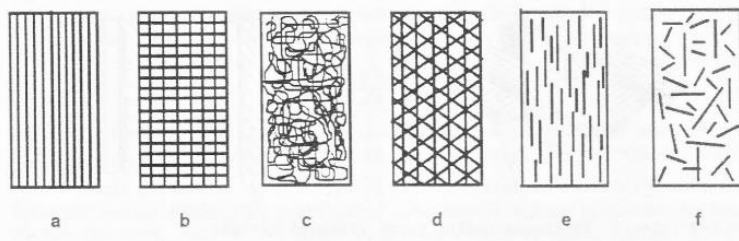
Vláknové kompozity

V případě, že je výztuž v kompozitním materiálu v jednom směru rozměrnější než ve druhém, tak se jedná o vláknové kompozity.

Vlákná v kompozitech se rozdělují na dlouhá (spojitá) a krátká (nespojité). Hranice mezi krátkými a dlouhými vlákny není charakterizována jejich délkou, nýbrž jejich uložením ve výrobku. Dlouhá vlákna jsou totiž charakteristická tím, že začínají a končí zpravidla na okrajích výrobku, nebo jeho části (myšlena např. díra). Naopak za krátká vlákna se považují ta, která jsou přerušena. [4]

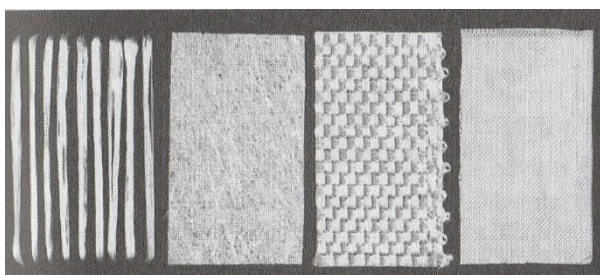
Délka vláken výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu, největší účinek mají dlouhá vlákna, ta se však ne vždy dají z technologických nebo jiných důvodů použít. Typickým příkladem technologie, která je schopná fungovat pouze s krátkými vlákny, případně částicemi, je technologie vstřikování. [10]

Jednotlivá vlákna mají v kompozitu své uspořádání, které se uvažuje vždy v jedné vrstvě vláken. Základní příklady uspořádání jsou uvedeny na obr. 5. Dlouhá vlákna mohou být uspořádána jednosměrně – jednoosá orientace (a), do tkaniny – dvouosá orientace (b), do rohože – nahodilá orientace (c), případně s pravidelnou orientací ve více osách (d). Krátká vlákna se z hlediska orientace dělí na jednosměrně (e) a nahodile (f) orientovaná. [3]



Obr. 5 – Struktura vláken v kompozitu. [3]

Jednotlivá výztužná vlákna se ovšem samostatně používají jen velice zřídka. Ze zpracovatelských důvodů se do matrice aplikují upravené produkty, vyrobené z jednotlivých vláken. Základní druhy uspořádání vláken jsou k vidění na obr. 6, jedná se o (zleva) pramenec, rohož, tkaninu z pramenců a tkaninu z vláken. [10]



Obr. 6 – Nedůležitější typy sklovláknitých výztuží. [10]

Příze – Vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky. [10]

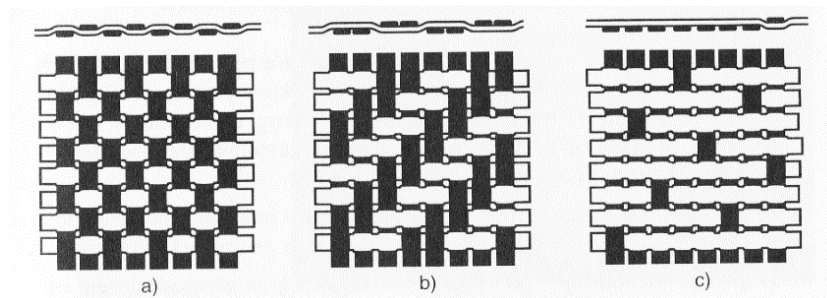
Nitě – Skládají se z jedné, nebo více přízí, které jsou společně spředeny. [10]

Roving (pramenec) – Z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken se skládá pramenec neboli roving. [10]

Spředený roving – Vyrábí se stejným způsobem jako roving, akorát z vláken stočených kolem své podélné osy. [10]

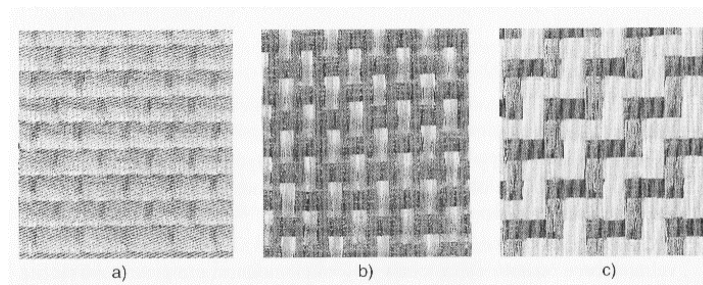
Rohože – Jejich výroba spočívá v nepravidelném uložení vláken, jejich prostříkání pojivem a následným vysušením. Vyrábí se rohože ze sekaných pramenců, rohože z kontinuálních vláken a povrchové rohože. [10]

Tkaniny – Pravidelným uspořádáním vláken nebo pramenců ve dvou směrech vznikají tkaniny. Jak už název napovídá, jedná se o tkané plošné výrobky. Tkaniny jsou tím pádem vyztuženy do dvou směrů, které jsou uloženy pravoúhle. Takto pravoúhle uloženým vláknům, respektive pramencům se říká osnova a útek. Tkaniny se dále rozdělují podle toho, jaká vazba byla použita k jejich zhotovení, k běžně používaným vazbám patří plátňová (a), keprová (b) a atlasová (c) – viz. obr. 7. [10]



Obr. 7 – Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [10]

Tkaniny mají různou skladbu vláken v osnově a útku (obr. 8). Jednosměrné tkaniny (a) mají osnovu a útek ze stejných vláken, vlákna v útku podporují vlákna v osnově a zvyšují tím výsledný efekt. U směsné tkaniny (b) jsou v osnově a útku použity různé druhy vláken, útek je zpravidla tvořen levnějšími vlákny, s horšími výztužnými vlastnostmi, protože v jeho směru nejsou požadovány tak dobré mechanické vlastnosti, jako ve směru osnovy. Posledním druhem z hlediska skladby vláken jsou tkaniny hybridní (c), kde se vlákna v osnově a útku vybírají podle rozdílných požadavků v daných směrech. Například v jednom směru je vyžadována tuhost a ve druhém rázová houževnatost. [10]



Obr. 8 – Tkaniny s různou skladbou vláken v osnově a útku. [10]

Použití vláknových kompozitů jako konstrukčního materiálu vychází ze čtyř následujících paradoxů, na které se nesmí při dimenzování nikdy zapomenout. [10]

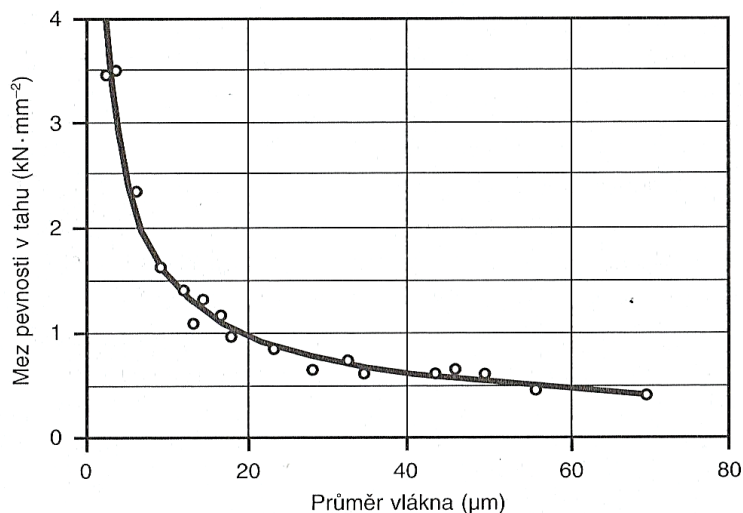
Paradox kompozitního materiálu – Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně. (G. Slayter). Tento paradox platí však jen u zatížení tahem. Při zatížení tlakem, ohybem, nebo smykem nemohou jednotlivé složky kompozitu samy o sobě převzít svůj podíl na přenosu porušujících sil, z důvodu narušení geometrického uspořádání výztuže v matici. [10]

Paradox pevného materiálu – Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky. (F. Zwicky). Porovnání teoretických a naměřených hodnot E-modulu a meze pevnosti jednotlivých materiálů jak v kompaktní, tak ve vláknové formě nabízí tab. 1. V níže uvedené tabulce je mimo jiné i porovnání kompaktní a vláknové formy materiálu, což úzce souvisí s následujícím paradoxem. [10]

Tab. 1 – Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot E-modulu a meze pevnosti v tahu některých konstrukčních materiálů. [10]

Materiál	E-modul ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)			Mez pevnosti v tahu ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)		
	teoretický	naměřený		teoretická	naměřená	
		Vláknó	Kompaktní hmota		Vláknó	Kompaktní hmota
Polyetylen	300 000	100 000 (33%)	1 000 (0,33%)	27 000	1 500 (5,5%)	30 (0,1%)
Polypropylen	50 000	20 000 (40%)	1 600 (3,2%)	16 000	1 300 (8,1%)	38 (0,24%)
Polyamid	160 000	5 000 (3%)	2 000 (1,3%)	27 000	1 700 (6,3%)	50 (0,18%)
Sklo	80 000	80 000 (100%)	70 000 (87,5%)	11 000	4 000 (36%)	55 (0,5%)
Ocel	210 000	210 000 (100%)	210 000 (100%)	21 000	4 000 (19%)	1 400 (6,67%)
Hliník	76 000	76 000 (100%)	76 000 (100%)	7 600	800 (10,5%)	600 (7,89%)

Paradox vláknité struktury – *Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší.* (A. A. Griffith). Uvedený výrok má vcelku jednoduché vysvětlení. Vlákna v mikrokompozitech dosahují průměrů v řádech jednotek až stovek μm , což mimochodem přibližně odpovídá průměru lidského vlasu. Jejich příčný průřez a plocha povrchu je tedy velmi malá. Například v porovnání s tyčkou o průměru 10 mm a délce 100 mm má vlákno o průměru 50 μm se stejnou délkou jako zmíněná tyčka přibližně 40 000krát menší příčný průřez a 200krát menší plochu povrchu. Díky těmto rozdílům se snižuje riziko vrozených i povrchových vad materiálu a tím se zvyšuje jeho pevnost. Závislost meze pevnosti v tahu na průměru vlákna je zřetelná z *obr. 9* a rozdíly hodnot oproti kompaktní formě jsou zaznamenány v *tab. 1* v předešlém odstavci. [10]



Obr. 9 – Vliv průměru skleněného vlákna na jeho pevnost. [10]

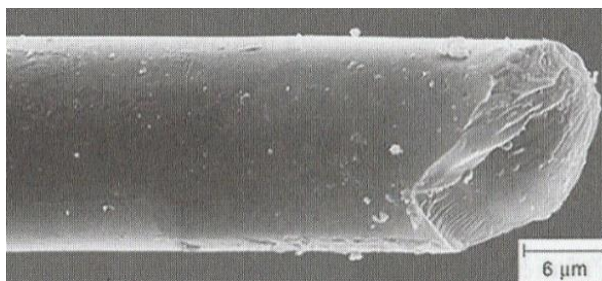
Paradox délky zatížení – *Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím větší je jeho naměřená pevnost.* (A. A. Griffith). S rostoucí délkou zatíženého vlákna klesá jeho pevnost. Tuto skutečnost vysvětluje úplně stejná příčina, jako v případě průměru vlákna. Opět se jedná o výskyt vad materiálu, které v případě prodlužování zatěžované části budou nabývat větších rozměrů, a i do počtu jich bude více, než když je zatěžovaná délka malá. Výhodou rovnoměrného rozmístění vláken v matrici se jejich jednotlivé délky zatížení blíží k nule, právě proto, že se zatížení rozprostře do celého objemu kompozitu. Místní poruchy vláken se tedy projevují mnohem méně a pevnost jednotlivých vláken je tím pádem lépe využita. [10]

2.2.4. Rozdělení podle materiálu výztuže

Výztuž v kompozitech je z hlediska konkrétního materiálu nejčastěji skleněná (v cca 80 % vláknových kompozitů), dále pak přírodní, polymerní, kovová, keramická, sklokeramická, uhlíková, čedičová či borová. [4]

Skleněná vlákna

Takzvaná textilní skleněná vlákna jsou jednou z možností výztuže vláknových kompozitů. Sklovinu tvoří přechlazená tavenina směsi oxidů Si, Al, Ca, B a Mg. Jak je patrné z obr. 10, tento typ vlákna má zpravidla kruhový příčný průřez, jehož průměr se pohybuje od 3,5 do 24 μm . [10]



Obr. 10 – Skleněné vlákno pod rastrovacím elektronovým mikroskopem. [10]

Podle vlastností se skloviny, z nichž se textilní skleněná vlákna vyrábí, dále dělí na následující skupiny. Vlákna vyráběná z E-skloviny (elektrické) jsou skvělými elektrickými izolanty a zároveň mají vynikající propustnost záření. Tato skupina je dominantní, jedná se o na trhu nejčastěji používanou sklovinu pro výrobu textilních skleněných vláken se zastoupením cca 90 %. Zvýšením podílu oxidů křemíku, hořčíku a hliníku v tavenině se získá směs pro výrobu vláken s vyšší pevností, řádově se jedná o 40–70% nárůst pevnosti v porovnání s vlákny z E-skloviny. Sklovina na výrobu tohoto typu vlákna má na světovém trhu 3 označení. V Evropě se hovoří o R-sklovině (resistence = odolnost), v USA se používá označení S-sklovina (strength = síla) a v Japonsku T-sklovina. Další skupiny vláken vykazují zpravidla odolnost vůči určitým chemikáliím. C-sklovina a ECR-sklovina jsou vysoce odolné vůči kyselinám a agresivním látkám, AR-sklovina naopak vykazuje odolnost vůči alkáliím. [10]

Skleněná vlákna jsou izotropní, což obecně znamená, že jejich materiálové vlastnosti jsou v příčném i podélném směru totožné. Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je v porovnání s ocelí asi třetinový a odpovídá přibližně modulu pružnosti v tahu

hliníku. Hodnota meze pevnosti v tahu je podstatně vyšší než u většiny organických i neorganických vláken a je vyšší i v porovnání s ocelí, což je velké plus s ohledem na podstatně nižší hustotu a tím pádem i hmotnost. I v případě tepelných vlastností se skleněná vlákna řadí na nejvyšší příčky. Jedná se o nehořlavé a ohnivzdorné materiály. Ani dlouhodobé tepelné namáhání při teplotách až 250 °C nezhoršuje mechanické vlastnosti. [10]

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se nejčastěji vyrábí v průměrech 5 až 8 μm , vyznačují se vynikajícími mechanickými vlastnostmi, zejména vysokou pevností a modulem pružnosti a zároveň mají velmi nízkou hustotu. Jsou odolná vůči dlouhodobému dynamickému zatěžování, touto vlastností se vyzdvihují nad všechny ostatní konstrukční materiály včetně ocele a hliníku. Naopak jsou křehká, drahá a nad 400 °C intenzivně oxidují. Dále jsou charakteristická pro svou korozivzdornost, dobrou elektrickou i tepelnou vodivost a v neposlední řadě inertnost vůči lidské tkáni. Uhlíková vlákna jsou silně anizotropní, modul pružnosti i pevnost mají mnohonásobně vyšší hodnoty ve směru hlavní osy než kolmo na ni. Velice zajímavý vliv má anizotropie na součinitele teplotní roztažnosti. Vlákna se s rostoucí teplotou ve směru hlavní osy nepatrně zkracují, naopak ve směru kolmo na hlavní osu se výrazně roztahují. [10]

Na trhu se uhlíková vlákna dělí do 4 základních skupin podle svých předních mechanických vlastností na velmi vysokopevnostní UHS (ultra high strength), vysokopevnostní HS (high strength), velmi vysokomodulová UHM (ultra high modulus) a HM (high modulus). [6]

Slídový papír

Pojmem slída se označuje skupina minerálů, která má vynikající štěpitelnost. Důvodem této štěpitelnosti je silikátová vrstevnatá mřížka. Slída se těží v dolech a dále se z ní vyrábí slídový papír na bázi muskovitu nebo phlogopitu. Mezi hlavní přednosti tohoto typu výztuže patří vynikající elektrická a tepelná izolační vlastnosti a mechanická stabilita za vysokých teplot. [14]

2.2.5. Rozdělení podle materiálu matrice

Z hlediska samotného materiálu matrice mají nejčastější zastoupení polymery. Vedle polymerních matric existuje řada jiných, méně zastoupených, mezi které patří například kovové, uhlíkové, skleněné a keramické matrice. [4]

Polymerní matrice (PMC)

Výroba kompozitů s polymerní matricí začala už v období druhé světové války, kdy se z podobných materiálů stavěly kryty pro vojenské letouny. Konkrétně byla nejvíce používána polyesterová pryskyřice vyztužená skleněnými vlákny. Využití skvělých mechanických vlastností tohoto materiálu však přišlo až o pár dekád později, kdy se začal čím dál častěji používat právě jako konstrukční. [4]

Mezi hlavní výhody polymerní matrice patří malá hustota a tím pádem i hmotnost, dále chemická odolnost a korozivzdornost a dobré dielektrické vlastnosti, v mnoha případech elektrická nevodivost. Porovnání vlastností kompozitu s polymerní matricí a samotného polymeru s technickými materiály je nastíněné v tab. 2. [3]

Tab. 2 - Porovnání vlastností sklolaminátu s technickými materiály [19]

Materiál	Hustota [g/cm ³]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Sklolaminát *	2,10	1000 + 1400	45 000
Ocel	7,85	400 + 1200	210 000
Hliník	2,70	180	70 000
Polyvinylchlorid (PVC)	1,38	45 + 65	3 500

* Vlastnosti lze měnit typem a skladbou výztuže, poměrem množství výztuže a pryskyřice, včetně jejího typu.

Z větší části se jako materiál matrice volí reaktivní pryskyřice, které patří do skupiny reaktoplastů, různé aplikace však vyžadují použití na výrobu náročnějších termoplastů, a to z důvodu jejich vlastností. [10]

Viskozita reaktivních pryskyřic je řádově desetkrát, někdy až tisíckrát nižší než viskozita termoplastů, proto jsou reaktoplasty pro výrobu kompozitních materiálů výhodnější, snadněji se zpracovávají, snadněji smáčejí a lépe prosycují vlákna. V případě termoplastů jsou energetické nároky na výrobu mnohem vyšší, protože výroba probíhá za podstatně vyšších teplot než u reaktoplastů, zároveň zde však figuruje omezení teplotou rozkladu termoplastů. [10]

Po prosycení vláken reaktivní pryskyřicí vždy následuje proces vytvrzování, případně s přidáním katalyzátoru a urychlovače. Takto získaný kompozit dosahuje vysokých

hodnot pevnosti a tuhosti, je ovšem velice křehký. V případě požadavků na lepší houževnatost následuje další proces úprav pomocí modifikačních přísad. [10]

Výhody termoplastové matrice spočívají především ve skvělé houževnatosti a také ve skutečnosti, že výroba spočívá pouze v roztavení materiálu na určitou teplotu, kdy dojde k prosycení výztuže a následnému ztuhnutí. Tato technologie s sebou nenese žádný chemický proces, který by jakýmkoliv způsobem mohl ovlivnit jakost výsledného kompozitu. Rozdílné je také chování při dosažení teploty skelného přechodu, reaktoplasty jsou na této teplotě méně závislé, naopak termoplasty výrazně měknou. [10]

Nejpoužívanějšími materiály matrice ze skupiny reaktoplastů jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP), ze skupiny termoplastů pak polypropyleny (PP) a polyamidy (PA). Reaktoplasty a aromatické termoplasty se využívají zejména pro svou vysokou teplotní odolnost a tvarovou stálost při vysokých teplotách. [4]

Polyesterové pryskyřice – Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou levné, spolehlivé a mnohostranně použitelné. Vyznačují se velkou variabilitou při zpracování, z důvodu možnosti volby obsahu jednotlivých složek (styren, katalyzátor, urychlovač). Při zpracování u nich dochází k velkému smrštění (až 8 %). Mají dobrou odolnost proti povětrnosti, ale částečně neodolávají alkalickému namáhání a působením styrenu kladou velké nároky na životní prostředí. [10]

Vinylesterové pryskyřice – Jsou ve srovnání s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi houževnatější a dražší. Mají podobnou variabilitu, také z důvodu dávkování styrenu a urychlovače. Jsou korozivzdorné, to je hlavní důvod jejich převážné aplikace v agresivních prostředích. Stejně tak jako nenasycené polyesterové pryskyřice kladou kvůli styrenu velké nároky na životní prostředí. [10]

Epoxidové pryskyřice – Ze zmíněných materiálů jsou nejdražší. Mají velmi dobré mechanické vlastnosti, zejména při dynamickém namáhání, dobrou adhezi k široké škále povrchů, dají se tedy použít jako lepidla. Chemická odolnost epoxidových pryskyřic je závislá na druhu tvrdidla a dá se tedy výrobou ovlivnit, nejčastěji jsou vyvolány vlastnosti jako odolnosti proti kyselinám, alkáliím, nebo horké vodě. Nejpřednější výhodou je v rozsahu tepelné odolnosti, kde epoxidové pryskyřice vynikají. Je tomu tak z důvodu vysoké teploty skelného přechodu, která se pohybuje nad hodnotou 200 °C. Při zpracování epoxidových pryskyřic může dojít k podráždění kůže a alergickým reakcím. [10]

Fenolické pryskyřice – Málo zastoupené, avšak vysoce teplotně a chemicky odolné skupiny z oblasti reaktoplastů jsou fenolické pryskyřice, bismaleimidy (BMI) a polyimidy (PI). Fenolické pryskyřice jsou vysoce odolné vůči hoření a pokud chytanou, tak jsou unikátní v produkci kouře. Teplotní odolnost je u fenolických pryskyřic až 280 °C za sucha, mechanické vlastnosti jsou však horší. [10]

Bismaleimidy – Používají se zejména v leteckém průmyslu na vstupní součástky motorů a části křídel. Pracovní teploty dosahují 230 °C ve vlhku a až 250 °C v suchu. Ještě větší teplotní odolnost, než bismaleimidy mají polyimidy, ve vlhku do 250 °C, v suchu až do 315 °C. Používají se zejména pro vnitřní součástky tryskových motorů a jejich cena je extrémně vysoká. [16]

Kovová matrice (MMC)

Hlavní předností kovových matic je teplotní odolnost, která je vyšší než u polymerních matic. Oproti kovům disponují kompozity s kovovou maticí vyšší pevností a tuhostí. Z hlediska konkrétních prvků se nejčastěji používá hliník, hořčík, titan, nikl a kobalt, případně jejich slitiny. Vedle teplotní odolnosti jsou kovové matrice používány pro svoji tuhost, pevnost a odolnost vůči únavě. [17]

Uhlíková matrice (CaMC)

Kombinací uhlíkové matrice s uhlíkovými vlákny vzniká tzv. C-C kompozit, který je charakteristický zejména svou teplotní odolností. Jedná se o jediný materiál, který je schopen dlouhodobě vzdorovat teplotám 1 700 – 2 200 °C. Od 500 °C je nutné použít ochranu proti oxidaci uhlíku v podobě povrchové vrstvy z křemíku, ušlechtilých kovů, případně keramiky. C-C kompozity mají navíc nízkou hustotu, tudíž i hmotnost, dobré mechanické vlastnosti včetně lomové houževnatosti a nízkou teplotní roztažnost. Využívají se zejména pro součásti raketoplánů a brzdné ústrojí letadel a závodních vozů Formule 1. [18]

Keramická matrice (CeMC)

Tvrdé materiály vyrobené z vysoce čistých oxidů, nitridů, karbidů nebo boridů. Mezi přednosti keramických matic patří žáruvzdornost, chemická i teplotní stabilita, extrémní tvrdost a odolnost vůči opotřebení. Tyto materiály jsou naopak obtížně zpracovatelné, křehké a mají nevyzpytatelné vlastnosti při cyklickém tepelném zatěžování. [4]

2.3. Technologie výroby kompozitů

Široké spektrum kompozitních materiálů přináší i rozmanitost do jejich výroby. Existuje řada různých výrobních technologií, které jsou závislé na finálním polotovaru, případně výrobku.

Ruční kladení

Mezi první technologie výroby kompozitních materiálů patřilo ruční kladení za mokra. Tato technologie spočívá v kladení výztuže v podobě tkaniny nebo rohože na otevřenou formu, kde dochází k ručnímu prosycování tekutou pryskyřicí. Pryskyřice se nanáší pomocí štětce, či válečku, případně může být proveden nástřik. Velice podobným způsobem se vrství prepreg. Prepreg je polotovar ve formě plátů a slouží k výrobě vláknových kompozitů. Jedná se o předimpregnovanou výztuž v kombinaci s částečně vytvrzenou pryskyřicí. Výhodou při kladení prepregů je oddělení procesu prosycování vláken pryskyřicí, které v tomto případě probíhá na specializovaném pracovišti, a tak se při výrobě kompozitního materiálu pracuje již s předpřipravenou, prosycenou výztuží – prepregem. Správné prosycení výztuže je náročný děj, jehož výsledek má velký vliv na kvalitu polotovaru, potažmo finálního výrobku. Po navrstvení prepregů následuje proces vytvrzování, který je nezbytný ke vzniku pevné matrice. Postupem času dochází k robotizaci ručního kladení a vznikají například technologie známé jako ATL (Automated Tape Laying). [4, 10]

Lisování

Touto metodou jsou nejčastěji vyráběny ploché polotovary, výjimkou však nejsou ani různě tvarované předměty. Lisování jako takové se dělí dle mnoha hledisek. Například na nízkotlaké a vysokotlaké nebo zda probíhá za tepla, či za studena. [10]

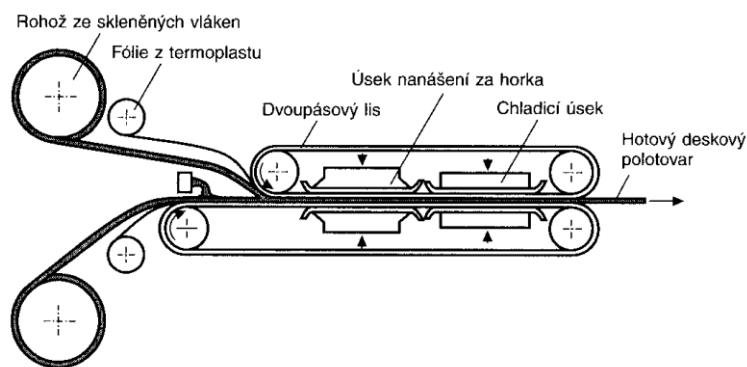
Nízkotlaké lisování je podobné ručnímu kladení. Používá se jednodílná forma, do které je navrstvena výztuž, která je následně prosycena pryskyřicí. Poslední vrstvu však zpravidla tvoří neprodyšná fólie. Pomocí podtlaku se odvede přebytečná pryskyřice a zamezí se vzniku bublin, čímž se zvýší kvalita výsledného kompozitu. [10, 15]

Rozšířenou technologií je mokré lisování. Jedná se o zautomatizovaný proces, kdy se do formy navrství výztuž, která se následně zalije pryskyřicí. Poté dojde

k přimáčknutí druhou částí formy lisovacím tlakem v rozsahu 0,5 – 2 MPa. Proces může probíhat jak za studena, tak ve předehřáté formě. [10]

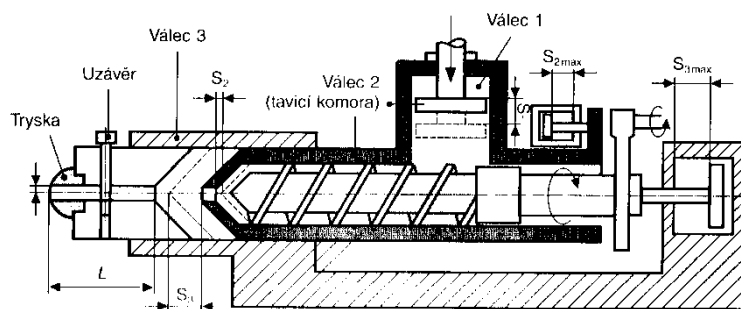
Technologie SMC je vysokotlaké lisování, probíhající v rozmezí tlaku 30 – 140 barů. SMC je realizováno na hydraulických lisech. [10]

Desky z termoplastů vyztužené skleněnou rohoží se vyrábí technologií GMT. Jedná se o kontinuální výrobu ve dvoupásovém lisu – viz. *obr. 11*. Rohož ze skleněných vláken a fólie z termoplastu jsou odvíjeny a následně vrstveny před lisovací komorou, kde dochází k lisování za tepla. Následně je deska ochlazována. [10, 15]



Obr. 11 – Výroba ve dvoupásovém lisu. [10]

Samostatnou skupinou, kterou však lze z principu zařadit pod lisování je technologie vstřikování. Asi nejvýznamnější technologie, kterou se vyrábí kompozity s termoplastovou matricí, nese název ZMC a vstřikovací zařízení je k vidění na *obr. 12*. V tavicí komoře dochází k roztavení lisovací hmoty (směs plastového granulátu a nasekaných vláken – nejčastěji skleněných), která je za pomoci pístu dopravena do válce se šnekem, který dále dopravuje směs skrz trysku do formy. Nevýhodou této technologie je poškozování vláken a náročná termoregulace. Je totiž důležité, aby k vytvrzování docházelo až ve formě, nikoliv cestou do ní. [10]



Obr. 12 – Vstřikovací zařízení ZMC. [10]

Výroba kompozitních profilů

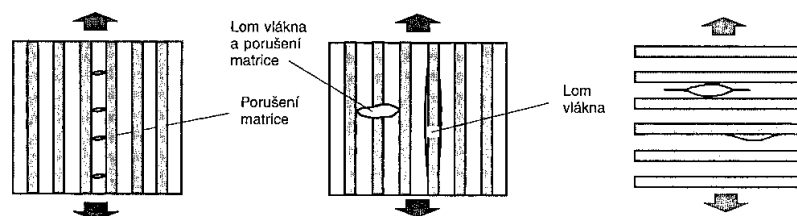
Technologie známá také jako pultruze je kontinuální proces, která zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu za pomoci tažného zařízení. Vstupní materiál je vláknová výztuž navinutá na cívkách, která před vstupem do vyhřívané komory prochází pryskyřičnou lázní. [10]

2.4. Zatěžování kompozitů

Výrobek, respektive polotovár zhotovený z kompozitního materiálu by měl být navrhnout tak, aby co nejlépe odolával čtyřem základním typům zatížení, kterými jsou tah, tlak, smyk a ohyb. [20]

V případě zatížení tahem hrají hlavní roli mechanické vlastnosti vláken. Pokud jsou vlákna uložena ve směru působení síly, tak je životnost kompozitu nejvíce závislá na životnosti vlákna. Čím více je vlákno v kompozitu orientované kolmo na směr působení síly, tím více se musí zohledňovat i mechanické vlastnosti matrice, její adheze s vlákny a případné bubliny ve struktuře, které mohou výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu. Při tlakovém zatěžování je naopak hlavním parametrem vyztužující schopnost matrice a adheze na rozhraní vlákno – matrice. Smyk v kompozitu je zpravidla založen na principu klouzání vrstev jedna po druhé. Aby se tomuto jevu zabránilo, musí být zajištěna co možná nejvyšší adheze mezi vláknem a matricí. Ohybové namáhání prakticky zahrnuje tlak, tah i smyk dohromady. Horní část vzorku je namáhána tlakem, spodní tahem a uprostřed působí smyk. [10, 20]

Mechanické porušení kompozitních materiálů se posuzuje podle toho, jestli je porušené vlákno, nebo matrice. Z tohoto hlediska jsou definovány tři mechanismy porušení kompozitního materiálu – translaminární, intralaminární a interlaminární. Pro ilustraci poslouží obr. 13. [10]



Obr. 13 – Mechanismy porušení kompozitního materiálu (zleva intralaminární, translaminární a interlaminární mechanismus). [10]

Translaminární mechanismus je charakteristický porušením vláken a může být nazýván také jako vláknový mechanismus porušení. Nejčastěji je vlákno přetrženo, vytaženo v matrice, v případě tlakového namáhání zborceno ve vzpěru, případně rozštěpeno. Intralaminární mechanismus, také mezivláknový, se stejně tak jako interlaminární mechanismus vyznačuje porušením matrice, případně hranice v těsné blízkosti vlákna. V případě intralaminárního mechanismu vznikají trhliny, které jsou většinou kolmé na osu vláken a často nemusí být na první pohled zřetelné. Naopak u interlaminárního lomu, známého jako delaminace, dochází k prasknutí materiálu ve směru vláken, trhlinka se šíří poměrně rychle a materiál brzy není kompaktní. [10, 20]

2.5. Teplotní degradace kompozitů

Největším rizikem při teplotním zatěžování kompozitních materiálů s polymerní matricí je bezesporu degradace použitého plastu. Degradace jako taková je definována jako změna struktury a vlastností způsobená rozkladnými reakcemi. Typickými znaky degradace polymerních materiálů jsou často úbytek na hmotnosti, změna barvy, zápach, případně nesoudržnost a rozklad daného materiálu. Degradace způsobená vnějšími vlivy (teplota, UV záření, plyny, voda) se nazývá stárnutí. Při stárnutí dochází ke změně struktury materiálu a mění se jeho optické a mechanické vlastnosti. [21]

Pro zvýšení teplotních možností slouží v kompozitu vlákna, která mají obecně mnohem větší teplotní odolnost než polymerní matrice. Kompozit vyztužený odolnějšími vlákny může být vystavován vyšším teplotám, přestože samotná matrice by při takových podmínkách neměla příslušné mechanické vlastnosti. Možná teplota zatěžování kompozitů s polymerní matricí se odvíjí od teplotních možností matrice a složení kompozitu. Kvůli různorodosti ve složení kompozitů nelze přesně definovat mezní teploty pro danou matrici a výztuž, z toho důvodu se přistupuje k mechanickým zkouškám po teplotní expozici. Prověření zaručené krátkodobé expozice nepřináší v laboratorních podmínkách takřka žádný problém. V případě dlouhodobé expozice jsou však požadovány časy v řádu desítek tisíc hodin, z toho důvodu se při laboratorním testování přistupuje k principu umělého stárnutí polymerů, které funguje na principu zvýšení teploty a zkrácení času. [2]

2.6. Umělé stárnutí

Správné určení teploty a času k nasimulování tak dlouhé teplotní expozice jako je např. 20 000 hodin je velice náročný a citlivý proces. I nepatrné změny v řádu jednotek °C, nebo desítkách minut mohou zkreslit výsledky téměř k nepoužitelnosti. V praxi se využívají následující postupy.

Půlení času

Jedná se o univerzální a nejčastěji používaný postup, který je aplikován nejen při umělém stárnutí, ale obecně při simulacích různých dějů a reakcí. Tato metoda spočívá ve zvyšování teploty o 10 °C a krácení času na polovinu, přičemž je doporučováno zkrátit časový interval umělého stárnutí maximálně 256x vzhledem k době zaručené teplotní expozice na dané teplotě. [22]

Arrheniova metoda

Tato metoda nevyžaduje zvláštní znalosti chemického procesu stárnutí. Pracuje se jen se vstupními a výstupními parametry, nezohledňuje tedy ani rychlost reakce. Arrheniova rovnice je vyjádřena ve tvaru, ze kterého se snadným způsobem vypočte čas umělého stárnutí v závislosti na určitých parametrech – viz. rovnice (1). [2, 23]

$$t_1 = t_2 \cdot e^{\frac{E_a(T_2 - T_1)}{R \cdot T_2 \cdot T_1}} \quad (1)$$

kde t_1 [s] je čas umělého stárnutí, t_2 [s] čas přirozeného stárnutí, E_a [J/mol] Arrheniova aktivační energie, T_2 [K] teplota přirozeného stárnutí, T_1 [K] teplota umělého stárnutí a R [J/K.mol] univerzální plynová konstanta. [23]

Arrheniova aktivační energie je parametr nejčastěji udávaný v elektronvoltech (eV). Pro dosažení do rovnice (1) je tedy nutné její hodnotu nejprve přepočítat dle následujícího vztahu (2). [2]

$$1 \text{ eV} = 96\,486 \text{ J/mol} \quad (2)$$

Zjištění samotné aktivační energie je možné mnoha způsoby, nejčastěji jsou používány následující tři, které jsou seřazeny od nejméně přesného k nejspolehlivějšímu.

Obecný způsob – Hodnoty 0,75 eV, 1 eV, nebo 1,1 eV nehledě na materiál a jeho složení. Tři hodnoty jsou uvedeny proto, že každá instituce, případně země preferuje vždy jen jednu z nich, podle které se řídí. [22]

Statistické hodnoty – Existují různé mezinárodní databáze, které obsahují hodnoty aktivačních energií různých materiálů, které už někdo nějakým principem určil a pracoval s nimi. Opět zde ale hraje roli rozmanitost kompozitních materiálů a polymerů obecně, aktivační energie se totiž může razantně měnit na základě jen drobných rozdílů ve složení materiálu, není tedy výjimkou, že se touto metodou získají různé hodnoty aktivačních energií, bez znalosti přesného složení materiálu, k němuž se tyto hodnoty vztahují. [24]

Zjištění aktivační energie s pomocí DSC – Metoda DSC (diferenciální skenovací kalorimetrie) je zkušební metoda, zkoumající chování materiálu v závislosti na jeho zahřívání a ochlazování. Výstupem této metody je DSC křivka, z jejíž průběhu se dají vyčíst teploty příslušné kurčitému jevu, který v materiálu v daný okamžik probíhá. Mimo to se z jejího průběhu dle ASTM E698-11 dá určit právě aktivační energie. Tato metoda je založena na opakovaném zahřívání a ochlazování jednoho vzorku, přičemž v žádném z ohřevů nesmí dojít k jeho degradaci. Při prvním ohřevu rychlostí 10 K/min se dostane křivka, ze které by se aktivační energie určit nedala, jelikož materiál v sobě nese různé výrobní vady, které DSC křivku ovlivní. Následuje ještě jeden ohřev rychlostí 10 K/min, jehož výsledkem by měla být hladká křivka s lokálními extrémy – tzv. peaky. Po tomto druhém zahřátí následují další ohřevy, přičemž je důležité, aby probíhaly jinou rychlostí. Obvykle se volí rychlosti ohřevu v rozmezí 1 – 10 K/min. Ze získaných křivek se vynese graf závislosti logaritmických hodnot rychlostí ohřevů na převrácených hodnotách teplot příslušných peaků. Ze zmíněného grafu je pro další výpočet užitečná směrnice k , která se dosadí do vztahu pro získání přibližné hodnoty aktivační energie (3). Takto získaná hodnota aktivační energie se dá zpřesnit libovolným počtem aproximací dle vztahů a tabulek uvedených v ASTM E698-11. [2, 25, 26]

$$E_a' = 2,19 \cdot R \cdot k \quad (3)$$

kde E_a' [J/mol] je předběžná hodnota aktivační energie, R [J/mol.K] univerzální plynová konstanta a k [K] směrnice zmiňovaného grafu. [26]

3. Experimentální část

3.1. Použité materiály

Připravené vzorky pro mechanické zkoušky dodala firma ISOMA, která je výhradním českým distributorem švýcarského výrobce tvrzených kompozitů Von Roll. Pro zkoušení související s teplotním zatížením je důležité, aby nebyly vzorky materiálu během jejich přípravy tepelně ovlivněny. Kvůli tomu byly nařezány vodním paprskem. Jelikož byla příprava vzorků vzhledem k jejich složení náročná a docházelo u nich k lámání a drobení, bylo dodáno jen omezené množství. Konkrétně se jednalo vždy o 9 vzorků od každé geometrie a každého materiálu, dohromady 216 kusů. Podrobné rozdělení je uvedeno v *tab. 3*, kde je věnována pozornost značení, obchodnímu názvu a základním parametrům materiálu, a *tab. 4*, která upravuje označení vzorků podle rozměrů, geometrického uspořádání výztuže a pro jakou zkoušku je daný vzorek materiálu určený.

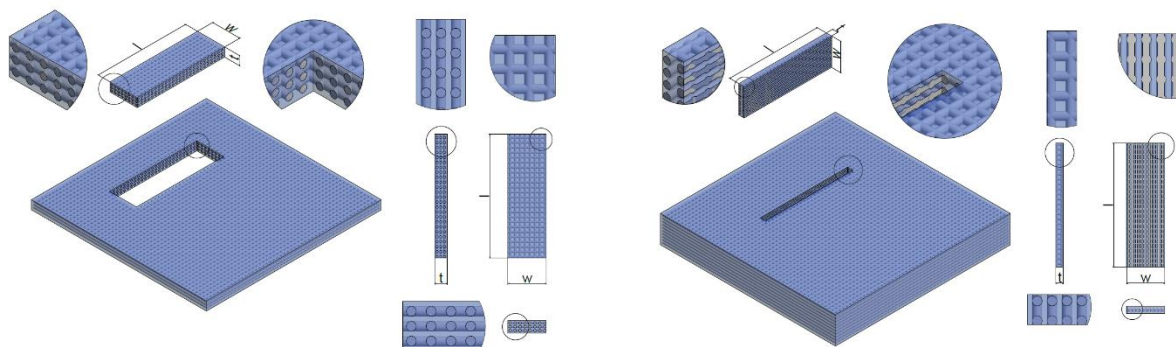
Tab. 3 – Zkušební vzorky. [27, 28, 29, 30, 31, 32]

Označení	Název	Matrice	Výztuž	ks
1X	Delmat Epoxy 68660	Epoxidová pryskyřice	Skleněná rohož	54
2X	Durapol F200 SMC	Polyesterová pryskyřice	Skleněné vlákno	54
3X	Pamitherm 41140	Silikonová pryskyřice	Slídový papír	54
4X	Vetronit G11	Epoxidová pryskyřice	Skleněná tkanina	54

Tab. 4 – Parametr X v označení materiálů.

X	Rozměry [mm]	Princip vyříznutí z desky	Mechanická zkouška	ks
	Délka x šířka x tloušťka			
A	80 x 10 x 4	Vodorovně	Rázová houževnatost (Charpy)	9
B	80 x 10 x 4	Kolmo	Rázová houževnatost (Charpy)	9
C	150 x 10 x 4	Vodorovně	Ohyb	9
D	150 x 10 x 4	Kolmo	Ohyb	9
E	250 x 25 x 4	Vodorovně	Tah	9
F	250 x 25 x 4	Kolmo	Tah	9

Rozdělení „vodorovně“ je myšleno tak, že z desky, která je položená na vodorovné ploše bude vyříznut kvádr, který je shora reprezentován obdélníkem o rozměrech délka vzorku (l) x šířka vzorku (w). Deska, z níž je vzorek zhotoven má tedy tloušťku rovnu tloušťce vzorku (t). Označení „kolmo“ mají vzorky, které jsou z desky uřezávány jako plátky a shora jsou reprezentovány obdélníkem o rozměrech délka vzorku (l) x tloušťka vzorku (t) a tloušťka desky je tedy shodná s šířkou vzorku (w). Pro ilustraci byl zhotoven ilustrační náčrt viz. obr. 14.



Obr. 14 – Princip vyříznutí vzorku z desky – vodorovně (vlevo) a kolmo (vpravo).

Vzorky jsou tímto způsobem zhotoveny proto, že se jedná o lamináty. Výztuž má určitou rovinnou orientaci a v prostoru je skládána vrstva po vrstvě na sebe. V případě nařezání vzorků „vodorovně“, tedy kdy tloušťka vzorku odpovídá tloušťce laminátu, by mělo být dosaženo mnohem lepších mechanických vlastností, než v případě „kolmo“. Princip vyztužení laminátů spočívá právě ve vrstvení různých forem výztuže, kdy v prvním případě dominantní plochu vzorku tvoří vrstvy výztuže, naopak ve druhém případě je největší plocha vzorku tvořena řezem navrstvených vláken.

3.1.1. Delmat Epoxy 68660

Jedná se o laminát žluté barvy složený z epoxidové pryskyřice vyztužené skleněnou rohoží. Fotky vzorků zhotovených z tohoto materiálu viz. obr. 15. [27]



Obr. 15 – Delmat Epoxy 68660 – vyříznutý vodorovně (nahore) a kolmo (dole).

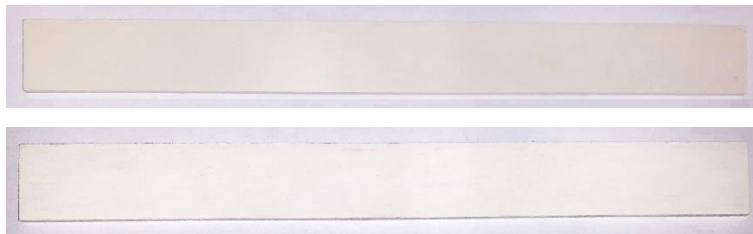
Přední výhodou tohoto materiálu jsou dobré mechanické vlastnosti za zvýšených teplot a teplotní odolnost obecně. Mezi další vlastnosti patří malé změny mechanických vlastností po tepelném stárnutí, dobrá odolnost proti běžně používaným rozpouštědlům, olejům a chloridům, dobré elektrické vlastnosti, nízká absorpce vody a dobrá obrobiteľnosť. Všechny produkty řady Delmat jsou navíc samozhášivé a vyrobené bez halogenů. Konečné výrobky z tohoto materiálu jsou například mechanicky, elektricky a tepelně namáhané izolační části strojů, drážkové klíny, hnací tyče výkonových spínačů, podpěrné prvky, závitové tyče, či izolace forem. Výběr z mechanických a fyzikálních vlastností, které uvádí výrobce je v *tab. 5*. [27, 33]

Tab. 5 – Některé mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu Delmat Epoxy 68660 dle materiálového listu. [27]

	Dle normy	Jednotka	Hodnota
Pevnost v tahu	ISO 527	[MPa]	250
Pevnost v ohybu	ISO 178	[MPa]	400
Vrbová houževnatost	ISO 179	[kJ/m ²]	90
Modul pružnosti v ohybu	ISO 178	[MPa]	18000
Hustota	ISO 1183	[g/cm ³]	1,9
Teplotní index	IEC 60216	[°C]	180

3.1.2. Durapol F200 SMC

Durapol je kompozitní materiál bílé barvy z materiálové rodiny Delmat. Jedná se o polyesterovou pryskyřici vyztuženou náhodně orientovanými krátkými vlákny. Fotky zkušebních vzorků jsou na *obr. 16*. [28, 33]



Obr. 16 – Durapol F200 SMC – vyříznutý vodorovně (nahore) a kolmo (dole).

Vlastnosti tohoto materiálu jsou velmi podobné jako v případě Delmat Epoxy. Hlavní rozdíl spočívá v termoplastické matici. Vzhledem k tomu má Durapol horší

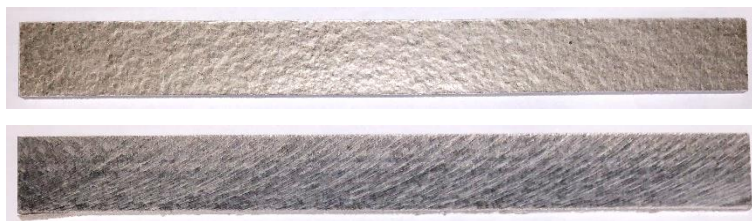
teplotní odolnost (viz. *tab. 6*). Mezi jeho přední výhody se řadí dobré mechanické a elektrické vlastnosti a třída hořlavosti V-0 od tloušťky 3 mm, což dle normy UL 94 znamená, že se jedná o samozhášivý materiál, který reaguje do 10 s od vzplanutí. Durapol se dodává v deskách o různých rozměrech a vyrábí se z něj například izolační stěny, kabelové držáky, táhla, elektromotory, zhášecí komory a fázové děliče. [28, 33, 34]

Tab. 6 – Některé mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu Durapol F200 SMC dle materiálového listu. [28]

	Dle normy	Jednotka	Hodnota
Pevnost v tahu	ISO 527	[MPa]	70
Pevnost v ohybu	ISO 178	[MPa]	150
Vrubová houževnatost	ISO 179	[kJ/m ²]	65
Modul pružnosti v ohybu	ISO 178	[MPa]	9000
Hustota	ISO 1183	[g/cm ³]	1,8 – 1,9
Teplotní index	IEC 60216	[°C]	155

3.1.3. Pamitherm 41140

Ze zkoušených vzorků se jedná o teplotně nejodolnější materiál. Pamitherm je šedý kompozitní materiál, ve kterém výztuž tvoří slídový papír na bázi muskovitu a matrici vysokoteplotní silikonová pryskyřice. Fotky na *obr. 17*. [29]



Obr. 17 – Pamitherm 41140 – vyříznutý vodorovně (nahore) a kolmo (dole).

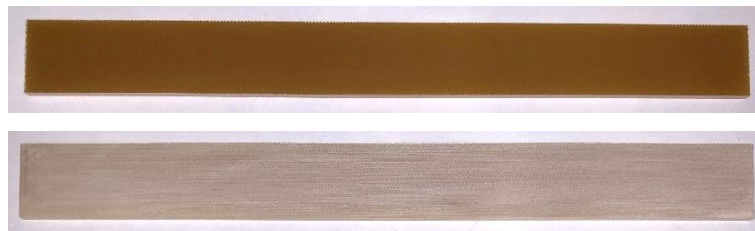
Navzdory vysoké teplotní odolnosti, kterou výrobce garantuje v případě dlouhodobého zatížení 450 °C a krátkodobě dokonce až 800 °C (více v *tab. 7*), neobsahuje Pamitherm žádný azbest. Mezi jeho přední výhody patří vynikající teplotní a elektrické izolační vlastnosti, nízká tepelná vodivost, snadná obrobitelnost a v neposlední řadě i třída hořlavosti V-0 dle UL 94. Pamitherm se stejně jako předešlé materiály dodává v deskách a slouží například k výrobě tepelných izolací do forem. [14, 29, 34]

Tab. 7 – Některé mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu Pamitherm 41140 dle materiálového listu. [29]

	Dle normy	Jednotka	Hodnota
Pevnost v tahu	ISO 527	[MPa]	neuveдено
Pevnost v ohybu	ISO 178	[MPa]	160 – 180
Vrubová houževnatost	ISO 179	[kJ/m ²]	neuveдено
Modul pružnosti v ohybu	ISO 178	[MPa]	neuveдено
Hustota	ISO 1183	[g/cm ³]	2,1
Teplotní index	IEC 60216	[°C]	450

3.1.4. Vetronit G11

Jedná se o kompozitní materiál žlutohnědé barvy, který je tvořen epoxidovou pryskyřicí vyztuženou skleněnou tkaninou. Fotky jsou k vidění na *obr. 18*. [30]



Obr. 18 – Vetronit G11 – vyzřiznutý vodorovně (nahore) a kolmo (dole).

Vetronit má stálé mechanické vlastnosti i za vysokých teplot a obecně dobré elektrické vlastnosti. Velkou výhodou je jemná a homogenní struktura, vhodná i pro ty nejmenší díly. Vetronit se dodává v deskách, nebo trubkách a slouží zejména k náhradě kovu izolantem ve strojírenství – jeřáby, konstrukce, jednoúčelové stroje, přípravky, drážková izolace, tepelně odolné části strojů. Některé mechanické a fyzikální vlastnosti uvádí *tab. 8*. [30, 35]

Tab. 8 – Některé mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu Vetronit G11 dle materiálového listu. [30]

	Dle normy	Jednotka	Hodnota
Pevnost v tahu	ISO 527	[MPa]	375
Pevnost v ohybu	ISO 178	[MPa]	550
Vrubová houževnatost	ISO 179	[kJ/m ²]	75
Modul pružnosti v ohybu	ISO 178	[MPa]	24000
Hustota	ISO 1183	[g/cm ³]	1,85
Teplotní index	IEC 60216	[°C]	180

3.2. Metodika určení mechanických vlastností

U dodaných materiálů bylo cílem experimentálně zjistit a porovnat mez pevnosti v tahu σ_m [MPa], mez pevnosti v ohybu σ_{fm} [MPa] a rázovou houževnatost a_{cu} [kJ/m²]. Měření probíhalo na vzorcích bez teplotní expozice, dále po nasimulování teplotní expozice 20 000 hodin a nakonec 30 000 hodin. Určení právě těchto hodnot časové expozice vychází z definice teplotního indexu dle ČSN EN 60216-1, kde je hodnota teplotního indexu zjednodušeně definována jako garantovaná hodnota při teplotní expozici 20 000 hodin. Po umělém stárnutí, které simuluje 20 000 hodin teplotní expozice by tedy v ideálním případě měly vycházet mechanické vlastnosti jen nepatrně jiné než u vzorků bez teplotní expozice, naopak po simulování 30 000 hodin mohou být mechanické vlastnosti značně horší. Vždy byly analyzovány jen 3 vzorky pro každé teplotní zatížení a princip vyříznutí z desky, přestože se doporučuje minimálně 5. K tomu bylo přistoupeno z důvodu malého množství dodaného materiálu. [36, 37, 38, 39]

3.2.1. Určení parametrů umělého stárnutí

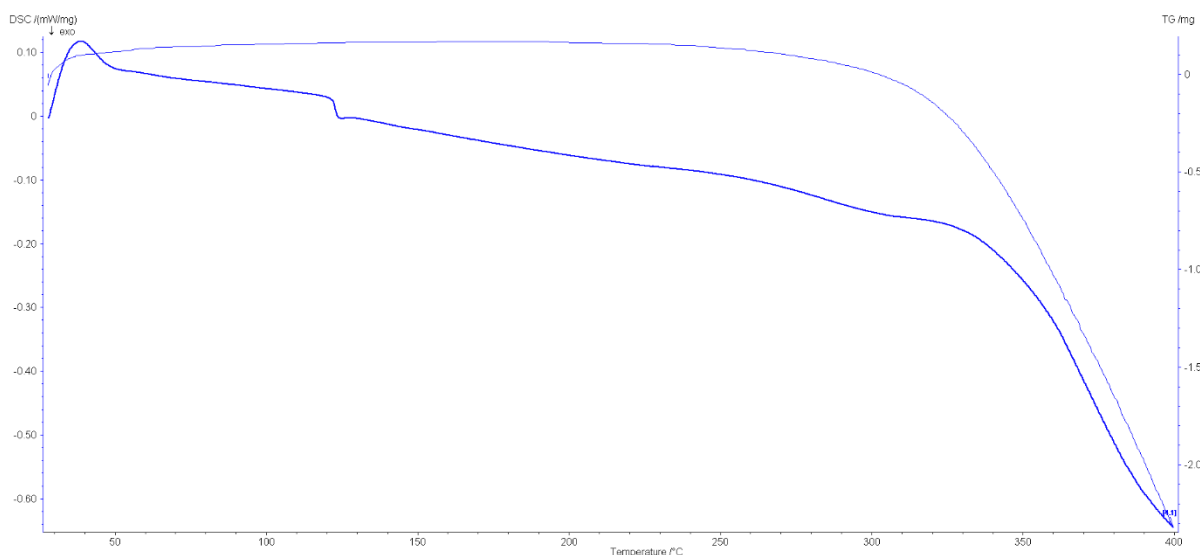
Jelikož ve všech čtyřech případech byly testovány kompozity s polymerní maticí, bylo zapotřebí zjistit teplotní možnosti právě plastových matic, aby při simulaci stárnutí nedocházelo k jejich degradaci. Ke zjištění teplot degradace byla použita diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC). Typickými znaky degradace jsou peak na DSC křivce a značný úbytek hmotnosti testovaného vzorku. [25]

Následujícím úkolem bylo určit přesný čas a teplotu umělého stárnutí. Tento krok byl vyřešen principem půlení času a byly zohledněny jednak teploty degradace polymerních matric určené z DSC křivek, tak úzus, který doporučuje zkrátit čas umělého stárnutí maximálně 256x. Následně byly z Arrheniova vztahu vyjádřeny hodnoty aktivačních energií, které byly porovnány s dostupnými statistickými hodnotami pro dané materiály. [22]

Princip půlení času byl pro účely této práce nepatrně modifikován. Z časových důvodů, respektive aby měření po tepelné expozici vycházelo na pracovní den, nebylo možné vybrat parametry stárnutí z hodnot, které se jednoduše určily vydělením času dvěma a zvýšením teploty o 10 °C. Proto byly tyto hodnoty vyneseny do grafu a exponenciální interpolací byl získán přepis funkce závislosti času umělého stárnutí na zvýšené teplotě simulace. Následně byly do tohoto předpisu dosazeny hodnoty teplot odstupňované po 1 °C. Tyto vypočtené hodnoty byly ještě překontrolovány klasickým principem půlení času a vycházely dostatečně přesně. Z rozšířené tabulky odstupňované po 1 °C už nebyl problém určit podmínky, které vyhovovaly našim požadavkům.

Delmat Epoxy 68660

Z DSC křivky na *obr. 19* je patrné, že k degradaci dochází přibližně při teplotě 320 °C. Sice zde není patrný žádný peak, ale DSC křivka i hmotnost začínají výrazně klesat.



Obr. 19 – DSC křivka (tučně) a průběh hmotnosti (slabě) materiálu Delmat Epoxy 68660.

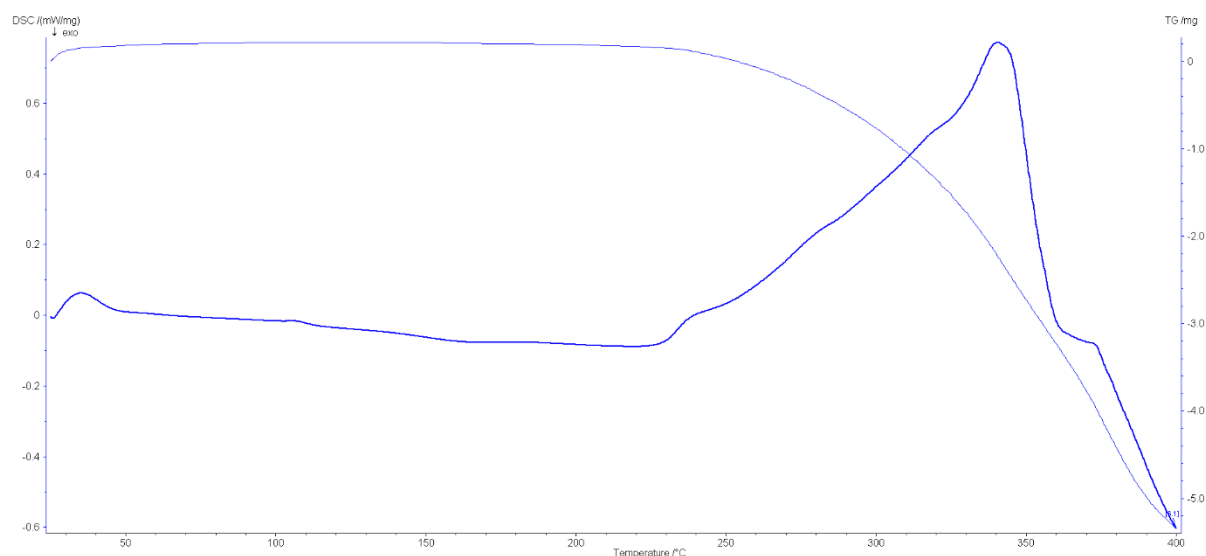
V tab. 8 jsou uvedeny parametry reálného stárnutí, parametry umělého stárnutí určené principem půlení času a parametry umělého stárnutí získané interpolací.

Tab. 8 – Parametry stárnutí materiálu Delmat Epoxy 68660.

Čas reálného stárnutí	[hod] ([d, hod, min])	20 000 (833, 8, 0)	30 000 (1 250, 0, 0)
Teplota reálného stárnutí [27]	[°C]	180	180
Čas umělého stárnutí (princip půlení času)	[hod] ([d, hod, min])	156,25 (6, 12, 15)	234,38 (9, 18, 23)
Teplota umělého stárnutí (princip půlení času)	[°C]	250	250
Čas umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[hod] ([d, hod, min])	96,18 (4, 0, 11)	144,27 (6, 0, 16)
Teplota umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[°C]	257	257

Durapol F200 SMC

Na DSC křivce na obr. 20 je vidět typický degradační peak a pokles hmotnosti, za začátek degradace se dá považovat náběh na peak, tedy teplota přibližně 240 °C.



Obr. 20 – DSC křivka (tučně) a průběh hmotnosti (slabě) materiálu Durapol F200 SMC.

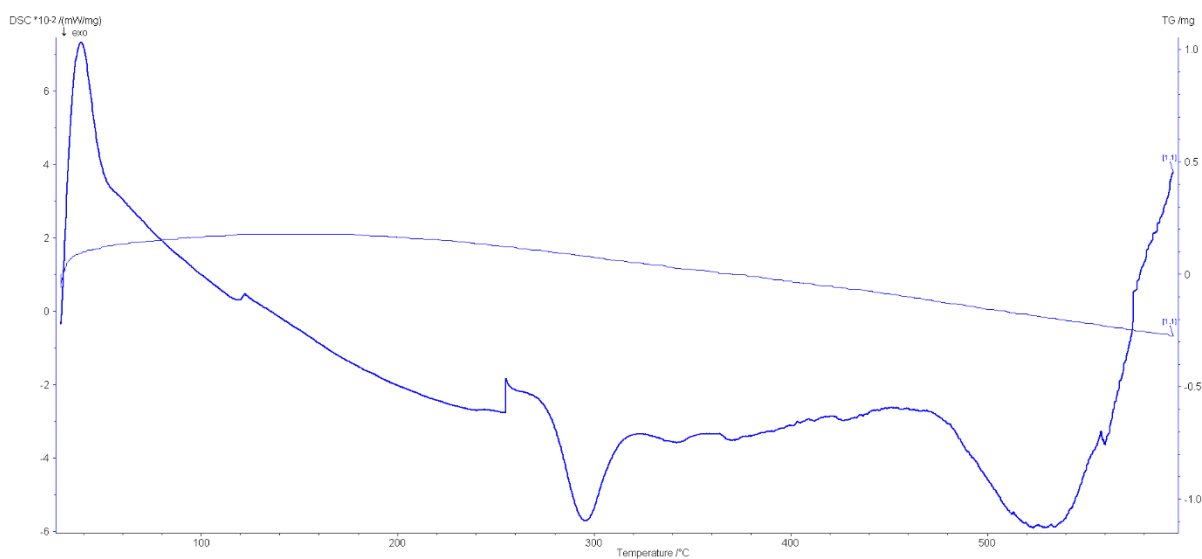
V tab. 9 jsou uvedeny parametry reálného stárnutí, parametry umělého stárnutí určené principem půlení času a parametry umělého stárnutí získané interpolací.

Tab. 9 – Parametry stárnutí materiálu Durapol F200 SMC.

Čas reálného stárnutí	[hod] ([d, hod, min])	20 000 (833, 8, 0)	30 000 (1 250, 0, 0)
Teplota reálného stárnutí [28]	[°C]	155	155
Čas umělého stárnutí (princip půlení času)	[hod] ([d, hod, min])	156,25 (6, 12, 15)	234,38 (9, 18, 23)
Teplota umělého stárnutí (princip půlení času)	[°C]	225	225
Čas umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[hod] ([d, hod, min])	136,02 (5, 16, 1)	204,04 (8, 12, 2)
Teplota umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[°C]	227	227

Pamitherm 41140

Tento materiál je natolik teplotně odolný, že nebylo v rámci možností DSC přístroje dosaženo degradace. Přestože se při teplotě přibližně 540 °C začíná zvedat peak (viz. obr. 21), zřejmě se ale nejedná o degradaci, protože výrobce u tohoto materiálu zaručuje krátkodobou teplotní odolnost 800 °C, navíc výrazně neklesá ani hmotnost. [29]



Obr. 21 – DSC křivka (tučně) a průběh hmotnosti (slabě) materiálu Pamitherm 41140.

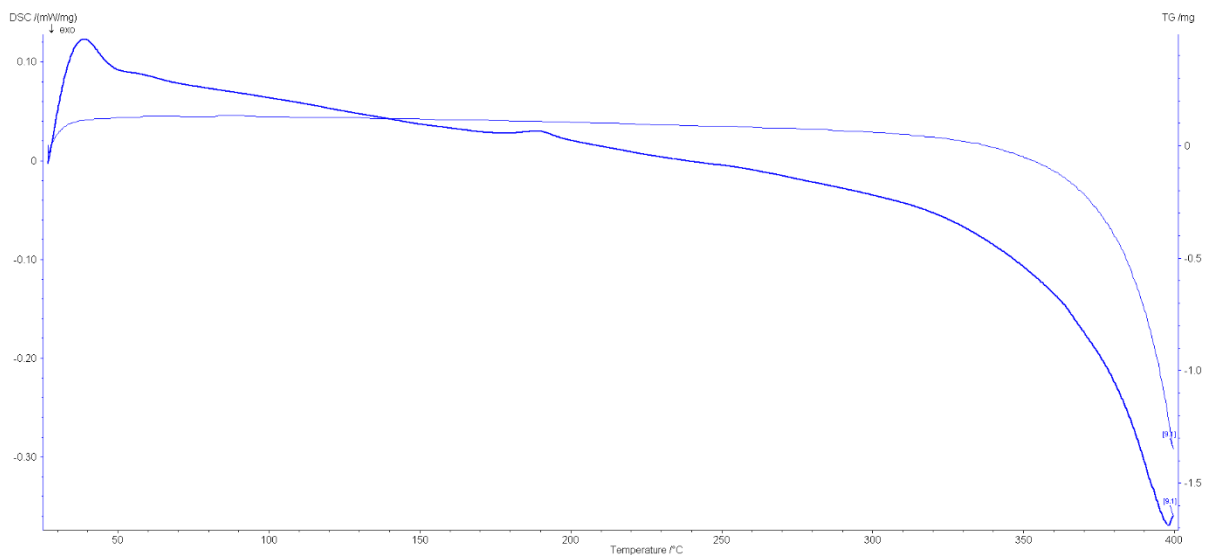
V tab. 10 jsou uvedeny parametry reálného stárnutí, parametry umělého stárnutí určené principem půlení času a parametry umělého stárnutí získané interpolací.

Tab. 10 – Parametry stárnutí materiálu Pamitherm 41140.

Čas reálného stárnutí	[hod] ([d, hod, min])	20 000 (833, 8, 0)	30 000 (1 250, 0, 0)
Teplota reálného stárnutí [29]	[°C]	450	450
Čas umělého stárnutí (princip půlení času)	[hod] ([d, hod, min])	156,25 (6, 12, 15)	234,38 (9, 18, 23)
Teplota umělého stárnutí (princip půlení času)	[°C]	520	520
Čas umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[hod] ([d, hod, min])	96,18 (4, 0, 11)	144,27 (6, 0, 16)
Teplota umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[°C]	527	527

Vetronit G11

Z DSC křivky na obr. 22 je patrné, že k degradaci zřejmě dochází přibližně při teplotě 320 °C. Sice zde není patrný žádný peak, ale DSC křivka a zejména hmotnost začínají výrazně klesat.



Obr. 22 – DSC křivka (tučně) a průběh hmotnosti (slabě) materiálu Vetronit G11.

V tab. 11 jsou uvedeny parametry reálného stárnutí, parametry umělého stárnutí určené principem půlení času a parametry umělého stárnutí získané interpolací.

Tab. 11 – Parametry stárnutí materiálu Vetronit G11.

Čas reálného stárnutí	[hod] ([d, hod, min])	20 000 (833, 8, 0)	30 000 (1 250, 0, 0)
Teplota reálného stárnutí [30]	[°C]	180	180
Čas umělého stárnutí (princip půlení času)	[hod] ([d, hod, min])	156,25 (6, 12, 15)	234,38 (9, 18, 23)
Teplota umělého stárnutí (princip půlení času)	[°C]	250	250
Čas umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[hod] ([d, hod, min])	96,18 (4, 0, 11)	144,27 (6, 0, 16)
Teplota umělého stárnutí (interpolace hodnot)	[°C]	257	257

Parametry umělého stárnutí a aktivační energie

V následující tabulce (tab. 12) jsou shrnuty parametry simulace stárnutí jednotlivých materiálů, podle kterých bylo postupováno. Dále je uvedena aktivační energie, která je vyjádřena a vypočtena z Arrheniovy rovnice (4). Poslední údaj v tabulce je statistická hodnota aktivační energie z dostupných databází. Jak už bylo zmíněno, tyto statistické hodnoty jsou citlivě závislé na složení daného materiálu, proto se často stává, že je uveden buď interval hodnot, případně vypsány rozdílné hodnoty bez přesného složení materiálu. Z toho důvodu bylo rozhodnuto držet se primárně principu půlení času a tyto tabulkové hodnoty použít jen k porovnání. [24]

$$E_a = \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

kde E_a [J/mol] aktivační energie, t_1 [s] je čas umělého stárnutí, t_2 [s] čas přirozeného stárnutí, T_2 [K] teplota přirozeného stárnutí, T_1 [K] teplota umělého stárnutí a R [J/K.mol] univerzální plynová konstanta. [23]

Tab. 12 – Parametry umělého stárnutí a hodnoty aktivační energie.

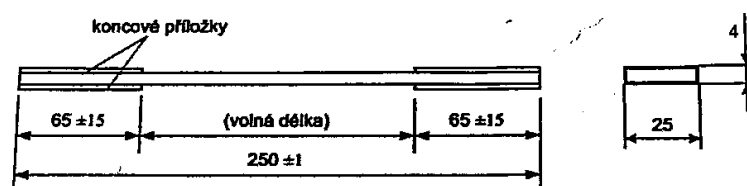
	Umělé stárnutí 20 000 hod		Umělé stárnutí 30 000 hod		Vypočtená	Statistická [24]
	Čas	Teplota	Čas	Teplota	Aktivační energie	
	[hod]	[°C]	[hod]	[°C]	[eV]	[eV]
Delmat Epoxy 68660	96,18	257	144,27	257	1,44	1,50
Durapol F200 SMC	136,02	227	204,04	227	1,28	1,26
Pamitherm 41140	96,18	527	144,27	527	3,46	-
Vetronit G11	96,18	257	144,27	257	1,44	1,64

Z tab. 12 je patrné, že hodnoty vypočtených aktivačních energií na základě určených parametrů se velmi podobají statistickým hodnotám aktivačních energií. Pro silikon vyztužený slídovým papírem nebyla statistická hodnota nalezena, avšak vypočtená hodnota je vzhledem k ostatním poměrně vysoká z důvodu, že se jedná o vyšší teploty expozice.

Nakonec je třeba ověřit, zda žádná ze simulací nepřekračuje zmíněný 256násobek zkrácení času, který v případě 20 000 hod činí 78,13 hod a u 30 000 hod pak 117,19 hod. Dle tab. 12 všechny časy umělého stárnutí vyhovují zmíněnému požadavku. [22]

3.2.2. Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 527-4

Podstata zkoušky spočívá v jednoosém zatěžování zkušebního tělesa definovaného tvaru a rozměru (viz. obr. 23) až do jeho porušení. [36]



Obr. 23 – Tvar a rozměry tělesa pro zkoušku tahem. [36]

Tahové zkoušky byly provedeny na univerzálním testovacím zařízení Instron 5582 s pneumatickými čelistmi (viz. obr. 24). Rychlost zatěžování byla zvolena 5 mm/min. Zaznamenáváno bylo prodloužení vzorku $\Delta l(x)$ [mm] v závislosti na jeho osovém zatížení $F(x)$ [N].



Obr. 24 – Instron 5582 přizpůsobený na tahovou zkoušku.

Ze vztahu (5) byla v bodě porušení vypočtena mez pevnosti v tahu σ_m [MPa] a ze vztahu (6) poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_m [1]. [36]

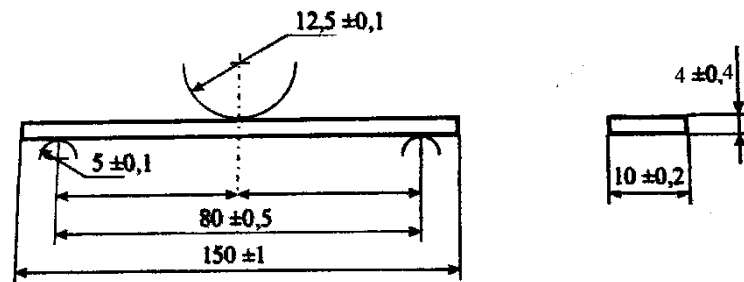
$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{w \cdot h} \quad (5)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta l_{0max}}{l_0} \quad (6)$$

kde σ_m [MPa] je mez pevnosti v tahu, F_{max} [N] zatěžující osová síla v momentě prvního porušení vzorku, w [mm] šířka vzorku, h [mm] výška vzorku, ε_m [1] poměrné prodloužení na mezi pevnosti, Δl_{0max} [mm] přírůstek počáteční měřené délky na mezi pevnosti a l_0 [mm] počáteční délka vzorku. [36]

3.2.3. Zkouška ohybem dle ČSN EN ISO 178

Zkušební těleso, jehož tvar a rozměry jsou uvedeny na obr. 25, se umístí na dvě podpěry přípravku, který je volně položený na dolních čelistech univerzálního testovacího zařízení Instron 5582. V horních čelistech je upnutý druhý přípravek s jedním zatěžovacím trnem, jehož poloha je nastavena tak, aby byl v kontaktu se vzorkem, ale zároveň na něj nepůsobil žádnou silou. Princip zkoušky spočívá v zatěžování zkušební tělesa silou, kterou je zprostředkována zatěžovacím trnem, který je umístěn kolmo na podélnou osu zkušební tělesa (viz. obr. 26). Rychlost zatěžování byla jako v případě tahové zkoušky zvolena 5 mm/min a zaznamenával se průhyb $v(x)$ [mm] v závislosti na působícím zatížení $F(x)$ [N]. [37]



Obr. 25 – Tvar a rozměry tělesa pro zkoušku ohybem. [37]



Obr. 26 – Instron 5582 s přípravkem na zkoušku ohybem.

Z naměřených hodnot se dle vztahu (7) určila mez pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] a ze vztahu (8) deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu ε_{fM} [1]. [37]

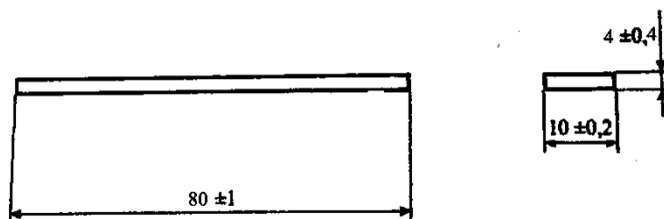
$$\sigma_{fM} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_v}{2 \cdot w \cdot h^2} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{fM} = \frac{6 \cdot v \cdot h}{l_v^2} \quad (8)$$

kde σ_{fM} [MPa] je mez pevnosti v ohybu, F_{max} [N] zatěžující síla v momentě prvního porušení vzorku, l_v [mm] vzdálenost podpěr, w [mm] šířka vzorku, h [mm] výška vzorku, ε_{fM} [1] deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu a v [mm] průhyb v momentě prvního porušení vzorku. [37]

3.2.4. Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179-1

Princip zkoušky spočívá v přeražení zkušebního tělesa, jehož geometrie a rozměry jsou na *obr. 27* rázovým kyvadlovým kladivem o určité nominální energii (*obr. 28*). [38]



Obr. 27 – Tvar a rozměry tělesa pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy. [38]



Obr. 28 – Přeražení zkušebního vzorku.

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena na testovacím stroji Impact Tester PH 300 – S Version CHY a bylo použito kyvadlové kladivo o nominální energii 300 J (viz. *obr. 29*).



Obr. 29 – Impact Tester PH 300 – S Version CHY.

Při zkoušce se zaznamenává energie $E_c [J]$ potřebná k přeražení vzorku. Dále byla dle vztahu (9) vypočtena rázová houževnatost daného materiálu $a_{cU} [kJ/m^2]$. [38]

$$a_{cU} = \frac{E_c}{w \cdot h} \quad (9)$$

kde $a_{cU} [kJ/m^2]$ je rázová houževnatost, $E_c [kJ]$ energie potřebná k přeražení vzorku, $w [m]$ šířka vzorku a $h [m]$ výška vzorku. [38]

3.2.5. Výběrová směrodatná odchylka měření

Mechanické vlastnosti byly určeny vždy ze 3 měření pro každý materiál, geometrii, teplotní zatížení a typ mechanické zkoušky. Jednotlivé mechanické vlastnosti byly vyhodnocovány zvláště právě ze zmíněných 3 měření a jako výsledek byla vypočtena průměrná hodnota z těchto 3 měření. Výběrová směrodatná odchylka měření se vypočítá dle vztahu (10) a slouží k vytvoření představy o tom, jak moc jsou výsledky měření odchýleny od průměrné hodnoty.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (10)$$

kde SD je směrodatná odchylka, $n [1]$ počet měření, X_i hodnota i -tého měření a \bar{X} průměrná hodnota určená ze všech měření.

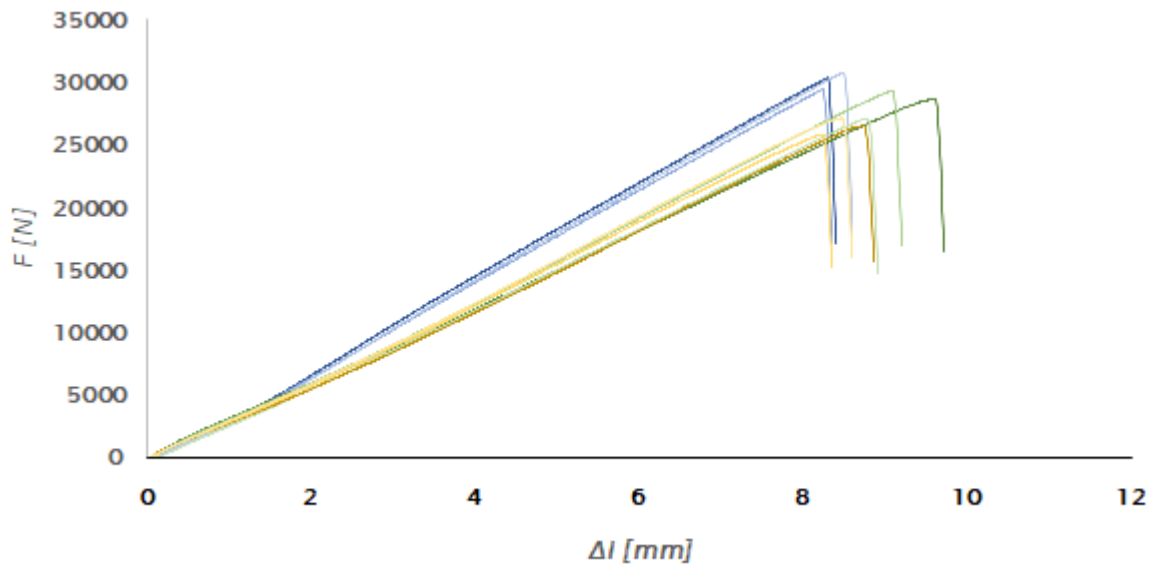
3.3. Vyhodnocení a zpracování naměřených dat

Vyhodnocení dat je rozděleno do kapitol podle materiálů. Dále jsou jednotlivé kapitoly děleny na mechanické zkoušky – tah, ohyb a rázová houževnatost. Kapitoly tah a ohyb obsahují vždy dva grafy a dvě tabulky. První graf a tabulka porovnává výsledky vzorků, které byly vyříznuty z desky vodorovně a obsahuje vždy 9 závislostí, které jsou systematicky rozděleny podle druhu teplotního zatížení na odstíny modré = bez teplotní expozice, odstíny zelené = simulace teplotní expozice 20 000 hod a odstíny žluté = simulace teplotní expozice 30 000 hod. Druhý graf a tabulka se týká vzorků vyříznutých z desky kolmo a barevné rozdělení závislostí je stejné jako v předešlém případě. U vyhodnocení zkoušek rázové houževnatosti jsou výsledky měření a vypočtené mechanické vlastnosti uvedeny vždy jen v jedné tabulce pro obě geometrie vzorku a materiál. Na konci kapitol jednotlivých materiálů jsou přehledně uvedeny průměrné hodnoty výsledků mechanických zkoušek rozdělené podle teplotní expozice.

3.3.1. Delmat Epoxy 68660

Zkouška tahem

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 1E při zkoušce tahem zobrazuje obr. 30.



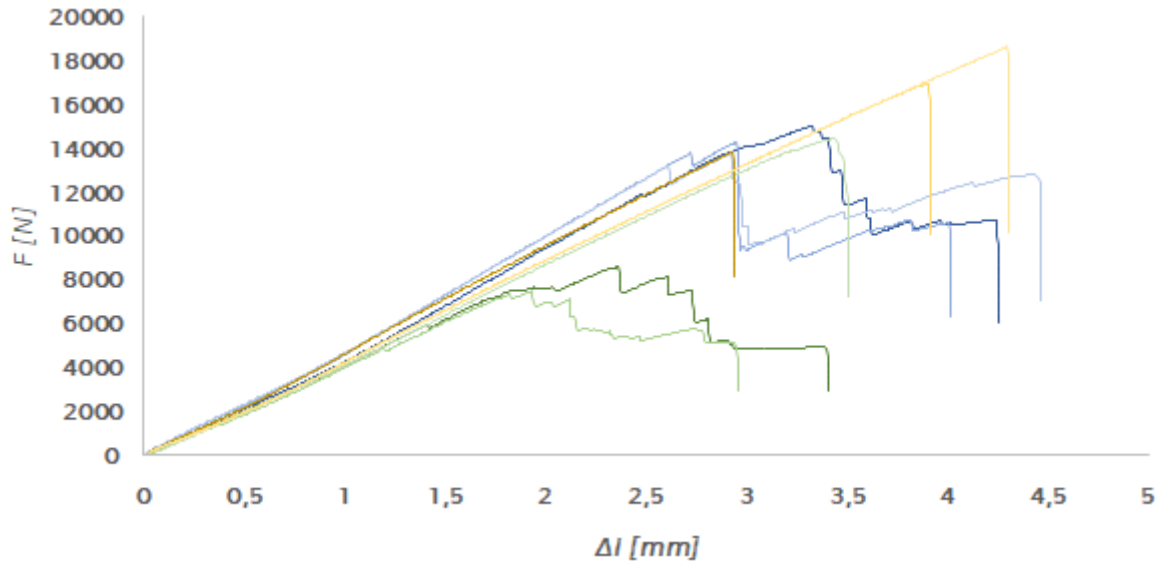
Obr. 30 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 1E.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 1E.

	F_{\max}	Δl_{\max}	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
1E_0_a	30 340	6,88	303,40	302±7	0,057	0,058±0,001
1E_0_b	29 406	6,83	294,06		0,057	
1E_0_c	30 749	7,05	307,49		0,059	
1E_20_a	28 674	7,95	286,74	283±12	0,066	0,063±0,003
1E_20_b	29 289	7,54	292,89		0,063	
1E_20_c	27 053	7,24	270,53		0,060	
1E_30_a	26 480	7,25	264,80	265±7	0,060	0,059±0,002
1E_30_b	25 784	6,82	257,84		0,057	
1E_30_c	27 104	7,02	271,04		0,059	

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 1F při zkoušce tahem zobrazuje *obr. 31*.



Obr. 31 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 1F.

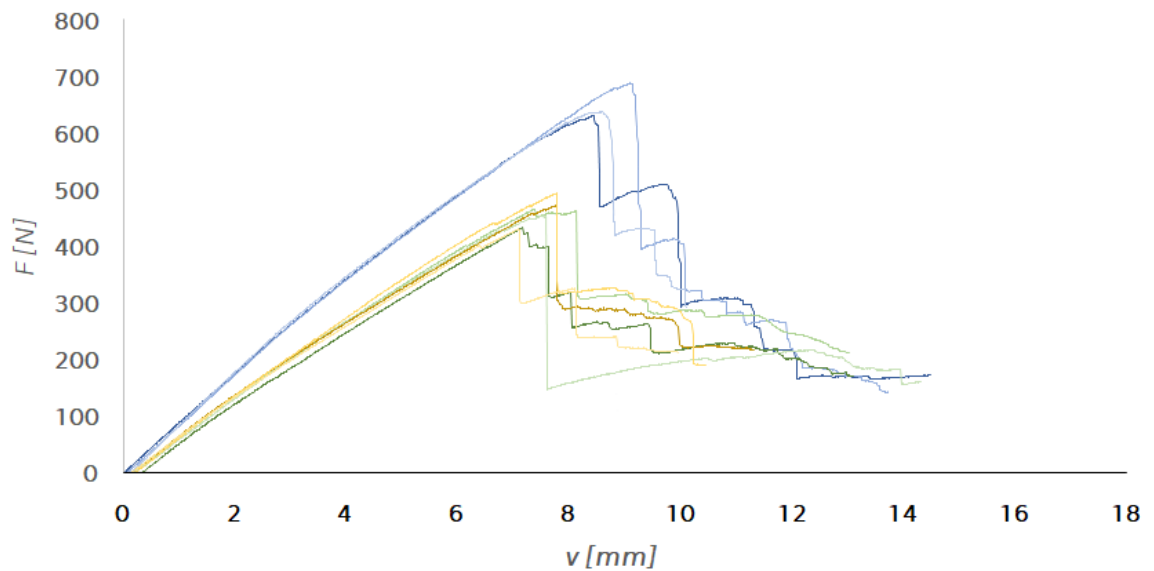
Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v *tab. 14*.

Tab. 14 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 1F.

	F_{\max}	$\Delta l_{0\max}$	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
1F_0_a	15 022	3,32	150,22	144±6	0,028	0,026±0,002
1F_0_b	14 258	2,95	142,58		0,025	
1F_0_c	13 779	2,92	137,79		0,024	
1F_20_a	8 580	2,36	85,80	102±38	0,020	0,021±0,006
1F_20_b	7 467	1,92	74,67		0,016	
1F_20_c	14 470	3,43	144,70		0,029	
1F_30_a	13 837	2,93	144,70	165±24	0,024	0,031±0,006
1F_30_b	16 896	3,89	168,96		0,032	
1F_30_c	18 637	4,29	186,37		0,036	

Zkouška ohybem

Průběhy závislosti zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 1C při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 32.



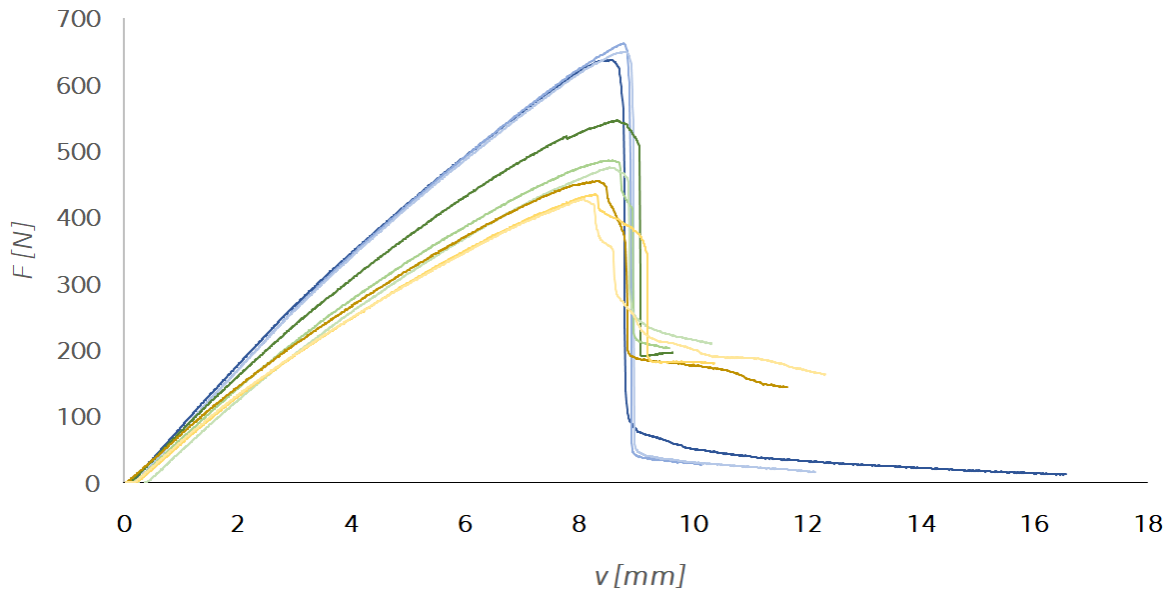
Obr. 32 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 1C.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 1C.

	F_{\max}	V_{\max}	σ_{FM}		ϵ_{FM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
1C_0_a	631	7,01	473,41	490±23	0,026	0,027±0,001
1C_0_b	689	7,56	516,51		0,028	
1C_0_c	640	7,10	480,19		0,027	
1C_20_a	433	5,94	324,81	338±13	0,022	0,023±0,001
1C_20_b	466	6,13	349,40		0,023	
1C_20_c	455	6,25	341,27		0,023	
1C_30_a	471	6,43	353,40	349±24	0,024	0,024±0,001
1C_30_b	493	6,46	370,03		0,024	
1C_30_c	430	6,01	322,54		0,023	

Průběhy závislosti zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 1D při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 33.



Obr. 33 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 1D.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 1D.

	F_{max}	v_{max}	σ_{fM}		ε_{fM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
1D_0_a	637	7,10	477,82	487±9	0,027	0,027±0,000
1D_0_b	622	7,30	496,66		0,027	
1D_0_c	649	7,32	486,80		0,027	
1D_20_a	546	7,22	409,75	377±29	0,027	0,027±0,000
1D_20_b	486	7,08	364,34		0,027	
1D_20_c	475	7,09	356,57		0,027	
1D_30_a	455	6,90	341,25	329±11	0,026	0,026±0,001
1D_30_b	435	6,88	326,19		0,026	
1D_30_c	438	6,72	320,90		0,025	

Zkouška rázové houževnatosti

V následující tabulce (tab. 17) jsou uvedeny změřené hodnoty energie potřebné k přeražení vzorků typu 1A a 1B kladivem a vypočtené hodnoty rázové houževnatosti.

Tab. 17 – Výsledky zkoušek rázové houževnatosti materiálu 1A (vlevo) a 1B (vpravo).

	E_c	a_{cu}			E_c	a_{cu}	
	[J]	[kJ/m ²]			[J]	[kJ/m ²]	
1A_0_a	9,4	235	210±22	1B_0_a	10,6	265	263±44
1A_0_b	7,7	193		1B_0_b	12,2	305	
1A_0_c	8,1	203		1B_0_c	8,7	218	
1A_20_a	8,7	218	201±14	1B_20_a	9,5	238	263±28
1A_20_b	7,7	193		1B_20_b	11,7	293	
1A_20_c	7,7	193		1B_20_c	10,3	258	
1A_30_a	10,0	250	233±27	1B_30_a	10,8	270	228±37
1A_30_b	9,9	248		1B_30_b	8,4	210	
1A_30_c	8,4	203		1B_30_c	8,1	203	

Shrnutí experimentálně určených mechanických vlastností

Hodnoty mechanických vlastností určených na základě měření uvádí tab.18.

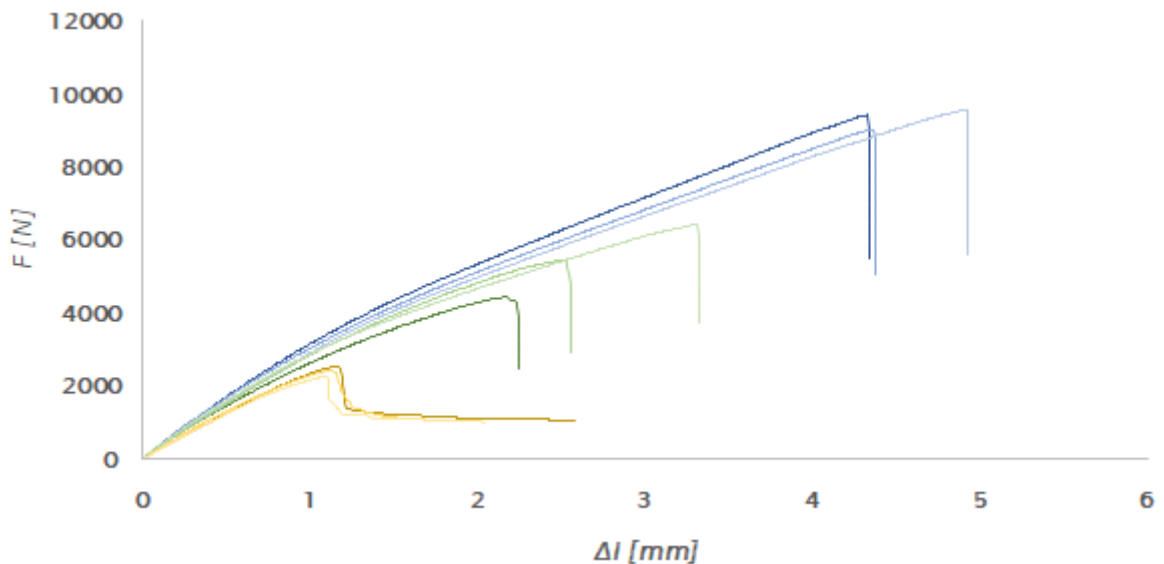
Tab. 18 – Experimentálně určené mechanické vlastnosti materiálu Delmat Epoxy 68660.

	Geometrie vzorku	Jednotka	Hodnoty vzhledem k expozici		
			0	20 000	30 000
Pevnost v tahu (Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu)	Vodorovně	[MPa]	302 (5,8 %)	283 (6,3 %)	265 (5,9 %)
	Kolmo		144 (2,6 %)	102 (2,1 %)	165 (3,1 %)
Pevnost v ohybu (Deformace na mezi pevnosti v ohybu)	Vodorovně	[MPa]	490 (2,7 %)	338 (2,3 %)	349 (2,4 %)
	Kolmo		487 (2,7 %)	377 (2,7 %)	329 (2,6 %)
Rázová houževnatost	Vodorovně	[kJ/m ²]	210	201	233
	Kolmo		263	263	228

3.3.2. Durapol F200 SMC

Zkouška tahem

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 2E při zkoušce tahem zobrazuje *obr. 34*.



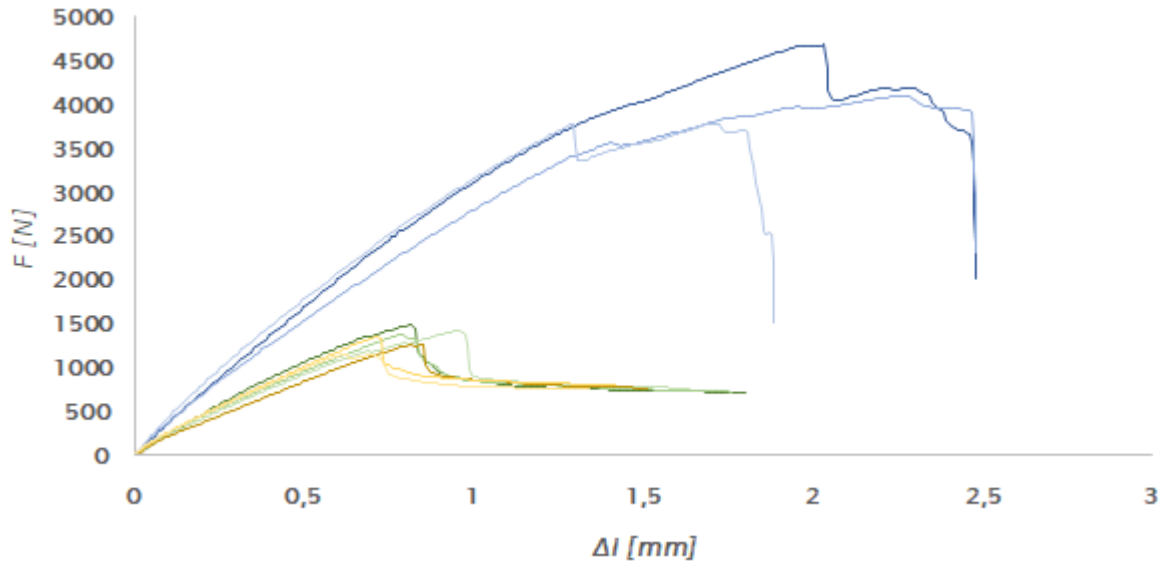
Obr. 34 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 2E.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v *tab. 19*.

Tab. 19 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 2E.

	F_{\max}	$\Delta l_{0\max}$	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
2E_0_a	9 422	4,32	94,22	93±3	0,036	0,038±0,003
2E_0_b	9 025	4,35	90,25		0,036	
2E_0_c	9 562	4,90	95,62		0,041	
2E_20_a	4 447	2,17	44,47	54±10	0,018	0,022±0,005
2E_20_b	5 441	2,51	54,41		0,021	
2E_20_c	6 438	3,31	64,38		0,028	
2E_30_a	2 522	1,15	25,55	24±1	0,010	0,009±0,001
2E_30_b	2 433	1,13	24,33		0,009	
2E_30_c	2 236	1,06	22,36		0,009	

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 2F při zkoušce tahem zobrazuje obr. 35.



Obr. 35 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 2F.

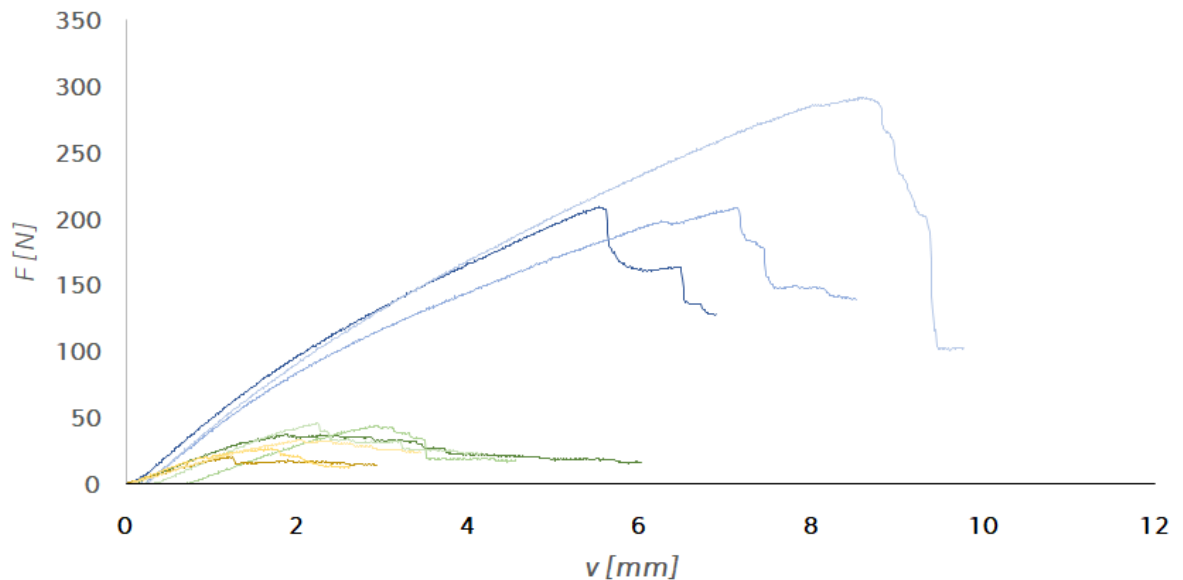
Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 20.

Tab. 20 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 2F.

	F_{\max}	$\Delta l_{0\max}$	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
2F_0_a	4 649	2,03	46,49	42±5	0,017	0,017±0,002
2F_0_b	4 101	2,26	41,01		0,019	
2F_0_c	3 783	1,71	37,83		0,014	
2F_20_a	1 483	0,81	14,83	14±1	0,007	0,007±0,001
2F_20_b	1 379	0,79	13,79		0,007	
2F_20_c	1 414	0,95	14,14		0,008	
2F_30_a	1 254	0,82	12,54	13±1	0,007	0,006±0,001
2F_30_b	1 361	0,72	13,61		0,006	
2F_30_c	1 149	0,62	11,49		0,005	

Zkouška ohybem

Průběhy závislosti zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 2C při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 36.



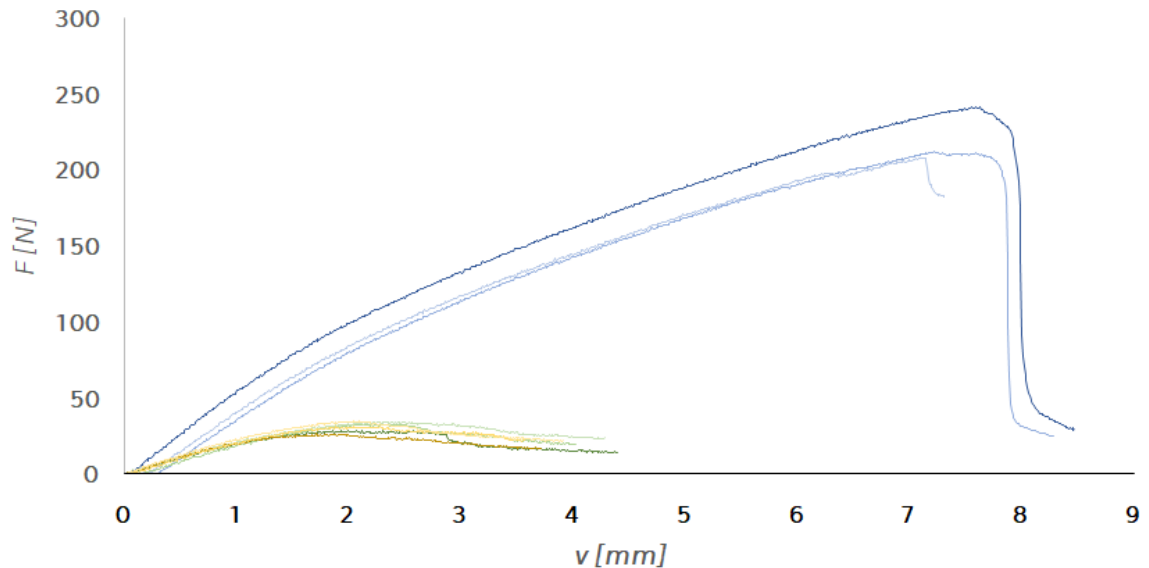
Obr. 36 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 2C.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 21.

Tab. 21 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 2C.

	F_{\max}	v_{\max}	σ_{FM}		ϵ_{FM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
2C_0_a	209	4,57	156,66	177±36	0,017	0,022±0,005
2C_0_b	208	5,89	155,66		0,022	
2C_0_c	291	7,17	218,42		0,027	
2C_20_a	37	1,54	27,98	32±3	0,006	0,007±0,002
2C_20_b	44	2,38	32,93		0,009	
2C_20_c	46	2,84	34,55		0,007	
2C_30_a	21	0,98	15,51	20±5	0,004	0,005±0,001
2C_30_b	26	1,35	19,87		0,005	
2C_30_c	33	1,67	25,05		0,006	

Průběhy závislosti zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 2D při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 37.



Obr. 37 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 2D.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 22.

Tab. 22 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 2D.

	F_{\max}	v_{\max}	σ_{FM}		ϵ_{FM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
2D_0_a	241	6,27	180,71	165±13	0,024	0,022±0,002
2D_0_b	212	5,99	158,65		0,023	
2D_0_c	209	5,46	157,11		0,020	
2D_20_a	28	1,53	21,28	24±2	0,006	0,007±0,001
2D_20_b	32	1,85	24,34		0,007	
2D_20_c	34	1,86	25,53		0,007	
2D_30_a	27	1,40	19,99	23±3	0,005	0,006±0,001
2D_30_b	31	1,88	23,18		0,007	
2D_30_c	34	1,68	25,85		0,006	

Zkouška rázové houževnatosti

V následující tabulce (tab. 23) jsou uvedeny změřené hodnoty energie potřebné k přeražení vzorků typu 2A a 2B kladivem a vypočtené hodnoty rázové houževnatosti.

Tab. 23 – Výsledky zkoušek rázové houževnatosti materiálu 2A (vlevo) a 2B (vpravo).

	E_c	a_{cU}			E_c	a_{cU}	
	[J]	[kJ/m ²]			[J]	[kJ/m ²]	
2A_0_a	5,1	128	112±16	2B_0_a	3	75	70±16
2A_0_b	4,5	113		2B_0_b	2,1	53	
2A_0_c	3,8	95		2B_0_c	3,3	83	
2A_20_a	2,4	60	53±11	2B_20_a	1,8	45	37±8
2A_20_b	2,3	58		2B_20_b	1,4	35	
2A_20_c	1,6	40		2B_20_c	1,2	30	
2A_30_a	2,2	55	55±8	2B_30_a	1,4	35	36±4
2A_30_b	2,5	63		2B_30_b	1,3	33	
2A_30_c	1,9	48		2B_30_c	1,6	40	

Shrnutí experimentálně určených mechanických vlastností

Hodnoty mechanických vlastností určených na základě měření uvádí tab. 24.

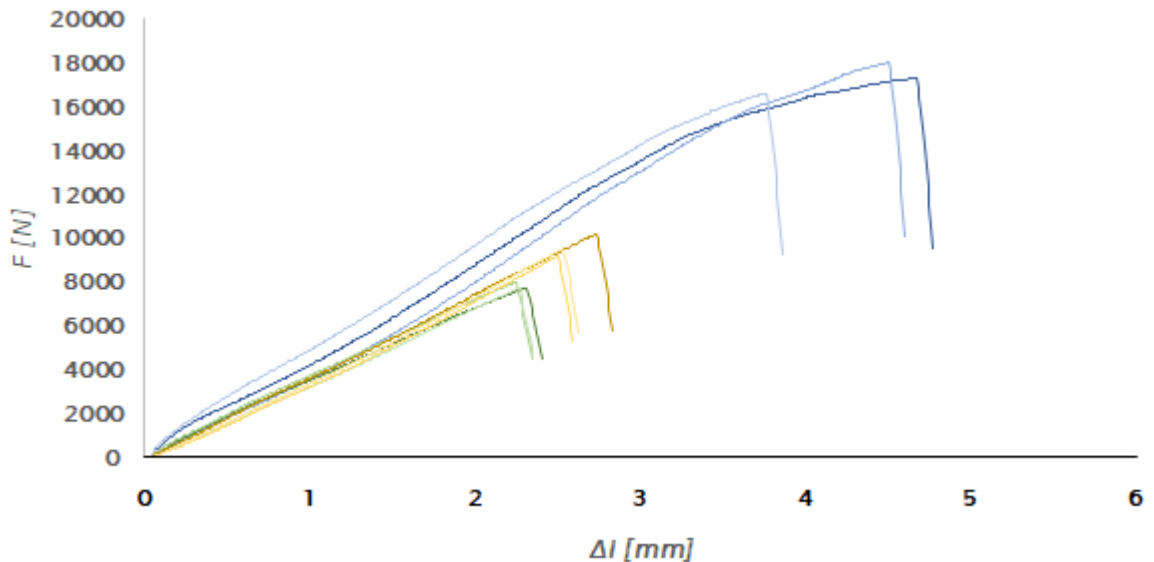
Tab. 24 – Experimentálně určené mechanické vlastnosti materiálu Durapol F200 SMC.

	Geometrie vzorku	Jednotka	Hodnoty vzhledem k expozici		
			0	20 000	30 000
Pevnost v tahu (Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu)	Vodorovně	[MPa]	93 (3,8 %)	54 (2,2 %)	24 (0,9 %)
	Kolmo		42 (1,7 %)	14 (0,7 %)	13 (0,6 %)
Pevnost v ohybu (Deformace na mezi pevnosti v ohybu)	Vodorovně	[MPa]	177 (2,2 %)	32 (0,7 %)	20 (0,5 %)
	Kolmo		165 (2,2 %)	24 (0,7 %)	23 (0,6 %)
Rázová houževnatost	Vodorovně	[kJ/m ²]	112	53	55
	Kolmo		70	37	36

3.3.3. Pamitherm 41140

Zkouška tahem

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 3E při zkoušce tahem zobrazuje *obr. 38*.



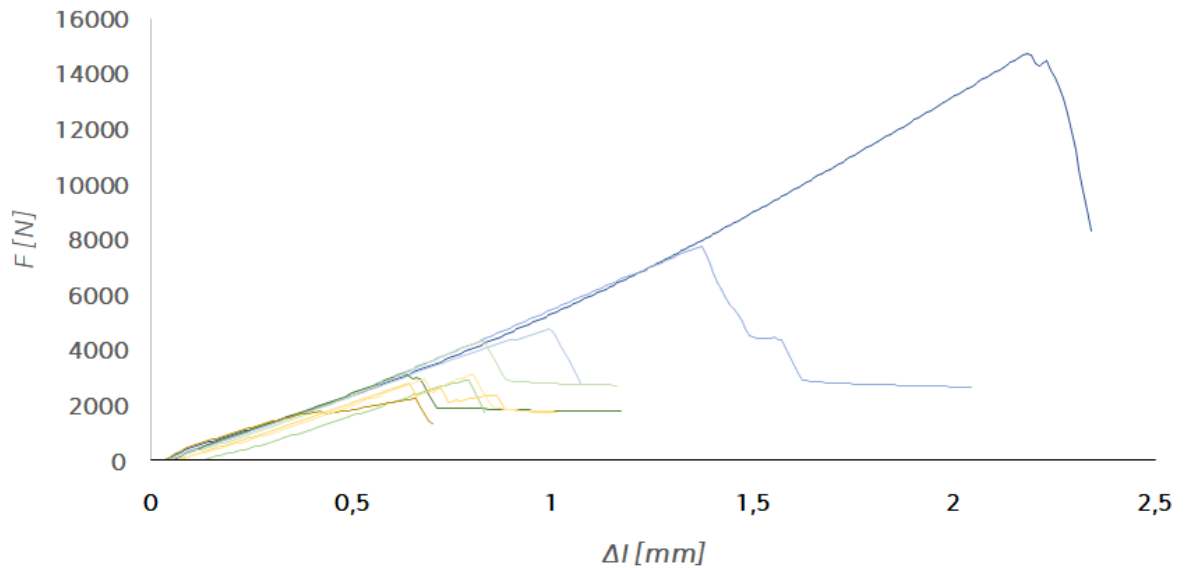
Obr. 38 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 3E.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v *tab. 25*.

Tab. 25 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 3E.

	F_{\max}	$\Delta l_{0\max}$	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
3E_0_a	17 301	3,87	173,01	173±7	0,032	0,030±0,003
3E_0_b	17 997	3,72	179,97		0,031	
3E_0_c	16 594	3,10	165,94		0,026	
3E_20_a	7 724	1,90	77,24	78±2	0,016	0,016±0,001
3E_20_b	7 978	1,85	79,78		0,015	
3E_20_c	7 692	1,86	76,92		0,016	
3E_30_a	10 186	2,25	101,86	96±5	0,019	0,018±0,001
3E_30_b	9 161	2,06	91,61		0,017	
3E_30_c	9 483	2,08	94,83		0,017	

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 3F při zkoušce tahem zobrazuje *obr. 39*.



Obr. 39 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 3F.

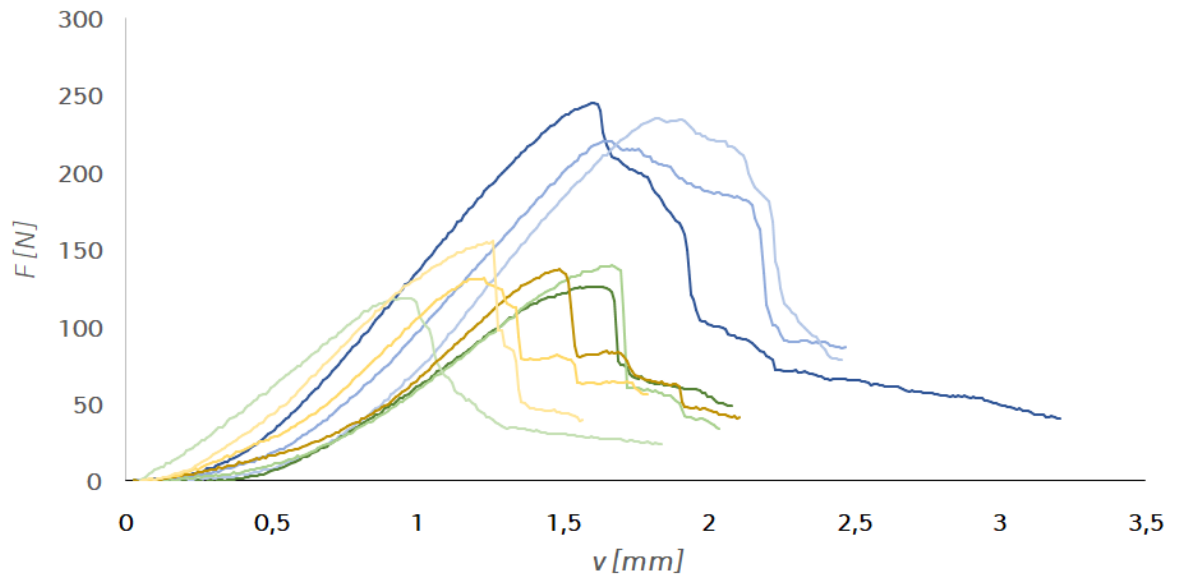
Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v *tab. 26*.

Tab. 26 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 3F.

	F_{\max}	$\Delta l_{0\max}$	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
3F_0_a	14 733	1,79	147,33	91±51	0,015	0,010±0,004
3F_0_b	7 727	1,12	77,27		0,009	
3F_0_c	4 747	0,80	47,47		0,007	
3F_20_a	3 163	0,50	31,63	35±8	0,004	0,005±0,001
3F_20_b	2 904	0,63	29,04		0,005	
3F_20_c	4 320	0,66	43,20		0,005	
3F_30_a	2 261	0,52	22,61	27±4	0,005	0,005±0,001
3F_30_b	2 804	0,51	28,04		0,004	
3F_30_c	3 119	0,63	31,19		0,005	

Zkouška ohybem

Průběhy závislosti zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 3C při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 40.



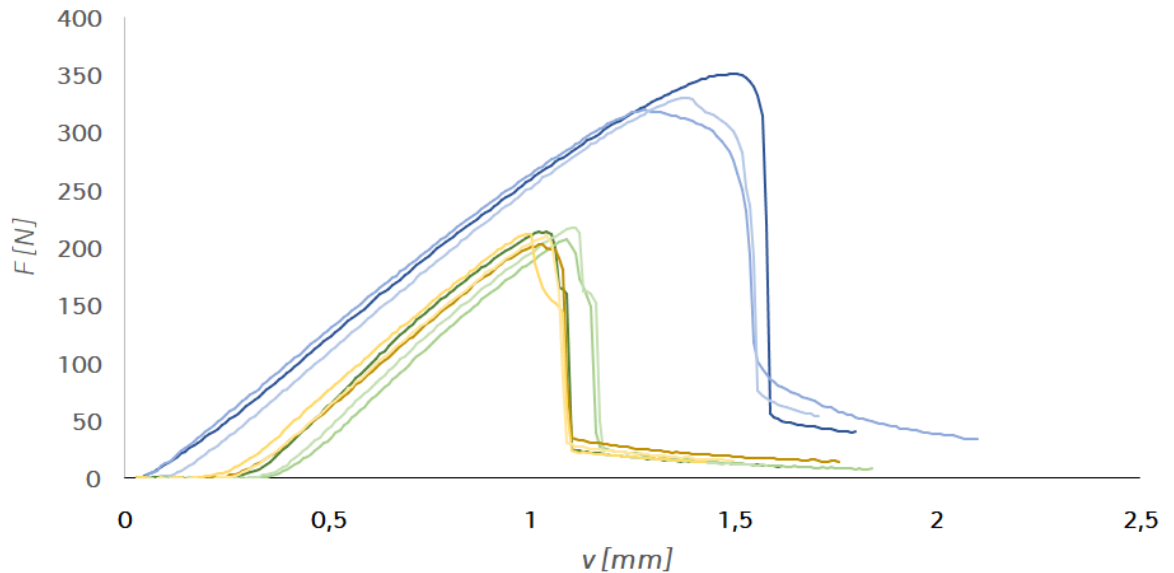
Obr. 40 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 3C.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 27.

Tab. 27 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 3C.

	F_{max}	v_{max}	σ_{fM}		ε_{fM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
3C_0_a	245	1,32	183,47	175±9	0,005	0,005±0,001
3C_0_b	220	1,34	165,14		0,005	
3C_0_c	235	1,49	175,98		0,006	
3C_20_a	126	1,30	94,57	96±8	0,005	0,004±0,001
3C_20_b	139	1,37	104,59		0,005	
3C_20_c	119	0,77	88,88		0,003	
3C_30_a	137	1,22	102,70	106±10	0,005	0,004±0,001
3C_30_b	131	1,00	98,30		0,004	
3C_30_c	156	1,03	116,88		0,004	

Průběhy závislosti zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 3D při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 41.



Obr. 41 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 3D.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 28.

Tab. 28 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 3D.

	F_{\max}	v_{\max}	σ_{FM}		ϵ_{FM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
3D_0_a	351	1,23	263,27	250±12	0,005	0,004±0,001
3D_0_b	319	1,04	239,30		0,004	
3D_0_c	329	1,13	246,94		0,004	
3D_20_a	213	0,83	160,05	159±4	0,003	0,003±0,000
3D_20_b	207	0,88	155,06		0,003	
3D_20_c	217	0,90	162,41		0,003	
3D_30_a	203	0,83	151,96	156±4	0,003	0,003±0,000
3D_30_b	212	0,80	158,82		0,003	
3D_30_c	211	0,84	157,93		0,003	

Zkouška rázové houževnatosti

V následující tabulce (tab. 29) jsou uvedeny změřené hodnoty energie potřebné k přeražení vzorků typu 3A a 3B kladivem a vypočtené hodnoty rázové houževnatosti.

Tab. 29 – Výsledky zkoušek rázové houževnatosti materiálu 3A (vlevo) a 3B (vpravo).

	E_c	a_{cu}			E_c	a_{cu}	
	[J]	[kJ/m ²]			[J]	[kJ/m ²]	
3A_0_a	1,6	40	39±1	3B_0_a	2,8	70	71±1
3A_0_b	1,5	38		3B_0_b	2,8	70	
3A_0_c	1,6	40		3B_0_c	2,9	73	
3A_20_a	1	25	27±1	3B_20_a	1,6	40	40±0
3A_20_b	1,1	28		3B_20_b	1,6	40	
3A_20_c	1,1	28		3B_20_c	1,6	40	
3A_30_a	1	70	27±1	3B_30_a	1,8	45	46±1
3A_30_b	1,1	70		3B_30_b	1,8	45	
3A_30_c	1,1	73		3B_30_c	1,9	48	

Shrnutí experimentálně určených mechanických vlastností

Hodnoty mechanických vlastností určených na základě měření uvádí tab. 30.

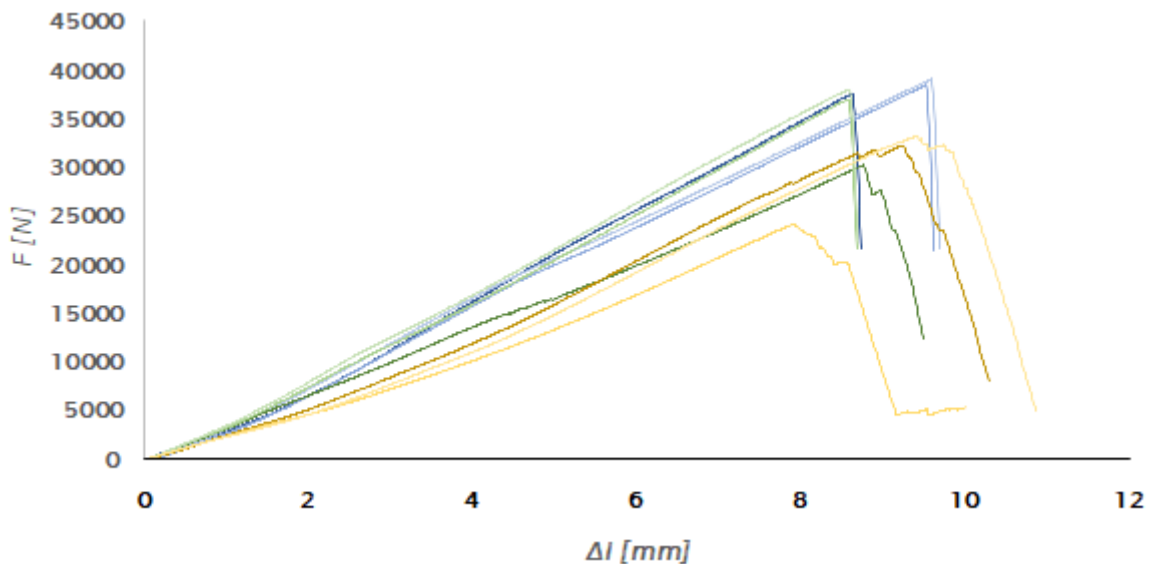
Tab. 30 – Experimentálně určené mechanické vlastnosti materiálu Pamitherm 41140.

	Geometrie vzorku	Jednotka	Hodnoty vzhledem k expozici		
			0	20 000	30 000
Pevnost v tahu (Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu)	Vodorovně	[MPa]	173 (3,0 %)	78 (1,6 %)	96 (1,8 %)
	Kolmo		91 (1,0 %)	35 (0,5 %)	27 (0,5 %)
Pevnost v ohybu (Deformace na mezi pevnosti v ohybu)	Vodorovně	[MPa]	175 (0,5 %)	96 (0,4 %)	106 (0,4)
	Kolmo		250 (0,4 %)	159 (0,3 %)	156 (0,3 %)
Rázová houževnatost	Vodorovně	[kJ/m ²]	39	27	27
	Kolmo		71	40	46

3.3.4. Vetronit G11

Zkouška tahem

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 4E při zkoušce tahem zobrazuje obr. 42.



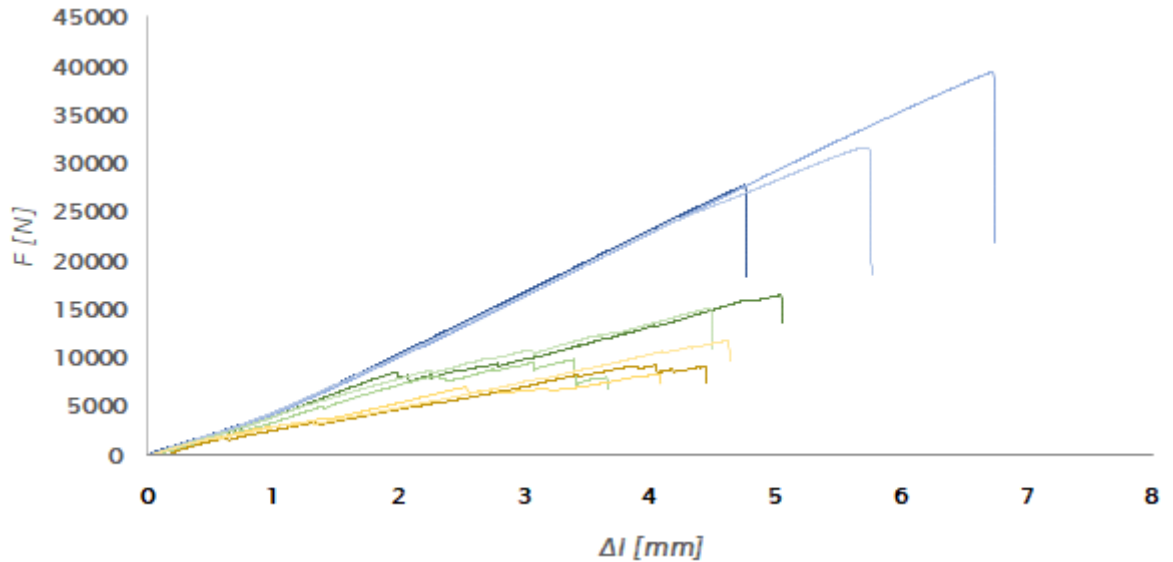
Obr. 42 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 4E.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 31.

Tab. 31 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 4E.

	F_{\max}	$\Delta l_{0\max}$	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
4E_0_a	37 470	7,15	374,70	383±8	0,060	0,064±0,004
4E_0_b	38 429	7,90	384,29		0,066	
4E_0_c	39 042	7,96	390,42		0,066	
4E_20_a	30 185	7,27	301,85	350±42	0,061	0,060±0,001
4E_20_b	36 954	7,12	369,54		0,059	
4E_20_c	37 951	7,12	379,51		0,059	
4E_30_a	32 200	7,64	322,00	298±50	0,064	0,061±0,006
4E_30_b	24 090	6,58	240,90		0,055	
4E_30_c	33 154	7,82	331,54		0,065	

Průběhy závislostí osového zatížení na prodloužení zkušebních vzorků typu 4F při zkoušce tahem zobrazuje obr. 43.



Obr. 43 – Průběhy tahových zkoušek materiálu 4F.

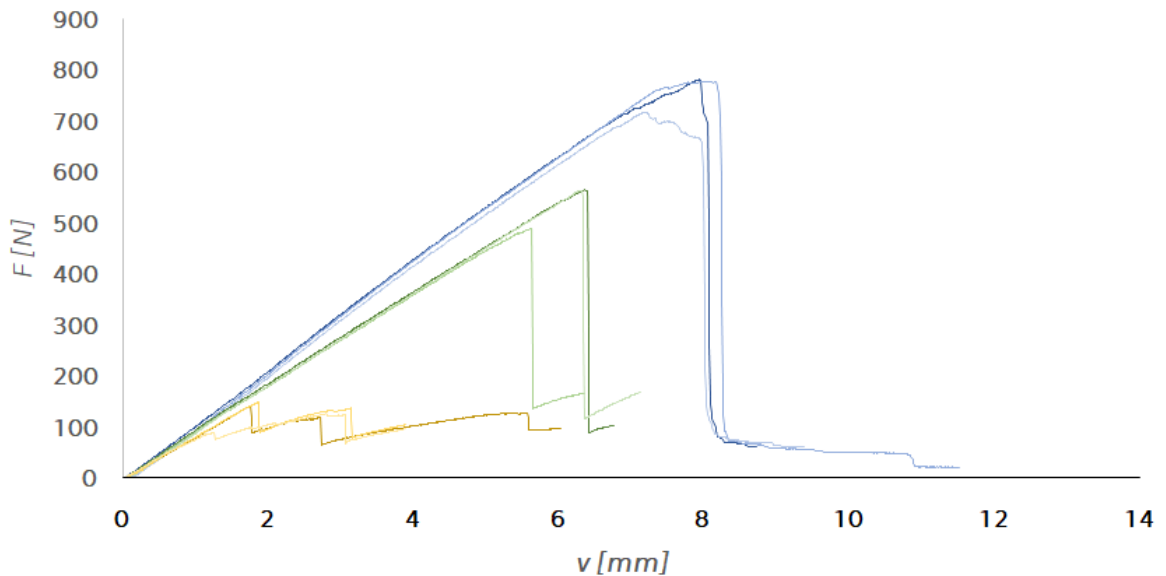
Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 32.

Tab. 32 – Výsledky tahových zkoušek materiálu 4F.

	F_{\max}	$\Delta l_{0\max}$	σ_m		ϵ_m	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
4F_0_a	27 716	4,75	277,16	329±60	0,040	0,048±0,008
4F_0_b	39 336	6,71	393,36		0,056	
4F_0_c	31 556	5,70	315,56		0,048	
4F_20_a	17 139	6,71	171,39	140±38	0,056	0,040±0,014
4F_20_b	9 801	3,39	98,01		0,028	
4F_20_c	15 109	4,47	151,09		0,037	
4F_30_a	9 211	4,04	92,11	97±18	0,034	0,035±0,003
4F_30_b	8 313	4,08	83,13		0,034	
4F_30_c	11 712	4,61	117,12		0,038	

Zkouška ohybem

Průběhy závislosti zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 4C při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 44.



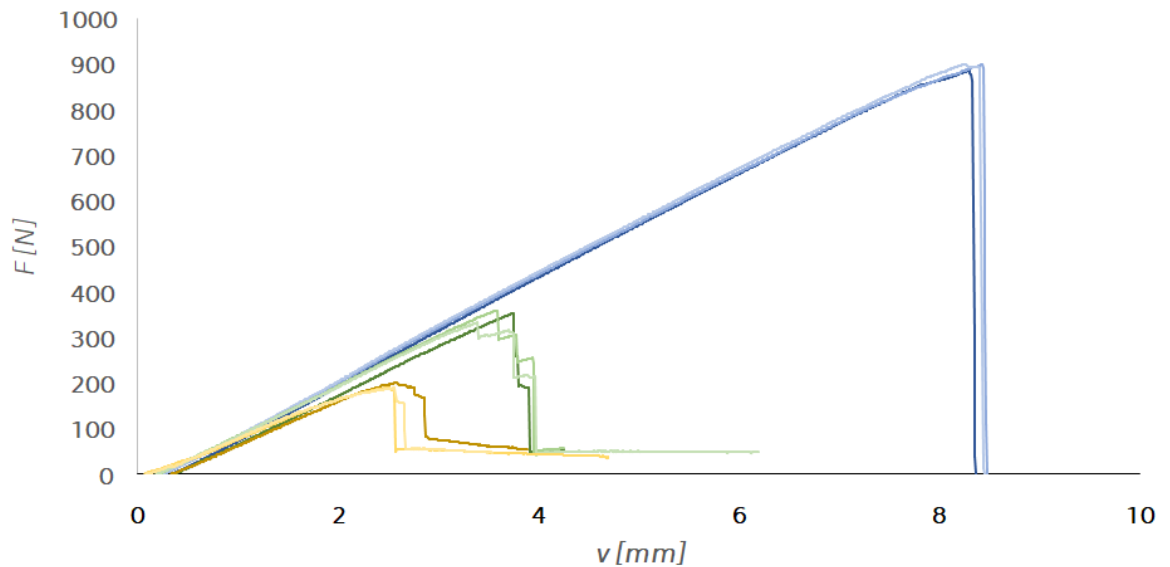
Obr. 44 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 4C.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 33.

Tab. 33 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 4C.

	F_{\max}	V_{\max}	σ_{FM}		ϵ_{FM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
4C_0_a	780	6,59	584,92	568±27	0,025	0,024±0,001
4C_0_b	777	6,68	582,44		0,025	
4C_0_c	716	5,97	536,85		0,022	
4C_20_a	564	5,27	423,32	404±32	0,020	0,019±0,001
4C_20_b	489	4,67	366,81		0,018	
4C_20_c	563	5,22	422,29		0,020	
4C_30_a	140	1,44	105,20	103±9	0,005	0,007±0,002
4C_30_b	147	1,53	110,43		0,006	
4C_30_c	125	2,31	93,94		0,009	

Průběhy závislostí zatěžující síly na průhybu zkušebních vzorků typu 4D při zkoušce ohybem zobrazuje obr. 45.



Obr. 45 – Průběhy zkoušek ohybem materiálu 4D.

Naměřené mezní hodnoty a vypočítané hodnoty mechanických vlastností dílčích vzorků jsou uvedeny v tab. 34.

Tab. 34 – Výsledky zkoušek ohybem materiálu 4D.

	F_{\max}	v_{\max}	σ_{FM}		ϵ_{FM}	
	[N]	[mm]	[MPa]		[1]	
4D_0_a	886	6,89	664,19	671±6	0,026	0,026±0,000
4D_0_b	899	7,00	674,07		0,026	
4D_0_c	899	6,87	674,26		0,026	
4D_20_a	354	3,10	265,61	262±10	0,012	0,014±0,005
4D_20_b	360	2,97	269,96		0,011	
4D_20_c	334	5,22	250,13		0,020	
4D_30_a	202	2,13	151,26	146±5	0,008	0,008±0,000
4D_30_b	191	2,05	143,37		0,008	
4D_30_c	190	2,11	142,16		0,008	

Zkouška rázové houževnatosti

V následující tabulce (tab. 35) jsou uvedeny změřené hodnoty energie potřebné k přeražení vzorků typu 4A a 4B kladivem a vypočtené hodnoty rázové houževnatosti.

Tab. 35 – Výsledky zkoušek rázové houževnatosti materiálu 4A (vlevo) a 4B (vpravo).

	E_c	a_{cu}			E_c	a_{cu}	
	[J]	[kJ/m ²]			[J]	[kJ/m ²]	
4A_0_a	7,2	180	170±9	4B_0_a	10,7	268	261±12
4A_0_b	6,7	168		4B_0_b	9,9	248	
4A_0_c	6,5	163		4B_0_c	10,7	268	
4A_20_a	12,1	303	283±56	4B_20_a	3,8	95	108±13
4A_20_b	8,8	220		4B_20_b	4,4	110	
4A_20_c	13,1	328		4B_20_c	4,8	120	
4A_30_a	15,4	385	317±59	4B_30_a	4,3	108	95±11
4A_30_b	11,4	285		4B_30_b	3,6	90	
4A_30_c	11,2	280		4B_30_c	3,5	88	

Shrnutí experimentálně určených mechanických vlastností

Hodnoty mechanických vlastností určených na základě měření uvádí tab. 36.

Tab. 36 – Experimentálně určené mechanické vlastnosti materiálu Vetronit G11.

	Geometrie vzorku	Jednotka	Hodnoty vzhledem k expozici		
			0	20 000	30 000
Pevnost v tahu (Poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu)	Vodorovně	[MPa]	383 (6,4 %)	350 (6,0 %)	298 (6,1 %)
	Kolmo		329 (4,8 %)	140 (4,0 %)	97 (3,5 %)
Pevnost v ohybu (Deformace na mezi pevnosti v ohybu)	Vodorovně	[MPa]	568 (2,4 %)	404 (1,9 %)	103 (0,7 %)
	Kolmo		671 (2,6 %)	262 (1,4 %)	146 (0,8 %)
Rázová houževnatost	Vodorovně	[kJ/m ²]	170	283	317
	Kolmo		261	108	95

3.4. Diskuse experimentálně určených hodnot mechanických vlastností

Delmat Epoxy 68660

Ve vodorovné geometrii se prokázal vysokými hodnotami meze pevnosti v tahu, s teplotní expozicí hodnoty sice klesaly, ale nedostaly se pod garantované hodnoty. Naopak v případě geometrie kolmo byly hodnoty meze pevnosti v tahu silně nedostatečné pro všechna teplotní zatížení včetně vzorků bez teplotní expozice. Při teplotním zatížení na 30 000 hodin se hodnoty paradoxně výrazně zvýšily. Z výsledků je patrné, že je tento materiál při tahovém namáhání silně anizotropní a při dimenzování záleží, v jakém směru vzhledem ke geometrii výztuže zatížení působí.

Při zatížení ohybem naopak na geometrii vůbec nezáleželo, v obou případech materiál vykazoval podobné hodnoty meze pevnosti v ohybu, a to jak ve stavu bez teplotní expozice, tak po obou teplotním zatížení. Hodnoty meze pevnosti v ohybu bez teplotní expozice vycházely s rezervou v souladu s materiálovým listem výrobce, po simulaci teplotní expozice byly hodnoty nedostačující.

Hodnoty rázové houževnatosti byly naměřeny pro obě geometrie až čtyřnásobně takové, než garantuje výrobce a celkově byly dostačující i po teplotní expozici. U geometrie vodorovně po tepelné expozici dokonce došlo k výraznému nárůstu hodnot nad hranici výsledků bez teplotního zatížení.

Z obr. 46 je patrné, jaký má teplotní expozice vliv na zbarvení vzorků. Přestože se na první pohled zdá, že vzorky prošly tepelnou degradací, hodnoty jejich mechanických vlastností jsou stále optimální. Dále je patrný rozdíl v mechanickém porušení vzorku. V případě geometrie vodorovně byl vzorek kompletně přeražen, naopak u geometrie kolmo výztuž zabránila úplnému rozdělení vzorku.



Obr. 46 – Vzorky materiálu Delmat Epoxy 68660 po zkoušce rázové houževnatosti – geometrie vodorovně (nahore) a kolmo (dole).

Durapol F200 SMC

Podobně jako u materiálů Delmat Epoxy 68660 se u v tomto případě prokázala silná anizotropie v případě namáhání tahem. V případě vodorovné geometrie byly naměřeny vyhovující hodnoty u vzorků bez teplotní expozice a jen mírně nevyhovující po simulaci pro garantované 20 000 hodinové zatížení. Naopak u kolmé geometrie vycházely již ve stavu bez teplotní expozice podstatně nižší hodnoty meze pevnosti v tahu, než jsou uvedeny v materiálovém listu výrobce.

I ohybové vlastnosti prokazovaly určitou analogii s předchozím materiálem. Hodnoty meze pevnosti v ohybu pro obě geometrie vycházely velmi podobně. V případě teplotně neexponovaných vzorků byla hodnota v souladu s garantovanou hodnotou, avšak hodnoty po teplotním zatížení byly přibližně pětina, tedy silně nedostatečné. Porovnání maximálních průhybů a různé zabarvení způsobené teplotní expozicí je zřetelné z obr. 47.

Rázová houževnatost vycházela lépe v případě vodorovné geometrie. Hodnoty po teplotní expozici byly jen nízko pod garantovanou hranicí. V případě geometrie kolmo byly hodnoty po teplotní expozici podstatně nižší, než je uváděno výrobcem.

Výsledky měření tohoto materiálu se nadají považovat za úplně optimální. Teplotní expozice materiál výrazně ovlivnila, což je patrné zejména z výsledků zkoušky ohybem. Na rozdíl od ostatních materiálů tvoří v tomto případě matici termoplastický polymer. Termoplasty jsou obecně mnohem náchylnější na teplotní zatížení, a přestože nedošlo k degradaci materiálu, mohla teplota výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti.



Obr. 47 - Vzorky materiálu Durapol F200 SMC po zkoušce ohybe – bez teplotního zatížení (nahore) a po teplotní expozici (dole).

Pamitherm 41140

Výsledky zkoušky tahem v případě vodorovné geometrie se vždy vzhledem k teplotnímu zatížení shodovaly, naopak u kolmé geometrie se hodnoty dílčích měření velmi lišily. Různá porušení vzorků vzhledem k jejich geometrii je na obr. 48.

U zkoušky ohybem byly zaznamenány ukázkové hodnoty u geometrie kolmo. Hodnota meze pevnosti v ohybu pro neexponované vzorky vysoce přesahovala výrobcem uváděnou hranici a po simulaci teplotní expozice 20 000 hodin byly výsledky také příznivé. V případě vodorovné geometrie se s materiálovým listem ztotožňovaly jen hodnoty neexponovaných vzorků.

Hodnoty rázové houževnatosti stejně tak jako hodnoty meze pevnosti v tahu výrobce neuvádí a tím pádem nejdou porovnat. Porovnání s jinými publikacemi není relevantní z důvodu velké variability dílčích složek materiálu, kdy i malé množství přísad, které je většinou vedeno jako výrobní tajemství, může výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu.



Obr. 48 - Vzorky materiálu Pamitherm 41140 po zkoušce tahem – (shora) geometrie vodorovně, geometrie vodorovně (pohled ze strany) a geometrie kolmo.

Vetronit G11

Anizotropie se prokázala i v případě tahových vlastností tohoto materiálu. Hodnoty meze pevnosti v tahu byly vyhovující pro neexponované vzorky a pro vzorky se simulací 20 000 hodin jen u geometrie vodorovně. V případě teplotně ovlivněných vzorků však docházelo u většiny zkoušek k delaminaci vrstev kompozitu – viz. obr. 49.

Ohybové vlastnosti vycházely v souladu s materiálovým listem u obou geometrií, ovšem jen u vzorků, které nebyly vystaveny teplotnímu zatížení.

Zkoušky rázové houževnatosti opět dopadly velmi příznivě, v případě vodorovné geometrie se její hodnoty se zvyšující teplotou dokonce zvyšovaly.



Obr. 49 – Delaminace vzorku materiálu Vetronit G11 po zkoušce tahem.

4. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zhodnotit kvalitu, potažmo mechanické vlastnosti polymerních kompozitních materiálů pro tepelné izolace před a po teplotní expozici.

Samotný experiment spočíval v zahřátí dávky zkušebních vzorků na předem vypočítanou teplotu. Po uplynutí simulace 20 000 hodin byla vybrána polovina vzorků a druhá polovina byla dále tepelně exponována až na hodnotu simulace 30 000 hodin. Po tepelné expozici byly vzorky společně s tepelně neexponovanými podrobeny mechanickým zkouškám, na základě jejichž výsledků lze konstatovat následující závěry.

Výsledky obecně poukázaly na různé chování vzorků vzhledem k jejich zatěžování a geometrii. Zatímco u většiny tahových zkoušek vzorky vykazovaly různou míru anizotropie, na namáhání ohybem reagovaly zpravidla v obou směrech stejně.

Hodnoty mechanických vlastností materiálů po teplotní expozici byly vzhledem k teplotně neexponovaným vzorkům nižší, avšak ve velké míře vyhovovaly hodnotám, které jsou garantované v materiálovém listu.

Vzhledem k výsledkům mechanických zkoušek po teplotní expozici materiálu Durapol F200 SMC se dá konstatovat, že došlo k degradaci polymerní matrice. Nasvědčuje tomu i fakt, že k umělému stárnutí docházelo při teplotě 227 °C, která je v DSC diagramu velmi blízko oblasti, kde se začíná zvedat degradační peak. Přestože byla degradace zřejmě pouze na svém počátku, materiál byl takřka nepoužitelný.

Hodnoty experimentálně určených mechanických vlastností ostatních materiálů jsou uspokojivé. Nedostatečné hodnoty mechanických vlastností vycházely zejména u vzorků s geometrií kolmo, což se dá přisuzovat tomu, že výztuž v tomto případě nepokrývá dominantní plochu, nýbrž je vrstvena kolmo na ni, a to v pouze malých plochách. Pro aplikaci jsou jednoznačně výhodnější kompozitní materiály, které mají vodorovný smysl výztuže.

5. Seznam citovaných zdrojů

- [1] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] PLAČEK, Vít. *Simulation of long term cable ageing at elevated temperature* [online]. In: . [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/kontakty/vsechny-kontakty/ing.-vit-placek-10445>.
- [3] MACEK, Karel. *Nauka o materiálu*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02543-8.
- [4] *Kompozity – Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc.* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>.
- [5] LAŠ, Vladislav. *Úvod do modelování v mechanice: Mechanika kompozitních materiálů - 1* [online]. In: . [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/mhajzman/download/UMM09/UMM__6.pdf.
- [6] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [7] *Návrh a analýza kompozitních konstrukcí: Vlákenné kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba* [online]. In: . [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2__seminar/1__materialy__technologie.pdf.
- [8] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [9] *Slinuté karbidy* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03007.html>.
- [10] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [11] DAĐOUREK, Karel. *Nanokompozity: Druhy vláken* [online]. In: . [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady__kmt__magistri/NKM/04vlakna.pdf.
- [12] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.

- [13] SIGMUND, Ota. *VÝZKUM MATRIC PRO PREPREG APLIKACE* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/edka9s/>>.
- [14] *Slída. ISOMA* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.isoma.cz/slida>.
- [15] Verbundwerkstoffe. In: *Von Roll* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: https://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1576751079795980/2.07.02_CO_MPOSITES_DE.pdf.
- [16] *Polymer Properties Database: POLYBISMALEIMIDES (BMI)* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polybismaleimide%20type.html>.
- [17] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [18] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [19] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [20] CHAWLA, Krishan Kumar. *Composite materials: science and engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 03-879-8409-7.
- [21] *Degradace plastů* [online]. In: . [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://vyuka.zmoravec.net/download/download/koroze-plastu.pdf>.
- [22] *Plant Support Engineering: Nuclear Power Plant Equipment Qualification Reference Manual, Revision 1* [online]. 2010 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.epri.com/research/products/1021067>.
- [23] PLAČEK, V. Assessment of parameters for simulation of thermal ageing of materials in nuclear power plants using DSC. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. 2005, 80(2), 525-528 [cit. 2020-07-22]. DOI: 10.1007/s10973-005-0688-4. ISSN 1388-6150. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-005-0688-4>.

- [24] *Design of Structures, Components, Equipment and Systems – AP1000 Design Control Document: APPENDIX 3D – METHODOLOGY FOR QUALIFYING AP1000 SAFETY-RELATED ELECTRICAL AND MECHANICAL EQUIPMENT* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/Portals/5/Documents/documentation%20pdfs/Chapter%203%20Appendix%203D.pdf>.
- [25] *Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC)* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/cwl2js87vLAsPwUA.pdf?redirected>.
- [26] ASTM E698-11, Standard Test Method for Arrhenius Kinetic Constants for Thermally Unstable Materials Using Differential Scanning Calorimetry and the Flynn/Wall/Ozawa Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [27] Delmat Epoxy 68660. *Von Roll Markets and products* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.vonroll.com/en/product-detail/delmat-epoxy-68660/?id=product15604>.
- [28] Durapol F200 SMC. *Von Roll Markets and products* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.vonroll.com/en/product-detail/durapol-f200-smc/?id=product15674>.
- [29] Pamitherm 41140. *Von Roll Markets and products* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.vonroll.com/en/product-detail/pamitherm-41140/?id=product15751>.
- [30] Vetronite G11. *Von Roll Markets and products* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.vonroll.com/en/product-detail/vetronite-g11/?id=product15904>.
- [31] Vlastnosti materiálů pro elektrickou izolaci. *ISOMA* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: https://wense.blob.core.windows.net/media/isoma/vlastnosti-materialu/vlastnosti-materialu-pro-elektrickou-izolaci_v2.0.pdf.
- [32] Vlastnosti materiálů pro tepelnou izolaci. *ISOMA* [online]. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: https://wense.blob.core.windows.net/media/isoma/vlastnosti-materialu/vlastnosti-materialu-pro-tepelnou-izolaci_v2.0.pdf.
- [33] Delmat. *ISOMA* [online]. [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://www.isoma.cz/delmat>.
- [34] *UL 94 - Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*. March 28, 2013.

- [35] Vetronit. *ISOMA* [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.isoma.cz/vetronit>.
- [36] ČSN EN ISO 527-4: *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny*. 1998.
- [37] ČSN EN ISO 178: *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. 2003.
- [38] ČSN EN ISO 179-1: *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. 2011.
- [39] ČSN EN 60216-1 ed. 2 (346416): *Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti – Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky*. 2013.