

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Srovnávací studie materiálů pro díl v letecké konstrukci

Comparative study of materials for a part in aviation construction

AUTOR: Jan Vosáhlo

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Taťana Vacková PhD.

PRAHA 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Vosáhl	Jméno: Jan	Osobní číslo: 457588
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav materiálového inženýrství		
Studijní program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství		
Studijní obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Srovnávací studie materiálů pro díl v letecké konstrukci

Název bakalářské práce anglicky:

Comparative study of materials for part in aviation construction

Pokyny pro vypracování:

Cíl: Provést srovnání použití možných materiálů pro potrubí předchladiče se zřetelem na jeho pracovní podmínky.
Postup:

1. Literární rešerše pro návrh vhodných materiálů
2. Příprava vzorků
3. Návrh a provedení zkoušek
4. Vyhodnocení experimentů
5. Porovnání variant a závěr

Seznam doporučené literatury:

[1] Luděk Ptáček a kol. Nauka o materiálu I a II. Praha: Akademické nakladatelství CERM, 2003.
[2] Gottfried W. Ehrenstein. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2006.
[3] Joseph Davidovits. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. Thermal Analysis, 1991, p.1633-1656.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Taťana Vacková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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

Ing. Miroslav Černý, CSc., oddělení mechaniky KÚ

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Taťana Vacková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

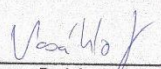

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

24.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Praze dne:

.....
Podpis

Anotace

Tato práce se zabývá srovnávací studií materiálů pro díl v letecké konstrukci, kterým je potrubí předchladiče. Práce porovnává použití geopolymerního kompozitu s jinými kompozitními materiály a korozivzdornou ocelí. Obsahem teoretické části je charakteristika kompozitních materiálů, geopolymerů, potrubí předchladiče a kapitola věnující se porovnání použitelných materiálů. Experimentální část je věnována měření součinitele délkové teplotní roztažnosti vybraných materiálů.

Klíčová slova

kompozitní materiály, geopolymer, délková teplotní roztažnost

Annotation

This thesis deals with the comparative study of materials for a part in aviation construction, which is the pipeline of the pre-cooler. This thesis compares the use of geopolymer composite with other composite materials and stainless steel. The content of the theoretical part is a characteristic of composite materials, geopolymers, pipeline of the pre-cooler and a chapter dealing with the comparison of applicable materials. The experimental part is focused on the measurement of the coefficient of linear thermal expansion of selected materials.

Keywords

composite materials, geopolymer, linear thermal expansion

Poděkování

Chtěl bych poděkovat paní Ing. Taťaně Vackové, PhD. za její vedení, podnětné rady a projevenou trpělivost. Rovněž bych rád poděkoval panu Ing. Miroslavovi Černému, CSc. za jeho cenné rady a pomoc při zpracování praktické části této práce. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Zdeňce Jeníkové PhD. za její připomínky při zpracování této práce. Nakonec bych rád poděkoval Kloknerovu ústavu ČVUT, Centru kompozitů za možnost provedení všech zkoušek a společnosti AERO Vodochody AEROSPACE a.s. za zajímavé téma bakalářské práce.

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých zkratk.....	9
Úvod	10
1. Kompozitní materiály	11
1.1. Výztuž	11
1.1.1. Dělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže	12
1.1.2. Dělení vláken podle druhu materiálu.....	15
1.2. Matrice	17
1.2.1. Dělení kompozitních materiálů podle druhu matrice	17
2. Geopolymery.....	19
2.1. Historie	19
2.2. Co jsou geopolymery.....	20
2.3. Geopolymerace	20
3. Potrubí předchladiče	21
4. Srovnání použitelných materiálů	22
4.1. Geopolymerní kompozit.....	22
4.1.1. Výrobní technologie	22
4.1.2. Hustota	27
4.2. Kompozit s polyimidovou matricí.....	27
4.2.1. Výrobní technologie	27
4.2.2. Hustota	29
4.3. Kompozit s bismaleimidovou matricí.....	29
4.3.1. Výrobní technologie	30
4.3.2. Hustota	30
4.4. Korozivzdorné oceli	30
4.4.1. Hustota	30
4.5. Kompozity s epoxidovou matricí.....	30
4.5.1. Výrobní technologie	31

4.5.2.	Hustota.....	31
4.6.	Finanční náklady.....	31
5.	Experimentální část.....	32
5.1.	Teplotní roztažnost	32
5.2.	Měřicí zařízení	32
5.2.1.	LVDT snímač	32
5.2.2.	Měřicí ústředna a měřicí program	34
5.2.3.	Ostatní měřicí zařízení a pomůcky	34
5.3.	Postup měření délkové roztažnosti.....	35
5.3.1.	Kalibrace LVDT snímače	35
5.3.2.	Měření v temperační komoře	38
5.3.3.	Výpočet součinitele délkové teplotní roztažnosti.....	39
5.3.4.	Ověření přesnosti měření	40
5.4.	Zkušební tělesa.....	41
5.4.1.	Materiály zkušebních těles.....	41
5.4.2.	Rozměry zkušebních těles	42
5.5.	Výsledky měření a diskuze	43
5.5.1.	Materiál A.....	43
5.5.2.	Materiál B.....	44
5.5.3.	Materiál C.....	45
5.5.4.	Návrh optimalizace měření	47
Závěr.....		48
Seznam zdrojů.....		50
Seznam obrázků		53
Seznam tabulek.....		53
Seznam grafů.....		54

Seznam použitých zkratek

Veličiny

α	součinitel délkové teplotní roztažnosti [K^{-1}]
l	počáteční délka zkušebního tělesa [mm]
Δl	změna délky zkušebního tělesa [mm]
Δt	rozdíl teplot [$^{\circ}C$]
U_1	napětí na začátku měření [V]
U_2	napětí na konci měření [V]
k	kalibrační konstanta [mm/V]
\bar{x}	střední hodnota
σ	směrodatná odchylka

Zkratky

RTM	resin transfer moulding
VARTM	vacuum assisted resin transfer moulding
LRTM	light resin transfer moulding
LVDT	linear variable differential transformer

Zkratky materiálů

PI	polyimid
BMI	bismaleimid

Úvod

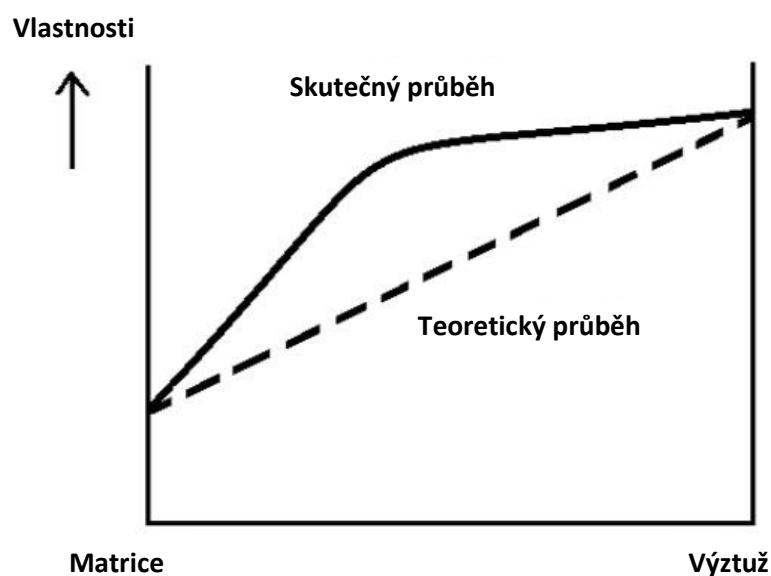
Kompozitní materiály jsou v současné době velmi rozšířenými materiály. Jejich historie sahá až do druhé světové války. Komerční využití se nejvíce rozmohlo ve 40. a 50. letech minulého století. V současné době jsou kompozitní materiály součástí širokého spektra všech průmyslových aplikací.

Kompozitní materiály dávají možnost navrhovat pevné a tuhé konstrukce s velkou úsporou hmotnosti oproti klasickým materiálům. Možnost kombinace různých druhů vláken a pojiv umožňuje vytvoření materiálu přesně na míru podle požadovaných vlastností. Kompozitní materiály dávají rovněž možnost vyrábět tvarově složitě součásti při často nižších nákladech než klasické materiály, jako jsou například kovové slitiny. Mají ovšem i negativní vlastnosti. V některých případech je použití klasických materiálů vhodnější a finančně daleko méně nákladné.

Cílem této bakalářské práce je porovnat vlastnosti geopolymerního kompozitu s jinými vhodnými kompozitními materiály a korozivzdornou ocelí pro díl v letecké konstrukci, kterým je potrubí předchladiče. Vzhledem k maximální provozní teplotě dílu, která byla odhadnuta na 350 °C, bude důležitým požadavkem na materiál jeho teplotní odolnost a také jeho teplotní roztažnost vzhledem k danému konstrukčnímu použití. Proto v experimentální části práce je cílem změřit součinitel délkové teplotní roztažnosti vybraných materiálů. Měření probíhalo v laboratoři Centra kompozitů na Kloknerově ústavu ČVUT v Praze.

1. Kompozitní materiály

Kompozity jsou materiály, které jsou tvořeny ze dvou nebo více fází. Tyto fáze mají rozdílné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti a každá z nich plní jinou specifickou funkci. Spojitá fáze, tzv. matrice slouží k uložení zpevňující fáze tzv. výztuže. Výztuž je složka nespojitá, je obvykle tvrdší a pevnější a přenáší namáhání, které na materiál působí. Vlastnosti kompozitních materiálů jsou ovlivněny vlastnostmi složek, ze kterých se skládají. Pokud je kompozit správně vytvořen, jeho vlastnosti nejsou dány pouhým součtem vlastností složek podle jejich objemového zastoupení, ale působí takzvaný synergický efekt, kdy jsou výsledné vlastnosti kompozitu lepší, než bychom očekávali pouhým součtem jejich vlastností (Obrázek 1). Z toho důvodu je u kompozitů důležitý i tvar, velikost a orientace sekundární fáze a jejich vzájemná soudržnost (adheze). [1] [2]

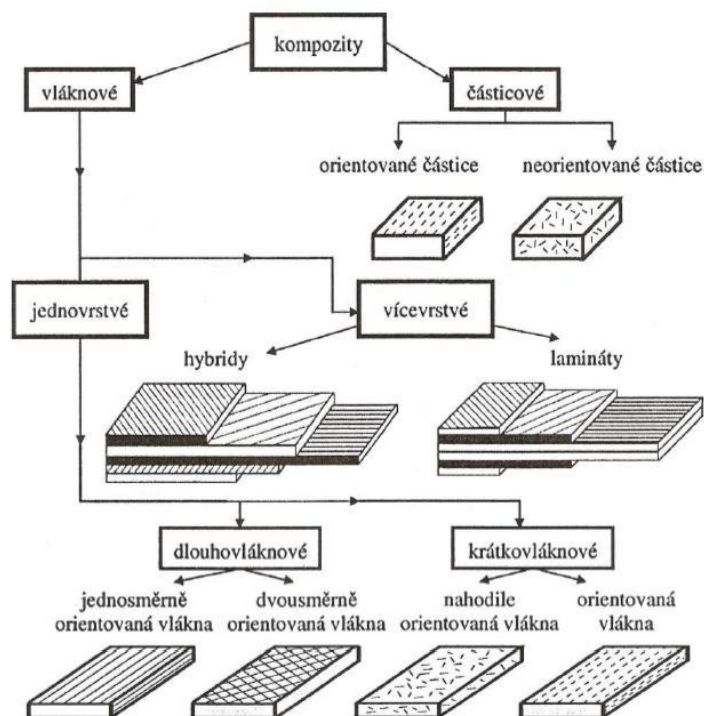


Obrázek 1 - Synergický efekt [4]

1.1. Výztuž

Výztuž je nespojitá sekundární fáze kompozitu, která určuje mechanické vlastnosti nově vzniklého materiálu. Výztuž však může být i nositelem jiných vlastností jako je například elektrická vodivost. Abychom mohli materiál označit za kompozit, musí být podíl výztuže v materiálu vyšší než 5 %. [2] [5]

Výztuže kompozitních materiálů lze dělit podle různých hledisek, například podle jejich tvaru, velikosti, materiálu, nebo orientace (Obrázek 2). [5]



Obrázek 2 - Rozdělení kompozitních materiálů [6]

1.1.1. Dělení kompozitních materiálů podle druhu výztuže

Kompozitní materiály můžeme dělit podle velikosti, orientace a tvaru výztuže.

Podle velikosti výztuže

- Makrokompozity
Rozměry příčného průřezu výztuže se pohybují řádově v mm až centimetrech. Tyto kompozity jsou používány především ve stavebnictví, např. železobeton. [5]
- Mikrokompozity
Rozměry příčného průřezu výztuže jsou v řádech mikrometrů. Kompozity s touto výztuží jsou v průmyslu nejpoužívanější. [5]
- Nanokompozity
Rozměry výztuže jsou v řádu nanometrů. [5]

Podle orientace výztuže

- Preferovaná
- Náhodná

Podle tvaru výztuže

- Částicové

Mohou být pravidelných tvarů (koule, destičky) nebo nepravidelných tvarů [3]

- Vlákňové

Vlákňové kompozity se dělí z hlediska štíhlostního poměru [3]

- S dlouhými vlákny

Délka vlákna/průměr vlákna >100

- S krátkými vlákny

Délka vlákna/průměr vlákna <100

1.1.1.1. Částicové kompozity

Částicové kompozity, také označované jako partikulové kompozity, jsou kompozity vyztužené částicemi, které nemají v porovnání s vlákny v žádném směru jeden značně převládající rozměr a je pro ně charakteristická náhodná orientace. Částice nejsou při zlepšování lomové odolnosti příliš účinné, na rozdíl od vláken. Zároveň se částice v partikulovém kompozitu mnohem méně podílejí na přenosu sil při zatěžování než vlákna ve vlákňových kompozitech, ležící ve směru zatížení. Částice tedy zvyšují tuhost kompozitu, ale nezlepšují výrazně jeho pevnost v tahu. Materiál částic a pojiva v kompozitu může být téměř jakákoliv kombinace kovových a nekovových materiálů. Volba kombinace materiálů závisí na požadovaných konečných vlastnostech. [1]

1.1.1.2. Vlákňové kompozity

Vlákňové kompozity jsou vyztuženy vlákny, jejichž délka je mnohem větší oproti jejich průřezovým rozměrům. Pokud je jejich délka menší, než stonásobek jejich průměru jedná se o krátkovlákňové kompozity. Pokud je jejich délka v desítkách až stovkách milimetrů, jedná se o kompozity dlouhovlákňové. Vlákna mohou být v materiálu rozmístěna buď náhodně, anebo s preferovanou orientací. Dále lze vlákňové kompozity rozdělit na jednovrstvé a mnohovrstvé. Pokud jsou vlákna vrstvy materiálu uspořádána se stejnou orientací a mají v daných směrech stejné vlastnosti, lze kompozit označit také jako jednovrstvý čili laminát. Mnohovrstvé kompozity, které jsou v konstrukčním využití více frekventované, se skládají z několika vrstev lamin, které jsou na sebe kladeny v různých orientacích podle požadavku konstrukce. Další možností jsou kompozity hybridní, které kombinují vlákňové výztuže různého typu. Možné je také použití vlákňové výztuže a částicová plniva dohromady. [1]



Obrázek 3 - Rozdělení kompozitů dle výztuží [7]

1.1.1.2.1. Polotovary vzniklé sdružením elementárních vláken

- Rovingy (Pramence)
Jedná se o sdružené prameny s velmi malým počtem zákrutů. Používají se pro výrobu profilů tažením, pro navíjení a pro výrobu prepregů. [5]
- Sekané prameny
Vyrábějí se nasekáním pramenů na potřebnou délku a používají se do směsí na lisování. [5]
- Rohože
Rohože tvoří nasekaná vlákna s náhodným uspořádáním, která jsou spojena polymerními pojivy. Mohou je také tvořit náhodně uspořádaná kontinuální vlákna, která jsou mezi sebou propletena a nemusí být spojena pojivem. [5]
- Rovingové tkaniny
Rovingové tkaniny jsou připravovány z rovingů. Vyrábějí se stejným způsobem jako běžná textilní tkanina, propojením osnovy a útku. Jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů. [5]
- Prepregy
Prepregy jsou předimpregnovaná vlákna prosycená pojivem, které má za úkol držet výztuž v daném směru. Prepregy mohou obsahovat paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož. [5]
- Tkaniny z příze
Tkaniny z příze nejsou určeny pro výrobu kompozitních konstrukcí, ale slouží jako izolační materiál. [5]
- Hybridní tkaniny
Hybridní tkaniny jsou tvořeny více druhy vláken. Používána jsou například uhlíková a aramidová vlákna. Jsou umístěna v různých směrech podle daného namáhání. [5]

1.1.2. Dělení vláken podle druhu materiálu

Pro výrobu kompozitů se podle požadavků na vlastnosti nejběžněji používají následující vlákna.

1.1.2.1. Skleněná vlákna

Vlastnosti skleněných vláken jsou dány jejich chemickým složením. Skleněná vlákna mají izotropní vlastnosti, což znamená, že jejich vlastnosti jsou stejné v podélném i příčném směru. Nejčastěji používaný druh skloviny pro výrobu vláken, který jako běžný typ obsadil téměř 90 % trhu, je takzvané E-sklo. E-vlákna se nejčastěji používají v kombinaci s nenasycenými polyestery. Mají dobré mechanické vlastnosti a jsou vynikajícím elektrickým izolantem. Mezi jejich nevýhody patří absorpce vody a malá korozní odolnost proti vodným roztokům kyselin a zásad. Pro náročnější použití a mechanicky namáhané díly je vhodné použití S-vláken, které mají o 40 až 70 % vyšší pevnost. Kromě toho mají menší hustotu, lepší korozní odolnost a odolávají vyšším teplotám, než E-vlákna. Modul pružnosti v tahu u skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku. S ohledem na nízkou hustotu je měrná pevnost skleněných vláken zvláště vysoká. Skleněná vlákna jsou zároveň nehořlavá a zachovávají si své mechanické vlastnosti i při teplotách okolo 250 °C. Jejich součinitel délkové teplotní roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů. Vlastnosti kompozitů se skleněnými vlákny jsou tedy značně ovlivněny jejich druhem, obsahem a orientací. [2] [8]

1.1.2.2. Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna propůjčují nejširší spektrum mechanických vlastností kompozitních materiálů. Na rozdíl od vláken skleněných mají vysokou anizotropii fyzikálních a mechanických vlastností. *„Vynikající mechanické vlastnosti uhlíkových vláken vyplývají z vysoce anizotropní hexagonální struktury, kterou se vyznačuje grafit, alotropní modifikace uhlíku. V bazálních hexagonálních rovinách grafitu jsou uhlíkové atomy mezi sebou vázány silnými kovalentními vazbami, zatímco mezi těmito rovinami působí slabé Van de Waalovy síly.“* [2] Teoreticky možná hodnota modulu pružnosti ve směru hexagonálních rovin je 1000 GPa a teoretická maximální pevnost až 100 GPa. Uhlíková vlákna si zachovávají vysokou pevnost až do teploty 500 °C. Silná anizotropie vlastností se projevuje také na teplotní roztažnosti. Ve směru osy vláken dosahuje součinitel délkové teplotní roztažnosti lehce záporných hodnot, zatímco ve směru kolmo na vlákna je jeho hodnota kladná a vysoká. Struktura a vlastnosti uhlíkových vláken jsou dány technologií výroby. Průmyslová výroba využívá hlavně dva základní způsoby přípravy, a to podle druhu výchozího polotovaru. Technicky významnější je způsob využívající jako výchozí surovinu polyakrylonitril (PAN), druhým způsobem je výroba ze surovin bohatých na uhlík, jako jsou smoly na bázi kamenouhelného dehtu. Vývoj uhlíkových vláken je dnes zaměřen především na zjednodušení a zlevnění jejich výroby. [2] [8]

1.1.2.3. Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů s kovalentními vazbami orientovanými podle osy vlákna. Ve vláknech jsou molekuly v podélném směru navzájem spojeny vazbami z vodíkových můstků. Vlákna se vyznačují vynikajícími vlastnostmi jako je vysoká pevnost a tuhost. Největší praktický význam má takzvaný para-aramid, z něhož vyrobená vlákna jsou známá pod komerčním názvem Kevlar. V současnosti se jich však vyrábí více druhů lišících se chemickým složením a vlastnostmi. Aramidová vlákna vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi, ale zároveň velkou anizotropií, se kterou je nutno při konstruování dílu počítat. Kompozity s aramidovými vlákny jsou vhodné pro konstrukce s převažujícím tahovým namáháním, ne však pro konstrukce namáhané tlakem nebo ohybem. Aramidová vlákna mají zároveň výbornou odolnost vůči slané vodě, rozpouštědlům a kapalným palivům. Teplota, ve které je možné aramidová vlákna použít, je na hranici 250 °C. Využití těchto vláken je například v oblasti balistických aplikací, nebo jako náhrada azbestu v třecích a brzdových obloženích. [2] [8]

1.1.2.4. Keramická vlákna

Keramická vlákna vynikají svojí vysokou tepelnou a chemickou odolností. Hlavním představitelem materiálu vláken jsou SiC a Al₂O₃. Keramická vlákna SiC lze použít pouze s kovovými, keramickými nebo uhlíkovými matricemi a používají se především v leteckém průmyslu. Tato vlákna vydrží teplotu až 2200 °C. Vlákna Al₂O₃ jsou na rozdíl od SiC vláken elektricky nevodivá a vyrábí se celá řada jejich modifikací lišících se chemickým složením. Vlákna Al₂O₃ jsou používána především s kovovou matricí a odolávají teplotám až 1600 °C. [2]

1.1.2.5. Bórová vlákna

Bórová vlákna jsou velmi drahá kvůli náročné technologii výroby metodou chemické depozice v plynné fázi, která spočívá v nanášení plynného bóru na tenké drátky z wolframu nebo z uhlíku. Vlákna mají oproti ostatním vláknům větší průměr 0,1 až 0,2 mm a při zatížení mají větší tvarovou stabilitu. Jejich výhodou je vysoká pevnost v tahu a nevýhodou náchylnost k oxidaci při zvýšených teplotách. Nejčastěji se používají jako výztuž hliníkových slitin. Při použití bórových vláken s kovovou matricí je nutno vlákna opatřit keramickým povlakem z karbidu křemíku. Využití bórových vláken je především ve vojenském letectví. [2] [3]

1.2. Matrice

Matrice je spojitá fáze kompozitu, která prosycuje systém vláken a jejíž hlavní úlohou je spojení vláken v celek a zajištění tvarové soudržnosti dílu. Odděluje jednotlivé části výztuže od sebe, zamezuje spojitému šíření trhlin, zprostředkovává přenos sil na výztuž a chrání výztuž před vnějším prostředím. Pro kvalitu kompozitního materiálu je zásadní zajištění adheze na rozhraní matrice-vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální, ale i chemické vazby mezi vlákny a maticí se na vlákna nanáší různé apretace. Matrice musí mít zároveň vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno vhodně smáčela. [8]

1.2.1. Dělení kompozitních materiálů podle druhu matrice

Pro výrobu kompozitů se podle požadavků na vlastnosti nejběžněji používají následující matrice.

1.2.1.1. Polymerní matrice

Kompozitní materiály s kontinuálními vlákny se nejčastěji používají v kombinaci s polymerní maticí. Polymerní matrice se dělí na reaktoplastové a termoplastové. Z reaktoplastů jsou nejpoužívanější nenasyčené polyestery, vinylestery a epoxidy. Z termoplastů se nejčastěji používají polypropyleny a polyamidy. Reaktivní polyesterové a epoxidové pryskyřice mají výhodu, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a při normálních teplotách většinou v tekutém stavu. Jejich viskozita je nízká, a proto se snadno zpracovávají, snadno smáčejí a lépe prosycují vlákna. Oproti tomu viskozita termoplastů je stonásobná až tisícinásobná. Zároveň vytvrzování reaktoplastů nevyžaduje oproti termoplastům vysoké energetické nároky, protože teplota při procesu jejich zpracování je mnohem nižší. [8]

Vytvrzování reaktoplastových pryskyřic probíhá přidáním katalyzátoru a urychlovače, případně dodáním energie (teplo, záření), čímž vznikne kompozit s konečnými vlastnostmi. [8]

Reaktivní pryskyřice mají poměrně vysokou tuhost a pevnost, ale na rozdíl od termoplastů jsou křehké. Termoplasty mají také výhodu, že při jejich zpracování dochází pouze k jejich roztavení a ztuhnutí a nikoli k chemické reakci, která by ovlivnila jakost a kvalitu výrobku. [8]

1.2.1.2. Kovová matrice

Kompozity s kovovou maticí vyztužené kontinuálními vlákny mají největší význam z hlediska měrné pevnosti a tuhosti. Vyztužení kovu vlákny vede obvykle k obecnému zlepšení mechanických vlastností, odolnosti proti tečení a únavě. Nejvhodnějšími vlákny pro takové použití se ukázala být vlákna z karbidu křemíku, která kromě vysoké pevnosti mají i výbornou odolnost proti oxidaci. V současnosti se zájem soustřeďuje zejména na tři skupiny kovových matic. Na hliníkové slitiny odolávající teplotám 300 až 400 °C, na titanové slitiny odolávající teplotám 500 až 600 °C a na superslitiny na bázi niklu, železa a kobaltu pro teploty 1000 až 1150 °C. [2]

1.2.1.3. Keramická matrice

Využití keramiky v průmyslu je do jisté míry omezeno její velkou křehkostí a nízkou lomovou houževnatostí. Z toho důvodu je nejvhodnějším způsobem, jak tyto vlastnosti zlepšit, vyztužení keramiky vlákny. Nejvhodnější jsou vlákna z karbidu křemíku a vlákna uhlíková. Při použití dlouhých vláken lze zvýšit hodnotu lomové houževnatosti z hodnoty 5 MPa·m^{1/2} na hodnotu 30 MPa·m^{1/2}. Keramika z karbidu a nitridu křemíku vyztužená kontinuálními SiC vlákny má z hlediska technického využití při velkém stupni namáhání a vysokých teplotách největší perspektivu. [2]

1.2.1.4. Uhlíková matrice

Uhlíková matrice se používá v kompozitním systému uhlík - uhlík. Pro své mimořádné vlastnosti se používá pro vysoce náročné aplikace, jako jsou například náběžné hrany křidel raketoplánu. Mezi nejlepší vlastnosti patří odolnost proti vysokým teplotám, nízký koeficient lineární teplotní roztažnosti, vysoká odolnost proti teplotním šokům a vysoká pevnost i v kolmém směru na vlákna. Nepříznivou vlastností je pak malá odolnost proti oxidaci při teplotách nad 500 °C a vysoká křehkost matrice. Při použití nad tuto teplotu je nutné opatřit povrch vhodným povlakem například z karbidu křemíku. Vlastnosti uhlíkové matrice jsou silně závislé na podmínkách jejich přípravy. Výrobní technologie uhlíkových kompozitů je v současné době velice nákladná a časově náročná. [2]

2. Geopolymery

2.1. Historie

První vývoj alkalicky aktivovaných materiálů sahá již do 50. let minulého století, kdy se jím v Sovětském svazu zabýval profesor Gluchovskij a nazval jej „gruntocementem“. Tento materiál vytvořený na bázi alkalicky aktivované strusky popsal v roce 1959 v knize „gruntosilikáty“ a o deset let později na něj získal patent. [9]

S pojmem „geopolymer“ přišel v 70. letech 20. století francouzský chemik Joseph Davidovits, který na egyptologickém kongresu v Lyonu přišel s teorií, že na stavbu většiny egyptských pyramid, byl použit umělý kámen. Vyvolal tím značný rozruch, nicméně dnes důkazy nasvědčují tomu, že měl pravdu. Egypťští dělníci využívali období záplav, kdy se Nil rozlil do okolí. Snášeli mokký písek, který následně pěchovali do forem, smísili jej s aktivačními prostředky a poté nechali vytvrdit na slunci. [10]

Teorii profesora Davidovitse potvrzují i laboratorní zkoušky. Kámen, ze kterého jsou pyramidy postaveny, obsahuje vodu, pohlcuje záření a vyskytují se v něm malé vzduchové bubliny. Při provedení řezu kvádrem bylo zjištěno, že ve spodní části má větší hustotu než v horní. V některých kvádrech byly dokonce objeveny vlasy. [10]

V 70. letech byl rovněž aplikován geopolymer ve stavebnictví, kdy byl nanášen na dřevotřískové desky za účelem zvýšení jejich žáruvzdornosti. V roce 1989 byla v ruském městě Lipeck postavena ze struskoalkalického betonu dvacetiposchoďová budova. Geopolymerní cement byl využit i při opravě letištní plochy v Los Angeles. [9]

V současné době se geopolymery používají kromě stavebnictví například v automobilovém a leteckém průmyslu. Dále jako protipožární nátěry a využití mají také například v restaurování soch. [11]

2.2. Co jsou geopolymery

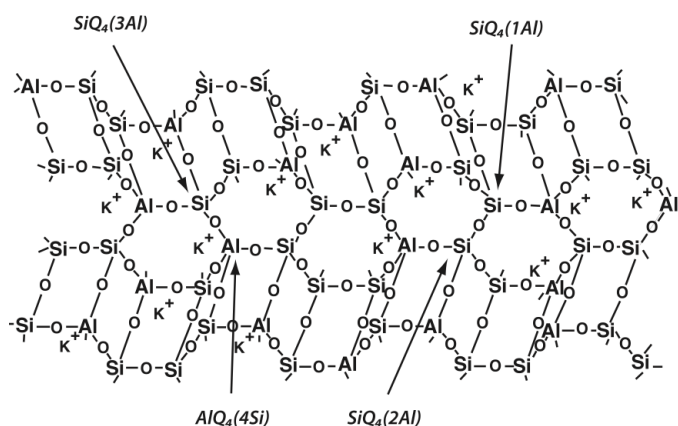
Geopolymery jsou alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály, které se svým chemickým složením podobají přírodním zeolitům. Strukturu geopolymers tvoří amorfní až semikrystalické prostorové sítě, skládající se z tetraedrů SiO_4 a AlO_4 , které jsou střídavě spojeny s kyslíkem a vytvářejí polymerní vazbu Si-O-Al. [12]

Vznikají z reakcí základních hlinito-křemičitanových materiálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tento proces se nazývá geopolymrace. Při jejich výrobě lze využít odpadních produktů, jako jsou především elektrárenské a teplárenské popílků. [10]

Geopolymery se vyznačují výbornými mechanickými vlastnostmi. Mají vysokou pevnost v tahu, jsou nerozpustné ve vodě, odolné vůči kyselinám a zároveň vysokým teplotám. Dokážou odolat teplotám až 1000°C . Mají také velmi nízkou tepelnou vodivost. Na základě výchozích surovin a způsobu výroby, lze dosáhnout velmi široké škály specifických vlastností. [11] [10]

2.3. Geopolymerace

Geopolymerní materiály vznikají z alkalických roztoků, reagujících s aluminosilikátovými materiály, které se rozpustí a jejich podstatná část se převede do roztoku. Počáteční tvorba geopolymers je v podstatě alkalickou hydrolyzou sloučenin s kyslíkovými můstky mezi jednotlivými SiO_4^{4-} a AlO_4^{4-} . Rozklad aluminosilikátů probíhá relativně rychle v silně alkalickém prostředí s vysokým pH ($\text{pH} > 12$), a to vede k vytvoření přesyceného hlinitokřemičitého roztoku. Složky obsažené v tomto roztoku mezi sebou kondenzují a vytvářejí gelovou fázi, která vede k tvorbě nových aluminosilikátových sloučenin. [13]

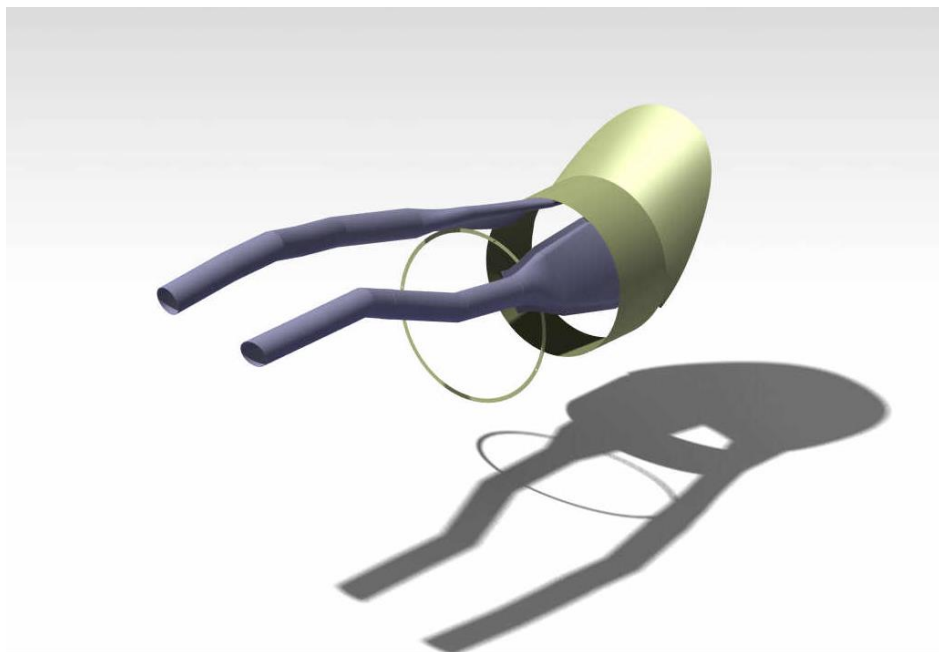


Obrázek 4 – Struktura geopolymers [14]

3. Potrubí předchladiče

Tato práce se zabývá srovnávací studií materiálů pro díl v letecké konstrukci, přičemž konkrétní díl, na který by mohly být materiály případně použity, je potrubí předchladiče.

„Potrubí je součástí trati předchladiče, který zajišťuje tepelnou výměnu mezi horkým tlakovým vzduchem odebíraným z proudového motoru a proudícím okolním chladným vzduchem. Takto ochlazený vzduch dále slouží pro klimatizaci přetlakové pilotní kabiny. Samotnou kompozitní trubkou pak proudí z předchladiče vzduch s odebraným teplem ven z letounu do okolního prostoru. Předpokládaná maximální pracovní teplota, které bude trubka vystavena, je odhadnuta na 350 °C. Za této maximální teploty je požadována maximální tvarová stálost dílu bez výrazného poklesu mechanických vlastností použitého materiálu.“ [15]

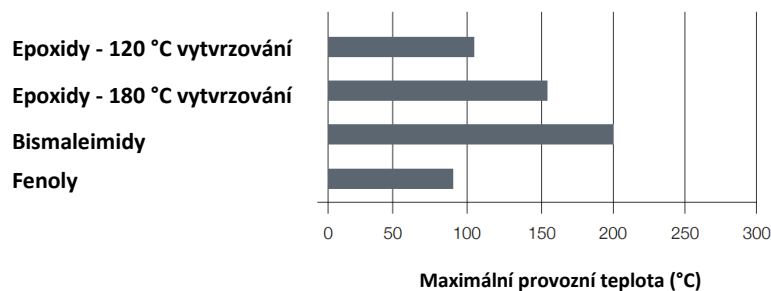


Obrázek 5 - Potrubí předchladiče [15]

4. Srovnání použitelných materiálů

Následující kapitola je zaměřena na srovnání použitelných materiálů pro výrobu potrubí předchladiče. Materiály budou porovnány z hlediska použitelnosti při vysokých teplotách, z hlediska výrobních technologií, finančních nákladů a hmotnosti (hustoty). Vzhledem k tomu, že není znám celkový objem součásti ani objemový podíl vláken a matrice, budou uvedeny pouze hustoty jednotlivých složek.

V experimentální části práce bude provedeno měření součinitele délkové teplotní roztažnosti vybraných materiálů.



Obrázek 6 - Maximální provozní teploty polymerních pryskyřic [16]

4.1. Geopolymerní kompozit

Vzhledem k tomu, že geopolymerní kompozit je stěžejním tématem této bakalářské práce, byla pojmu geopolymerní kompozit věnována celá kapitola 2.

Geopolymerní kompozit vyniká celou řadou dobrých mechanických vlastností a zároveň výbornou odolností proti vysokým teplotám. Dokáže odolat teplotám až 1000 °C. Mezi špatné vlastnosti geopolymerního kompozitu ovšem patří křehkost matrice a nepříliš dobrá adheze mezi vlákny a pojivem.

4.1.1. Výrobní technologie

K výrobě geopolymerního kompozitu lze v principu využít většinu standardních technologií, jako je vakuové lisování, autoklávové lisování, pultruze, navíjení a další. Vytvrzovací teploty se pohybují mezi 80 °C až 200 °C v závislosti na vytvrzovacích systémech, a proto stačí vytvrzovat pojivo pouze v peci či v sušárně. [17]

Problém s výrobou nastává pouze u infuzních technologií, jako je RTM (resin transfer molding) a VARTM (vacuum assisted resin transfer molding), spočívajících v infuzi tuhého pojiva do výztuže. Geopolymerní pojivo totiž obsahuje mikročástice, které při prostupu vláknovou výztuží postupně ucpávají mezivláknové prostory. Infuzní proces se tak brzdí, až dojde k jeho úplnému zastavení. [17]

Ověřenými výrobními metodami, jsou kontaktní mokrá laminace a vytváření kompozitů pomocí prepregů. [17]

4.1.1.1. Výroba pojiva

Geopolymerní pryskyřice (Obrázek 7) nelze koupit komerčně již hotové, ale je nutné je vyrobit. Pro výrobu lze použít snadno dostupné suroviny jako je kaolin, vodní sklo a termální silika (SiO_2). Pro lepší viskozitu hmoty, lze přidat malé množství fenolické pryskyřice. Výroba jednoho kilogramu pryskyřice v laboratoři trvá přibližně 45 minut. K výrobě stačí použít homogenizátor (vysokoobrátková míchačka), který je na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Obrázek 8. Takto vyrobené geopolymerní pojivo, lze skladovat v nízkých teplotách až půl roku. [17]



Obrázek 7 - Geopolymerní pryskyřice [17]



Obrázek 8 - Homogenizér [17]

4.1.1.2. Kontaktní laminace

Kontaktní mokrá laminace spočívá v kladení výztuže na otevřenou formu. Výztuž musí být v podobě tkaniny nebo rohože a pryskyřice musí být při výrobní teplotě v tekutém stavu. Prosyčování výztuže tekutým pojivem je prováděno ručně pomocí štětce, stěrky nebo válečku (Obrázek 9 a Obrázek 10). Vyrobený díl se vytvrzuje nejčastěji za studena při pokojové teplotě, nebo za zvýšené teploty okolo 80°C. Pro lepší vytvrzení lze použít deskový lis. [5]



Obrázek 9 - Impregnace výztuže stěrkou [17]



Obrázek 10 - Zpracování geopolymerního pojiva do výztuže [17]

4.1.1.3. Prepreg

Prepreg je polotovar pro výrobu kompozitního dílu. Jedná se o předimpregnovanou výztuž prosycenou pryskyřicí. Výhodou této technologie je oddělení složitého procesu prosycování výztuže pojivem a dalšího zpracování. Postup prosycování se provádí za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek, což má vliv na kvalitu a vlastnosti výsledného dílu. [8]

Při výrobě jednosměrných prepregů se vlákna rovnoměrně odvíjejí z cívky přes stavitelný hřeben. Takto připravený pás vláken se nanáší na nosnou fólii, na které je již předem nanesena vrstva pryskyřice. Z vrchu je pás zakrytý krycí fólií a je veden na vytápěný válec, kde dochází pod tlakem k prosycování výztuže pojivem. Následně pás prochází chladicí zónou, kde dochází k zastavení vytvrzovací reakce. Poté dojde k oříznutí okrajů a návinnu prepregu do role. [8]

Při výrobě tkaninových prepregů se tkanina nejčastěji namáčí do roztoku pryskyřice (Obrázek 11). Přesnější název pro takto vyrobený polotovar je wet-preg (Obrázek 12). [17] [18]



Obrázek 11 - Laboratorní aparatura k přípravě wet-pregu [17]



Obrázek 12 - Geopolymerní wet-preg s uhlíkovou tkaninou [17]

Při výrobě samotného dílu se do otevřené formy opatřené vrstvou separátoru vloží odtrhová vrstva, která chrání povrch kompozitu před znečištěním, a před lepením nebo barvením se snímá. Následně jsou podle zvolené skladby laminátu do formy pokládány nařezané prepregy. Upevnění jednotlivých vrstev prepregu se provádí slabým přitlačením ručním válečkem nebo teflonovou stěrkou. Po položení potřebného počtu vrstev se přiloží opět odtrhová vrstva a následně odsávací vrstva pro únik přebytečné pryskyřice. Odsávací vrstva je překryta prodyšnou fólií, na které jsou položeny odvzdušňovací vrstvy umožňující odsátí vzduchu. Následně se díl vytvrdí buď v autoklávu při zvýšených teplotách a tlaku, nebo metodou lisování ve vakuu (Obrázek 13). [5]



Obrázek 13 - Vakuové lisování panelu z geopolymerního wet-pregu [17]

4.1.2. Hustota

Uvedené složky jsou obsaženy ve zkušebním vzorku geopolymerního kompozitu, který byl použit v experimentální části práce. Geopolymerní pryskyřice byla vyrobena ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu, a.s. Uhlíková tkanina je od firmy Fiberpreg CZ a.s.

- Hustota pojiva
geopolymerní pryskyřice GPL30 – 2,26 g/cm³ [17]
- Hustota výztuže
uhlíková tkanina KORDCARBON CCA 200 P – 100 Industry - 1,78 g/cm³ [19]

4.2. Kompozit s polyimidovou maticí

Polyimidy (PI) vznikají polykondenzací aromatických diaminů a aromatických dianhydridů. Vyznačují se dobrými mechanickými vlastnostmi, a především dobrou odolností proti vysokým teplotám. Teplota skelného přechodu u polyimidových pryskyřic je 397 °C a maximální provozní teplota je 357 °C. Krátkodobě dokáží odolat bez porušení teplotám až 815 °C. Nevýhodou reaktoplastických polyimidů je jejich křehkost způsobená vysokou úrovní zesítní, která se může projevit prasknutím při opakovaných teplotních cyklech. Dalším nedostatkem je, že se při jejich vytvrzování kondenzační polymerací uvolňuje voda a alkohol. Tyto látky vytvářejí bubliny ve vytvrzené pryskyřici. Nevýhodou první generace polyimidových pryskyřic byl obsah toxických látek, jako je methyldianilin (MDA), dnes se výrobci snaží vyrábět PI pryskyřice netoxické. [5]

Polyimidové pryskyřice jsou vhodné především pro pojivo prepregů a je nutné je vytvrzovat v autoklávu při vysokých teplotách a tlaku. U nových typů s nízkou viskozitou je možné použít také levné infuzní technologie. [5]

4.2.1. Výrobní technologie

Kompozity s polyimidovou maticí lze vyrábět prepregovou technologií a následným vytvrzením v autoklávu při vysoké teplotě okolo 625 °C a tlaku 1,38 MPa. Proces výroby prepregu a následný postup při výrobě samotného kompozitního dílu je popsán v kapitole 4.1.1.3. U některých nových typů polyimidových pryskyřic je možné použít infuzní výrobní technologii RTM, která je levnější. Nevýhodou použití prepregu může být kromě větší finanční a energetické náročnosti také složité skladování. Prepregy s reaktoplastickou pryskyřicí je nutné skladovat při teplotě -20 °C, a to maximálně po dobu šesti měsíců. Kompozitní díly vyrobené z prepregu a vytvrzené v autoklávu jsou však nejkvalitnější. [5] [17]

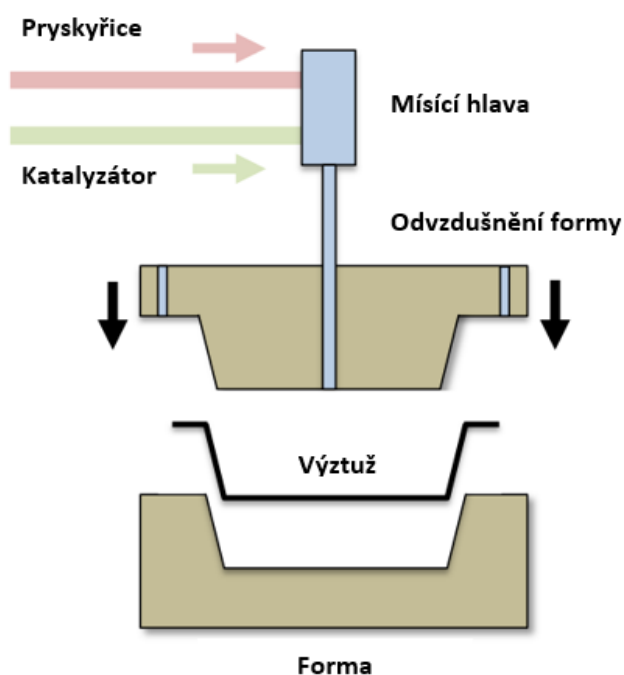
4.2.1.1. RTM

Infuzní technologie RTM (resin transfer moulding) spočívá v infuzi tuhého pojiva do výztuže polotovaru uzavřeného v tuhé formě. Proces je řízen tlakovým spádem, kdy je kombinován přetlak na vstupu a podtlak na výstupu formy (Obrázek 14). [18]

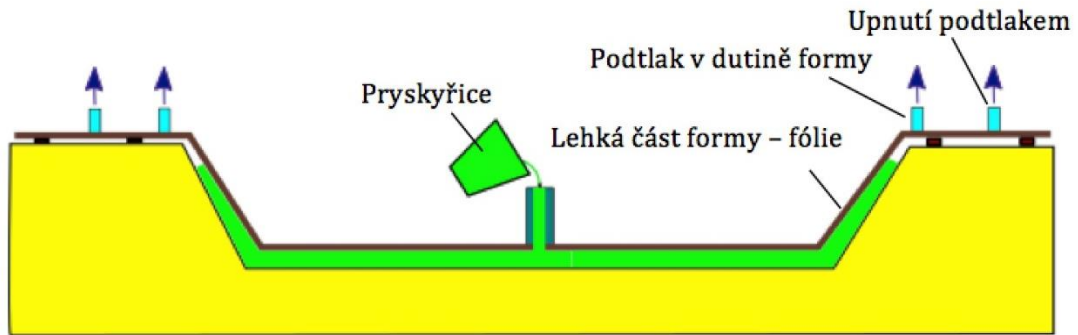
Do formy se nejprve vloží přířezy výztuže. Následně se do uzavřené formy zavede pryskyřice pod tlakem maximálně 5 barů. Použití vakuu na výstupu formy podpoří prosycování výztuže a zamezí tvorbě bublin pryskyřice. Při použití vytápěných forem lze zkrátit výrobní časy a snížit viskozitu pojiva, čímž se prodlouží jeho zatékací dráha. [8]

Výhodou technologie RTM jsou nízké počáteční náklady a dobrá kvalita výrobku. Je vhodná především pro průmyslovou výrobu středně velkých sérií. [8]

Kromě RTM existuje také technologie LRTM (light resin transfer moulding), která nevyžaduje vysoké tlaky při vstřikování pryskyřice a pryskyřice je nasávána podtlakem. Díky tomu lze využít méně tuhé a lehčí formy. Tato technologie je vhodná především pro menší série výrobků (Obrázek 15). [5]



Obrázek 14 - Schéma RTM [20]



Obrázek 15 - Schéma LRTM [21]

4.2.2. Hustota

Uvedené složky jsou obsaženy v uhlíkovém prepregu s polyimidovou matricí, který vyrábí firma PROOF.

- Hustota pojiva
polyimidová pryskyřice PROOF P²SI® 900HT – 1,33 g/cm³ [22]
- Hustota výztuže
uhlíková tkanina T650-35 – 1,77 g/cm³ [23]

Polyimidová pryskyřice pro technologii RTM vyráběná firmou Maverick Corporation.

- Hustota pojiva
polyimidová pryskyřice J1 - 1,15 g/cm³ [24]

4.3. Kompozit s bismaleimidovou matricí

Bismaleimidy (BMI) jsou polymerní materiály skládající se z maleinanhydridu a aromatického diaminu. Dále se přidá kyselina bismaleimidová a po cyklohydrataci je získána bismaleimidová pryskyřice. Vytvrzování BMI pryskyřic je podobné jako vytvrzování epoxidů a nevznikají při něm žádné plyny. [5]

BMI pryskyřice se vyznačují svou vysokou teplotní odolností. Teplota skelného přechodu se u komerčních typů pohybuje mezi 250 až 320 °C. Jejich nevýhodou je však křehkost a náchylnost k tvorbě prasklin při opakované expanzi a smršťování. Obvyklou praxí, jak zvýšit jejich houževnatost je modifikace bismaleimidů termoplasty. Ty mohou být rozptýleny do pryskyřice ve formě jemných prášků bez toho, aniž by byly nepříznivě ovlivněny její impregnační vlastnosti. [5]

4.3.1. Výrobní technologie

Bismaleimidové pryskyřice lze použít při výrobě prepregů a také pro technologii RTM. Obě technologie jsou již popsány v předchozích kapitolách 4.1.1.3 a 4.2.1.1.

4.3.2. Hustota

Uvedené složky jsou obsaženy v uhlíkovém prepregu s bismaleimidovou matricí, který vyrábí firma Hexcel.

- Hustota pojiva
tvrzená bismaleimidová pryskyřice HexPly® M65 – 1,25 g/cm³ [25]
- Hustota výztuže
uhlíková tkanina HexTow® AS4C – 1,78 g/cm³ [26]

Bismaleimidová pryskyřice pro technologii RTM vyráběná firmou Cytec.

- Hustota pojiva
bismaleimidová pryskyřice CYCOM® 5250-4 RTM - 1,25 g/cm³ [27]

4.4. Korozivzdorné oceli

Korozivzdorné oceli jsou legované oceli obsahující více než 12 % chromu a další legující prvky, jako je například nikl, kobalt, molybden, titan a další. Nejvyšší korozivzdornosti pak dosahují takzvané superslitiny, u kterých obsah Ni, Co a Mo přesahuje obsah železa. V závislosti na koncentraci legujících prvků vykazují korozivzdorné oceli řadu mikrostrukturálních alternativ. To určuje sortiment zhruba 300 druhů korozivzdorných ocelí. Korozivzdorné oceli lze rozdělit podle fázového složení na martenzitické, feritické, austenitické a duplexní. Nejrozšířenějším jakostním druhem jsou austenitické oceli díky své skvělé tvařitelnosti, korozní odolnosti, svařitelnosti a možnosti použití ve velkém spektru provozních teplot. [2] [28]

Technologické vlastnosti korozivzdorných ocelí závisí na obsahu uhlíku a legujících prvků.

4.4.1. Hustota

Hustoty korozivzdorných ocelí se v závislosti na složení pohybují v rozmezí 7,48 až 8 g/cm³. [29]

4.5. Kompozity s epoxidovou matricí

Tato kapitola je věnována materiálům, u kterých bude měřen součinitel délkové teplotní roztažnosti v experimentální části bakalářské práce. Kromě geopolymerního kompozitu budou měření podrobeny také dva kompozitní materiály s epoxidovou matricí. Vzhledem k tomu, že teplota

skelného přechodu u těchto pryskyřic udávaná výrobcem je 200 °C, není možné tyto materiály uvažovat pro použití na potrubí předchladiče. Jsou zde uvedeny pouze pro porovnání. [30]

4.5.1. Výrobní technologie

Pro výrobu kompozitů s epoxidovou matricí lze využít celou řadu výrobních technologií, jako je například kontaktní laminace, infuzní technologie, pultruze nebo vytvrzování v autoklávu.

Při použití prepregu a následného vytvrzování v autoklávu výrobce udává teplotu vytvrzování 180 °C a tlak 0,7 MPa. [30]

4.5.2. Hustota

Uvedené složky jsou obsaženy v preprezích, ze kterých byly vyrobeny materiály použité v experimentální části práce.

Složky obsažené v prepregu L-530 vyrobeným firmou Cytec.

- Hustota pojiva
epoxidová pryskyřice (prepreg Cytec L-530) – nezjištěno
- Hustota výztuže
skleněná tkanina 7781 – 2,55 g/cm³ [31]

Složky obsažené v prepregu HexPly® 8552 vyrobeným firmou Hexcel.

- Hustota pojiva
epoxidová pryskyřice (prepreg HexPly® 8552) – 1,3 g/cm³ [30]
- Hustota výztuže
uhlíková tkanina HexTow® AS4 – 1,79 g/cm³ [32]

4.6. Finanční náklady

V Tabulka 1 jsou uvedeny ceny za kilogram vybraných teplotně odolných pryskyřic. Uvedené ceny jsou pouze orientační. Aktuální ceny se mohou lišit.

Tabulka 1 - Ceny teplotně odolných pryskyřic [33]

Pryskyřice	Výrobce	Označení	cena za kilogram
Geopolymerní	VZLÚ	GPL30	33,00 Kč
Polyimidová	Maverick Corp.	AFR-PE-4	24 200,00 Kč
Polyimidová	PROOF	900HT	26 600,00 Kč
Bismaleimidová	Maverick Corp.	-	4 840,00 Kč

5. Experimentální část

5.1. Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost je fyzikální jev, při kterém těleso mění svůj objem v závislosti na změně teploty. Při zvýšených teplotách částice více kmitají a dostávají se tak do větší vzájemné vzdálenosti, tím na sebe působí většími odpuzivými silami, a proto potřebují více místa.

U některých materiálů může dojít k opačnému efektu, kdy dojde ke zmenšení objemu v důsledku zvýšené teploty. Nejznámější jev, při kterém dochází ke zmenšení objemu, je anomálie vody. Při ohřevu vody z teploty 0 °C na 4 °C, dochází ke zmenšení objemu. Při ohřátí nad teplotu 4 °C dochází opět k jeho zvětšení, jako je tomu u ostatních látek. [34]

Délkovou teplotní roztažnost lze určit pouze u pevných těles. Izotropní tělesa mají ve všech směrech délkovou roztažnost stejnou, naopak u těles anizotropních může být délková roztažnost v různých směrech rozdílná. Proto je potřeba daný směr blíže určit.

Součinitel délkové teplotní roztažnosti je koeficient určující závislost změny délky materiálu na změně teploty. Značí se jako α a jednotkou je K^{-1} .

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\Delta l}{\Delta t} \right)$$

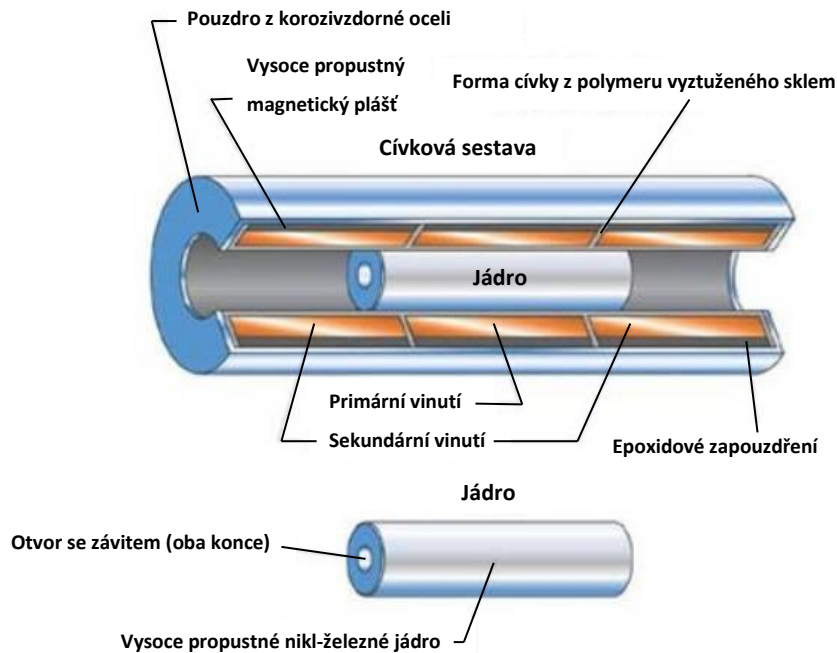
Kde: α = součinitel délkové teplotní roztažnosti, l = počáteční délka zkušební tělesa, Δt = rozdíl teplot, Δl = změna délky zkušební tělesa

5.2. Měřicí zařízení

5.2.1. LVDT snímač

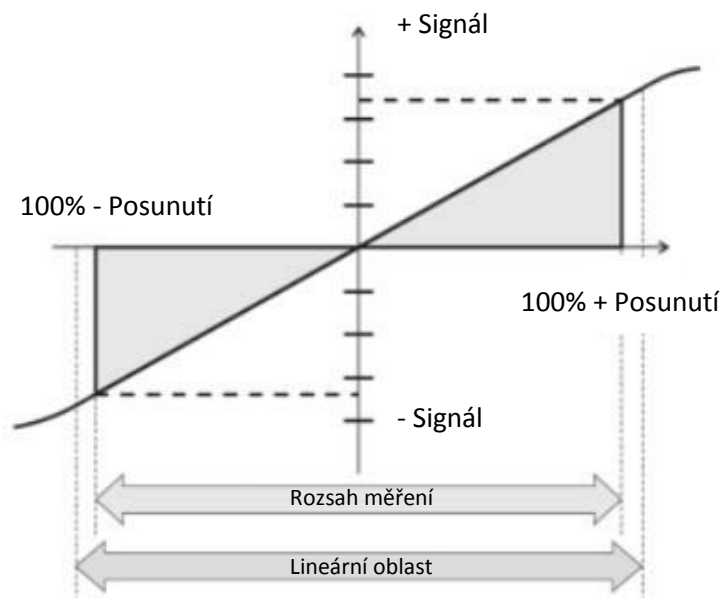
V této práci byl použit k měření délkové roztažnosti, jako součást měřícího řetězce LVDT snímač (linear variable differential transformer) od firmy Lucas Schaevitz Sensors 400HR. Jedná se o elektromechanický měnič, který mění přímočarý pohyb tělesa na odpovídající elektrický signál. [35]

Vnitřní struktura transformátoru se skládá ze tří identických cívek, přičemž prostřední cívka je primární a zbývající dvě jsou sekundární (Obrázek 16). Sekundární cívky jsou sériově zapojeny ve vzájemné protifázi. To znamená, že se jejich napětí mezi sebou odečítá. Tato cívková sestava je obvykle stacionárním prvkem snímače. Oproti tomu pohyblivým prvkem je feromagnetické jádro, které se axiálně posouvá ve směru osy snímače a dotýká se měřeného objektu. [35]



Obrázek 16 - Řez LVDT snímačem [35]

Primární vinutí LVDT snímače je napájeno střídavým proudem, který se indukuje do sekundárních vinutí v závislosti na poloze jádra. Výstupní signál je rozdíl napětí mezi dvěma sekundárními vinutími. Pokud je jádro ve středové poloze (elektrická nula), napětí na sekundárních cívkách má stejnou velikost, ovšem s opačnou polaritou, což se na výstupu projeví jako nulové napětí. Pokud se jádro posune v určitém směru k jednomu či druhému vinutí, objeví se na výstupu snímače rozdílové napětí. Závislost velikosti výstupního napětí na posunutí jádra je přímo úměrná, avšak ne v celém rozsahu pohybu snímače, ale pouze v určité vzdálenosti od elektrické nuly. Proto je potřeba provádět měření pouze v lineární oblasti snímače (Obrázek 17). [35]



Obrázek 17 - Lineární oblast snímače [36]

5.2.2. Měřicí ústředna a měřicí program

K měření byla použita řídicí a měřicí datová jednotka od firmy National Instruments PXI – 1052. V datových slotech byly připojeny měřicí moduly NI SCXI 1315 pro LVDT snímač a modul NI SCXI 1301 pro měření teploty.

Použitý měřicí software byl vytvořen na zakázku pro účely laboratoře Centra kompozitů Kloknerova ústavu ČVUT v Praze pro měření napětí, tenzometrů a LVDT snímačů.

5.2.3. Ostatní měřicí zařízení a pomůcky

- Temperační komora s regulací teploty na Obrázek 18 (Chirana HS 62A, rozsah teplot 50 - 200 °C, doba náběhu na teplotu 200 °C je maximálně 30 minut)
- Laboratorní teploměr pro snímání teploty
- Mikrometr (Mitutoyo, rozsah měření 0 - 25 mm)
- Měřicí přípravek z pertinaxu ¹



Obrázek 18 - Temperační komora, autor fotografie: Jan Vosáhl

¹ Pertinax je izolační a konstrukční materiál, používaný v elektrotechnice. Skládá se z papíru, který slouží jako výztuž, a fenol – formaldehydová pryskyřice slouží jako pojivo.

5.3. Postup měření délkové roztažnosti

5.3.1. Kalibrace LVDT snímače

Prvním krokem měření je kalibrace LVDT snímače a ověření, jaké výstupní hodnotě napětí odpovídá posun v milimetrech.

Ke kalibraci snímače byl použit mikrometr, který byl upnut do měřicího přípravku takovým způsobem, aby se vřeteno mikrometru dotýkalo snímače. Při montáži bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby vřeteno mikrometru bylo se snímačem v jedné ose a kalibrace tak byla co nejpřesnější (Obrázek 19). Dále bylo nezbytné nastavit polohu LVDT snímače v přípravku tak, aby ukazoval výstupní hodnotu napětí, co nejvíce se blíží elektrické nule. Tímto krokem byla zajištěna lineární závislost mezi výstupními hodnotami napětí a posuvem v milimetrech.



Obrázek 19 - Kalibrace LVDT snímače v měřicím přípravku, autor fotografie: Jan Vosáhl

Následně byl spuštěn měřicí program v ústředně National Instruments PXI 1052 a po časovém intervalu deseti sekund bylo pootočeno mikrometrem o jeden milimetr. Tímto způsobem se pokračovalo až do hodnoty pět milimetrů a pak následně zpět do nuly.

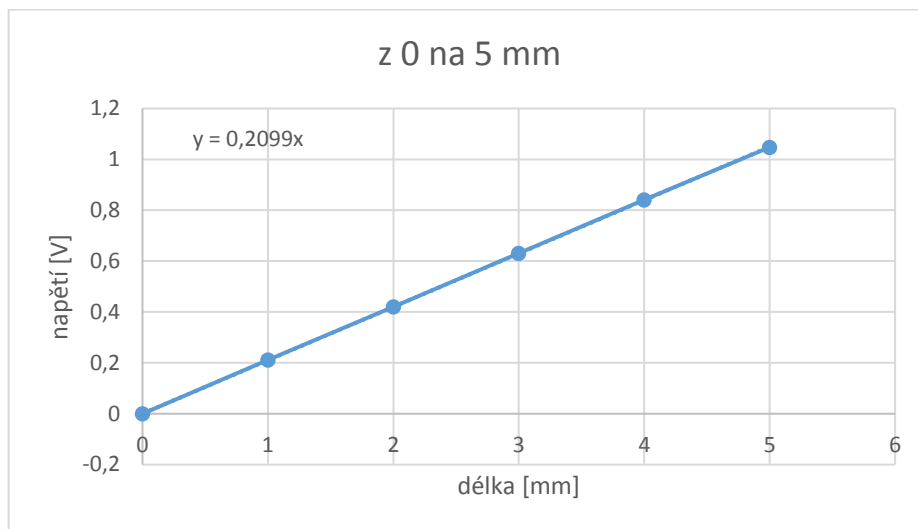
Poté byl vytvořen graf závislosti napětí na čase (Graf 1). Graf má schodovitý tvar, přičemž jednotlivé „schody“, s konstantními hodnotami napětí, odpovídají setrvání na jednom celém milimetru, po dobu deseti sekund.



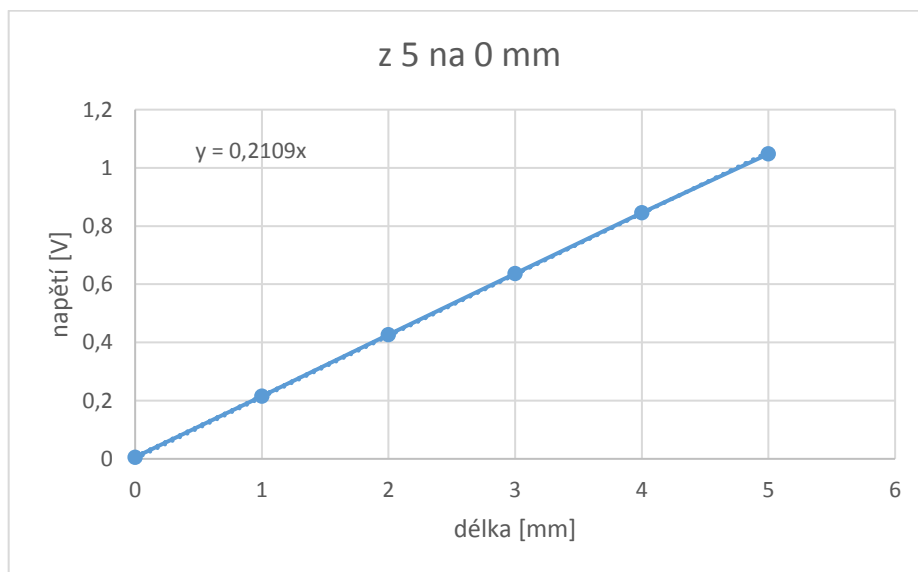
Graf 1 - Závislost napětí na čase

Pro přesnou kalibraci LVDT snímače bylo nutné ze zaznamenaných hodnot napětí na jednom celém milimetru (schodu) spočítat střední hodnotu. Aby byl výpočet střední hodnoty co nejpřesnější, byly vybrány pouze takové hodnoty napětí, které odpovídají konstantním oblastem Graf 1.

Dále byly sestrojeny grafy závislosti vypočítaných středních hodnot napětí, na jim odpovídajících celých milimetrech (Graf 2 a Graf 3).



Graf 2 - Závislost napětí na posuvu z 0 na 5 mm



Graf 3 - Závislost napětí na posuvu z 5 na 0 mm

Vynesenými hodnotami byla proložena spojnice trendu a přes směrnici přímky byla určena závislost mezi naměřenou výstupní hodnotou napětí a posuvem v milimetrech. Kalibrační konstanta k byla určena ze střední hodnoty směrnic přímek z Graf 2 a Graf 3.

Kalibrační konstanta k vyplývá z rovnice:

$$l = k * U \rightarrow x = \frac{1}{\left(\frac{0,2099 + 0,2109}{2}\right)} * y \rightarrow l = \frac{1}{0,2104} * U \rightarrow k = \frac{1}{0,2104} \left[\frac{mm}{V}\right]$$

Pro ověření, zda je chování LVDT snímače stejné i při zvýšených teplotách byla provedena celá kalibrace znovu při 60 °C. Kalibrační konstanta při této teplotě odpovídala stejné hodnotě jako při pokojové teplotě 25 °C. Tím bylo ověřeno, že přepočítání mezi napětím a posuvem není v různých teplotách proměnlivé.

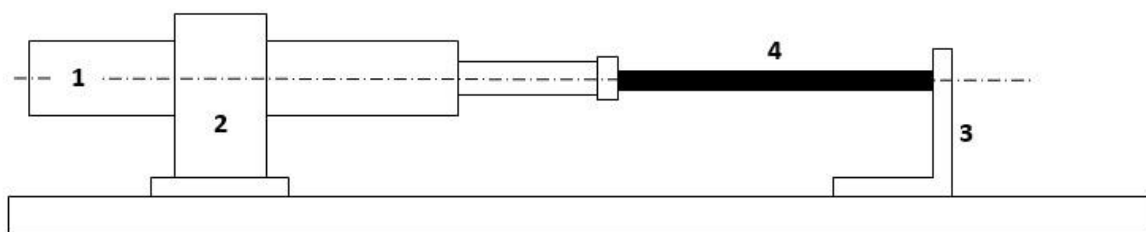
5.3.2. Měření v temperační komoře

Při měření teplotní roztažnosti je nutné myslet na to, že celý měřicí přípravek (Obrázek 20) je ovlivněn zvýšenou teplotou, a proto také podléhá teplotní roztažnosti. Vzhledem k velkým rozměrům přípravku byla jeho délková roztažnost mnohonásobně větší než roztažnost měřeného vzorku materiálu. Aby se tato skutečnost eliminovala a roztažnost přípravku neovlivnila výsledek měření, byl do temperační komory vložen nejprve samotný přípravek bez zkušební tělesa, který se nechal ohřát na teplotu, při níž bude měření probíhat. Vzhledem k tomu, že se přípravek a LVDT snímač skládá z několika různých materiálů, přičemž každý z nich má různé teplotní vlastnosti, bylo nutné nechat přípravek v temperační komoře dostatečně dlouho, aby výstupní napětí snímače měnící se vlivem teploty bylo konstantní. Po dostatečném ohřátí přípravku bylo možné provést měření.

V okamžiku dlouhodobého ustálení výstupního napětí na snímači, které se vlivem ohřívání měnilo, byla otevřena temperační komora a vloženo zkušební těleso. Při otevírání temperační komory bylo nutné postupovat co nejrychleji, aby se teplota uvnitř příliš neovlivnila. Zároveň bylo nutné vložit zkušební těleso do přípravku zcela rovně, to znamená v ose s LVDT snímačem.

Ještě před vložením samotného přípravku do temperační komory, byl nastaven LVDT snímač tak, aby se s vloženým zkušebním tělesem pohybovala hodnota výstupního napětí kolem elektrické nuly.

Zkušební těleso, které mělo při vložení do komory teplotu 25 °C se v důsledku vysoké teploty uvnitř začalo roztahovat, což se projevilo jako změna napětí na výstupu snímače, které začalo klesat, až nakonec došlo k jeho ustálení, což znamenalo, že je vzorek již zcela prohřátý a dále se už neroztahuje.



Obrázek 20 - Schéma měřicího přípravku: 1 - LVDT snímač, 2 - úchyt LVDT snímače, 3 - opěrné těleso pro měřený vzorek, 4 - měřený vzorek, autor schématu: Jan Vosáhlo

5.3.3. Výpočet součinitele délkové teplotní roztažnosti

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf závislosti napětí na čase (Graf 4). Při kladné roztažnosti zkoušeného materiálu měl graf klesající průběh. Z grafu byly odečteny hodnoty počátečního napětí U_1 a konečného ustáleného napětí U_2 . Při odečtu z grafu bylo potřeba vybrat střední hodnotu napětí. U materiálů s nízkou teplotní roztažností byla v důsledku malé změny napětí a přesnosti měření v grafu patrná oscilace napětí, a proto bylo pro lepší odhad vhodné použít spojnicí trendu s klouzavým průměrem.

Postup výpočtu:

$$\Delta l = (U_1 - U_2) \cdot k$$

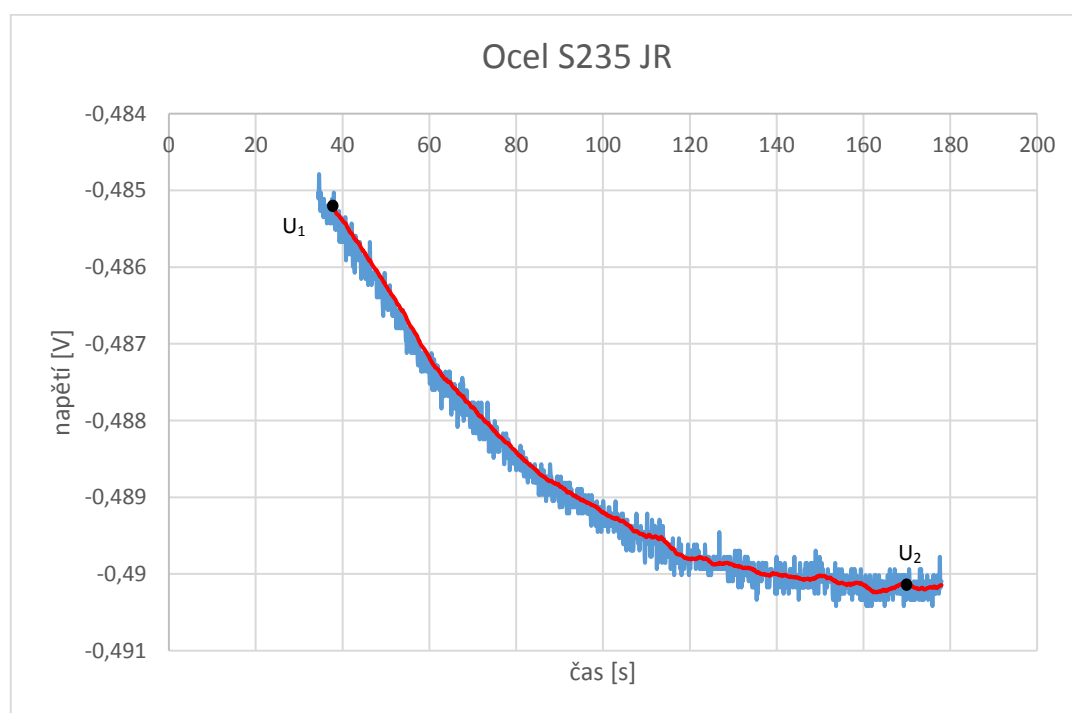
Kde: Δl = změna délky zkušební tělesa, U_1 = napětí na začátku měření, U_2 = napětí na konci měření, k = kalibrační konstanta

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\Delta l}{\Delta t} \right)$$

Kde: α = součinitel délkové teplotní roztažnosti, l = počáteční délka zkušební tělesa, Δt = rozdíl teplot, Δl = změna délky zkušební tělesa

Příklad výpočtu pro ocel S235 JR:

Počáteční délka zkušební vzorku je 50,5 mm. Materiál byl vystaven teplotnímu přechodu z 25 °C na 60 °C.



Graf 4 - Průběh napětí při ohřevu oceli S235 JR

Odečtené hodnoty napětí z grafu:

$$U_1 = -0,48511 \text{ V}$$

$$U_2 = -0,49018 \text{ V}$$

Výpočet změny délky zkušební tělesa:

$$\Delta l = (U_1 - U_2) \cdot k$$

$$\Delta l = (-0,48511 + 0,49018) \cdot \frac{1}{0,2104} \text{ mm}$$

$$\Delta l = 0,024 \text{ mm}$$

Výpočet součinitele délkové teplotní roztažnosti:

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\Delta l}{\Delta t} \right)$$

$$\alpha = \frac{1}{50,5} \left(\frac{0,024}{35} \right)$$

$$\alpha = 13,58 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

5.3.4. Ověření přesnosti měření

K ověření přesnosti měření byl použit referenční materiál se známou hodnotou součinitele délkové teplotní roztažnosti, kterým byla ocel S235 JR.

Zkušební vzorek oceli byl v podobě tyče o průměru 8 milimetrů a délce 50,5 milimetru. Celkem bylo provedeno pět měření a při každém byl materiál podroben teplotnímu přechodu z 25 °C na 60 °C.

Tabulka 2 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti pro ocel S235 JR

číslo měření	1	2	3	4	5
$\alpha [\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}]$	13,58	14,74	10,19	12,15	13,44

Střední hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti:

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

$$\bar{x} = 12,82 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Směrodatná odchylka:

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

$$\sigma = 1,550 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Střední hodnota naměřeného součinitele délkové teplotní roztažnosti pro ocel vyšla $12,82 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Tabulková hodnota pro ocel je $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

5.4. Zkušební tělesa

5.4.1. Materiály zkušebních těles

V Tabulka 3 jsou uvedeny materiály, u nichž byla měřena délková teplotní roztažnost. Zkušební materiály byly získány od firmy AERO Vodochody AEROSPACE a.s. V závěru práce bude zahrnuta do porovnání výsledků i tabulková hodnota délkové teplotní roztažnosti korozivzdorné oceli.

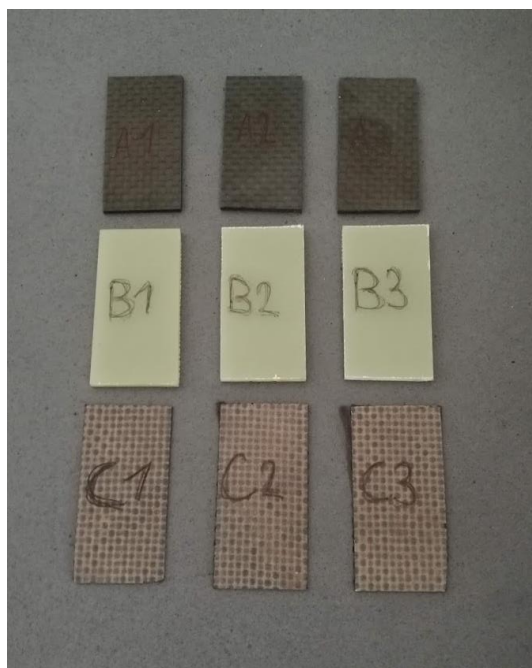
Tabulka 3 - Materiály zkušebních těles

Zkušební těleso	pojivo	výztuž	orientace vláken vůči podélnému rozměru vzorku	objemový podíl vláken	výrobní technologie
A1, A2, A3	epoxidová pryskyřice (prepreg HexPly® 8552)	tkanina uhlíková vlákna HexTow® AS4	0°/90°	60%	prepreg
B1, B2, B3	Epoxidová pryskyřice (prepreg Cytec L-530)	tkanina skleněná vlákna 7781	0°/90°	60%	prepreg
C1, C2, C3	geopolymerní pryskyřice GPL30	plátno KORDCARBON CCA 200 P - 100 Industry, 200 g/m ²	0°/90°	36%	kontaktní mokrá laminace

5.4.2. Rozměry zkušebních těles

Tabulka 4 - Rozměry zkušebních těles

Zkušební těleso	délka [mm]	šířka [mm]	tloušťka [mm]
A1	50,0	25,6	2,0
A2	49,0	25,1	2,0
A3	48,6	25,2	2,0
B1	49,7	24,9	2,6
B2	49,0	25,2	2,6
B3	49,0	26,0	2,6
C1	49,3	24,6	1,0
C2	51,0	25,1	1,0
C3	51,0	25,2	1,0



Obrázek 21 - Zkušební tělesa, autor fotografie: Jan Vosáhlo

5.5. Výsledky měření a diskuze

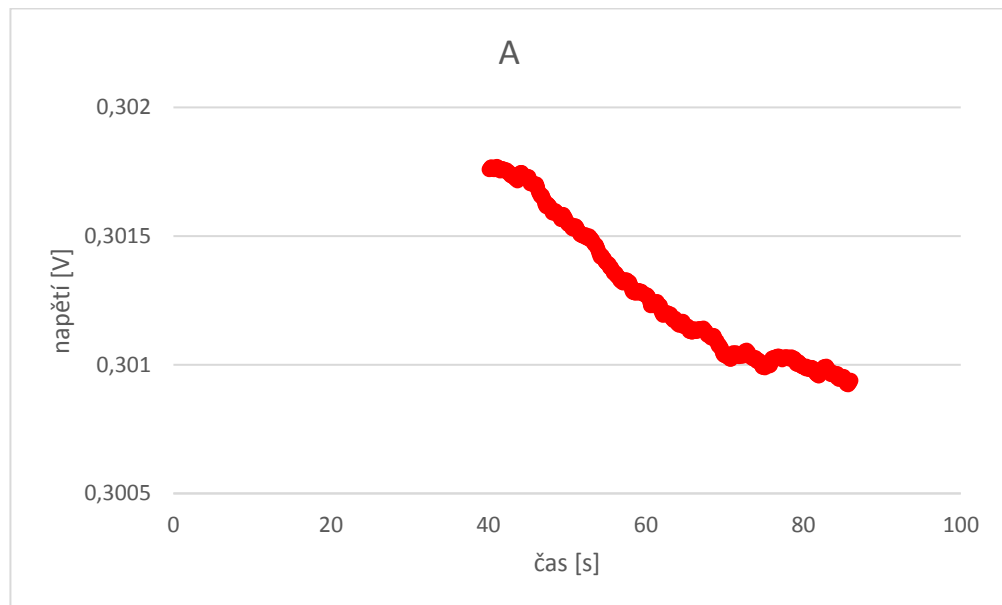
U každého zkušebního tělesa byla provedena tři měření, z nichž byly vyhodnoceny součinitelé délkové teplotní roztažnosti. Všechna zkušební tělesa byla stejně jako v případě oceli vystavena teplotnímu přechodu z 25 °C na 60 °C.

5.5.1. Materiál A

Tabulka 5 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti skupiny zkušebních těles A

číslo měření	1	2	3
$\alpha_{A1} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	2,19	3,29	2,63
$\alpha_{A2} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	3,35	1,8	2,24
$\alpha_{A3} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	3,15	1,8	3,38

Graf průběhu napětí:



Graf 5 - Průběh napětí při ohřevu zkušebního tělesa A

Střední hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti:

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

$$\bar{x} = 2,65 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Směrodatná odchylka:

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

$$\sigma = 0,624 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

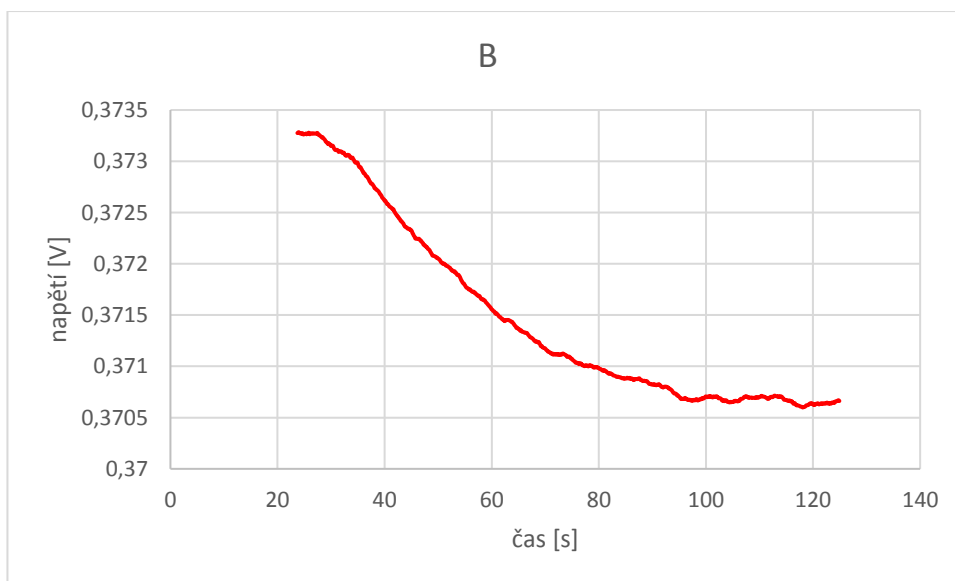
Při měření vzorku A (materiál HexPly® 8552) byla provedena u každého ze tří zkušebních těles tři měření, z nichž byly vyhodnoceny součinitelé délkové teplotní roztažnosti (Tabulka 5). Z těchto devíti výsledků byla stanovena střední hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti $2,65 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a směrodatná odchylka $0,624 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

5.5.2. Materiál B

Tabulka 6 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti skupiny zkušebních těles B

číslo měření	1	2	3
$\alpha_{B1} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	9,70	9,25	11,46
$\alpha_{B2} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	6,70	7,15	8,27
$\alpha_{B3} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	8,49	6,70	6,48

Graf průběhu napětí:



Graf 6 - Průběh napětí při ohřevu zkušebního tělesa B

Střední hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti:

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

$$\bar{x} = 8,25 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Směrodatná odchylka:

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

$$\sigma = 1,584 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

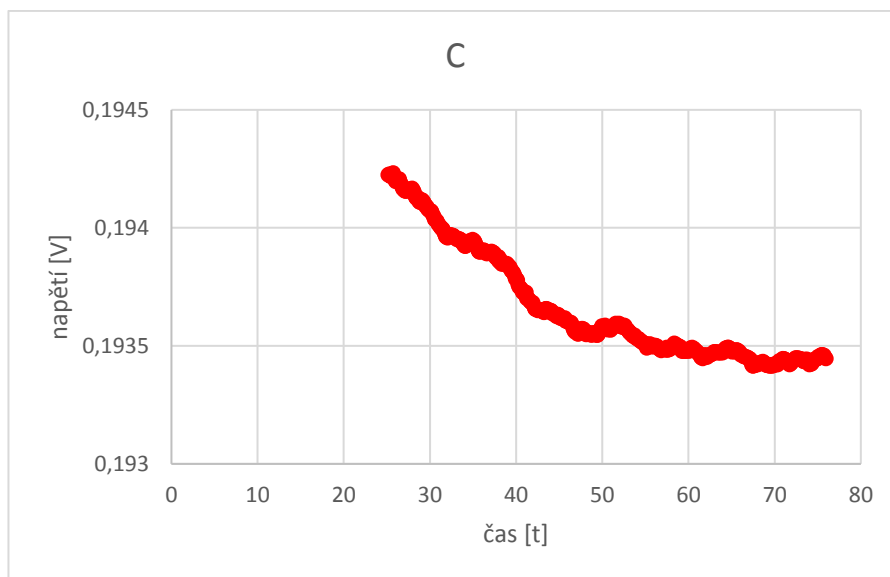
Při měření vzorku B (materiál Cytec L-530) byla provedena u každého ze tří zkušebních těles tři měření, z nichž byly vyhodnoceny součinitelé délkové teplotní roztažnosti (Tabulka 6). Z těchto devíti výsledků byla stanovena střední hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti $8,25 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a směrodatná odchylka $1,584 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

5.5.3. Materiál C

Tabulka 7 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti skupiny zkušebních těles C

číslo měření	1	2	3
$\alpha_{C1} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	1,11	2,22	2,22
$\alpha_{C2} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	2,58	1,93	1,29
$\alpha_{C3} [\cdot 10^{-6} K^{-1}]$	2,15	2,58	2,36

Graf průběhu napětí:



Graf 7 - Průběh napětí při ohřevu zkušebního tělesa C

Střední hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti:

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

$$\bar{x} = 2,05 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Směrodatná odchylka:

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

$$\sigma = 0,495 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Při měření vzorku C (materiál geopolymerní kompozit) byla provedena u každého ze tří zkušebních těles tři měření, z nichž byly vyhodnoceny součinitelé délkové teplotní roztažnosti (Tabulka 7). Z těchto devíti výsledků byla stanovena střední hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti $2,05 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a směrodatná odchylka $0,495 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Hodnoty směrodatných odchylek vypovídají o poměrně velkém rozptylu naměřených hodnot. To mohlo být způsobené změnou teploty při otevření temperační komory, kdy mohlo dojít ke změně roztažnosti snímače. Rozdíly v naměřených hodnotách mohly být dány také strukturou kompozitního

materiálu, neboť obě fáze vykazují jiné teplotní vlastnosti. Anizotropní uhlíková vlákna mají navíc rozdílnou délkovou teplotní roztažnost ve směru vláken a ve směru kolmo na ně, to mohlo činit potíže při měření vzorku A a C. Zároveň mohla být přesnost výsledku ovlivněna odečtem počátečního a konečného napětí, který byl prováděn pouze odhadem z klouzavého průměru.

Tabulka 8 - Srovnání součinitelů délkové teplotní roztažnosti

Materiál	α [$\cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$]
HexPly® 8552	2,65
Cytec L-530	8,25
Geopolymerní kompozit	2,05
Korozivzdorné oceli	12 až 17

V Tabulka 8 jsou uvedeny hodnoty součinitelů délkové teplotní roztažnosti měřených kompozitních materiálů a také tabulková hodnota součinitele délkové teplotní roztažnosti korozivzdorných ocelí, jejichž hodnoty se liší v závislosti na fázovém složení. Z výsledků vyplývá, že kompozity s uhlíkovými vlákny vykazují velmi nízkou délkovou teplotní roztažnost, přičemž nejnižší hodnoty dosahuje právě geopolymerní kompozit.

5.5.4. Návrh optimalizace měření

Na základě provedených měření, která byla pro tuto práci vybrána, by pro zpřesnění výsledků bylo vhodné další měření optimalizovat. Nejpodstatnější faktor, který zanáší do měření chybu, je ohřev LVDT snímače v temperační komoře. Vzhledem k tomu, že se LVDT snímač skládá z více druhů materiálu s rozdílnými tepelnými vlastnostmi, je těžké odhadnout jeho dostatečné zahřátí. Zároveň jednotlivé součástky snímače a celého přípravku mohou rozdílně reagovat na otevření komory při vložení zkušební vzorku.

Pro vyřešení tohoto problému, by bylo vhodné umístit LVDT snímač zcela mimo temperační komoru. Samotný zkušební vzorek by byl upnut do přípravku vyrobeného z invaru², který má velmi malou teplotní roztažnost. Vzorek by se opřel jednou stranou o opěru na konci přípravku a druhou stranou o invarovou tyč, která by vedla otvorem ven z pece a svým druhým koncem by se opírala o LVDT snímač. Tím by se odstranila případná chyba zanesená nedostatečným ohřátím snímače.

Dalším činitelem ovlivňující přesnost měření může být například nestabilní teplota v místnosti. Pro udržení stabilní teploty by bylo vhodné pracovat v klimatizovaném prostředí.

² Invar je slitina železa (64%) a niklu (36%) s velmi malou příměsí uhlíku a chromu.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat geopolymerní kompozit s jinými vhodnými kompozitními materiály a korozivzdornou ocelí pro díl v letecké konstrukci, kterým je potrubí předchladiče. V kapitole 4 teoretické části práce, byly popsány vhodné materiály pro toto konstrukční použití. Vzhledem k tomu, že potrubí bude vystaveno maximální provozní teplotě 350 °C, byla nejdůležitějším parametrem materiálu jeho teplotní odolnost a dále teplotní roztažnost, která je důležitá při uvedeném konstrukčním použití. Předpokládáme, že součinitel teplotní roztažnosti se nebude příliš lišit v oblasti kolem 300 °C od měření v oblasti kolem 60 °C. Z uvedených materiálů by takto vysoké teplotě odolaly kromě korozivzdorných ocelí pouze geopolymerní kompozity a kompozity s některými druhy polyimidových pryskyřic. I přes to, že kompozity s bismaleimidovou maticí patří mezi kompozitní materiály určené pro vyšší teploty, je v tomto případě jejich použití nemyslitelné. Bismaleimidové pryskyřice dosahují teplot skelných přechodů od 250 do 320 °C a jejich maximální provozní teplota je 200 °C, což je pro toto konstrukční použití nedostačující. Polyimidy mají lepší teplotní odolnost než bismaleimidy, nicméně použitelnost nad teplotu 350 °C vykazují pouze některé komerční typy. I tak je u těchto vybraných druhů maximální provozní teplota udávaná výrobcem okolo 371 °C, což je pro danou konstrukci na hranici použitelnosti. Mezi výrobce těchto pryskyřic patří například společnost PROOF nebo Maverick Corporation. Nevýhodou polyimidových pryskyřic je jejich vysoká cena, která se pohybuje v desítkách tisíc korun za kilogram a také pravděpodobně jejich složitá dostupnost. Geopolymerní pryskyřice vykazují mnohem vyšší teplotní odolnost, která může dosahovat teplot až 1000 °C. Zároveň lze geopolymerní pryskyřici připravit ze snadno dostupných surovin a její finanční náklady jsou velmi nízké a pohybují se v desítkách korun za kilogram. Geopolymerní kompozit lze v principu vyrobit celou řadou standardních výrobních technologií, kromě technologií infuzních, což naopak umožňují pryskyřice polyimidové. Nevýhodou geopolymerního kompozitu je však jeho křehkost a nepříliš dobrá adheze mezi vlákny a výztuží. Vzhledem k tomu, že se potrubí nachází v bezprostřední blízkosti motoru, který bude pravděpodobně zdrojem vibrací, lze předpokládat, že by toto dynamické namáhání mohlo činit problémy a narušit soudržnost dílu. Proto by bylo vhodné podrobit geopolymerní kompozit únavovým zkouškám při cyklickém namáhání. Pokud by se na základě těchto zkoušek ukázal být vhodným materiálem, bylo by jeho použití pro potrubí předchladiče přípustné. Do té doby by bylo pravděpodobně nejvhodnější použít některou z korozivzdorných ocelí navzdory mnohonásobně vyšší hmotnosti dílu. Využití geopolymerního kompozitu se jeví jako perspektivní například při výrobě vnitřních panelů do letadel, kde by mohly nahradit kompozity s fenolickou maticí. Tento materiál je sice nehořlavý, nicméně uvolňuje velké množství zplodin, které může způsobit problémy. Geopolymerní kompozity jsou nehořlavé a zároveň neuvolňují žádné zplodiny, proto by bylo vhodné je použít jako nehořlavý materiál do interiérů dopravních letadel.

V experimentální části práce bylo provedeno měření délkové teplotní roztažnosti u vybraných materiálů, kterým byl geopolymerní kompozit, kompozit se skleněnou tkaninou a epoxidovou matricí a kompozit s uhlíkovou tkaninou a epoxidovou matricí.

Měření probíhalo v laboratoři Centra kompozitů na Kloknerově ústavu ČVUT v Praze. Délková teplotní roztažnost byla měřena v temperační komoře pomocí LVDT snímače a materiály byly podrobeny teplotnímu přechodu z 25 na 60 °C. Z prověřených materiálů dosahoval geopolymerní kompozit nejmenší hodnotu součinitele délkové teplotní roztažnosti, jehož střední hodnota byla $2,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. V porovnání oproti tomu korozivzdorné oceli dosahují hodnot součinitele délkové teplotní roztažnosti v závislosti na fázovém složení od 12 do $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Proto by z hlediska délkové teplotní roztažnosti bylo nejvhodnější použít geopolymerní kompozit, vzhledem k nižšímu možnému zanesenému napětí do konstrukce letadla.

Seznam zdrojů

- [1] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity. Praha: SNTL - NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1987.
- [2] 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.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [4] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [5] *Kompozity* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [6] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN isbn80-7043-273x.
- [7] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN isbn80-7080-568-4.
- [8] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] *SBORNÍK vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava* [online]. [cit. 2018-06-02]. ISSN 1213-1962. Dostupné z: <https://www.fast.vsb.cz/export/sites/fast/cs/veda-a-vyzkum/odborna-cinnost-fakulty/sbornik-vedeckych-praci/archiv-vydanych-sborniku/sbornik-vsbtuo-fast-2012-2.pdf>
- [10] STRAŇÁK, Vít. *Geopolymery* [online]. [cit. 2018-06-03]. Dostupné z: http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery
- [11] Současný stav výzkumu v oblasti geopolymérů. Praha: Česká rozvojová agentura, 2005. 100 p.
- [12] DOAN HUNG, Tran. *Geopolymerní kompozitní systémy na bázi termální siliky: studie postupu přípravy a mechanických vlastností* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2018-06-07]. Dizertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Louda, CSc.
- [13] ŘEZNÍK, Bohuslav. *Alkalická aktivace mletého keramického střepe* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: http://www.civilengineeringjournal.cz/archive/issues/2014/so_9-10/so_05_14_reznic.pdf

- [14] *Examples of geopolymer frameworks* [online]. 2006 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.geopolymer.org/science/examples-geopolymer-frameworks/>
- [15] Ing. Jan Václavík – písemné sdělení
- [16] *HEXCEL* [online]. [cit. 2018-06-10]. Dostupné z: https://hexcel.com/user_area/content_media/raw/IndustrialSelectorGuide_2018.pdf
- [17] Ing. František Martaus – písemné sdělení
- [18] MARTAUS, František. *Infuzní technologie výroby kompozitů a jejich simulace v MKP* [online]. [cit. 2018-06-10]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Infuze_VZLU.pdf
- [19] *KORDCARBON* [online]. [cit. 2018-06-10]. Dostupné z: <http://www.kordcarbon.cz/produkty>
- [20] RESIN TRANSFER MOULDING. *Orenco COMPOSITES* [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <http://orencocomposites.com/processes/rtm/>
- [21] Zpracování kompozitů [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>
- [22] *PROOF research* [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: https://www.proofresearchacd.com/wp-content/uploads/2015/10/PROOF-ACD_data_sheet_900HT_update_10-16-15v2.pdf
- [23] *Cytec* [online]. [cit. 2018-07-05]. Dostupné z: https://www.cytec.com/sites/default/files/datasheets/THORNEL_T650-35_052112.pdf
- [24] *Maverick corporation* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: http://www.maverickcorp.com/_CE/pagecontent/Documents/J1.pdf
- [25] *HEXCEL* [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_M65_us_DataSheet.pdf
- [26] *HEXCEL* [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/AS4C_Aerospace_HexTow_DataSheet.pdf
- [27] *MatWeb: MATERIAL PROPERTY DATA* [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck>
- [28] Druhy nerezové oceli a příklady jejího užití. *FASTENERS: spojovací materiál* [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <http://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
- [29] Hustota materiálů a látek. *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hustota-materialu-a-latek>

- [30] *HEXCEL* [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_8552_eu_DataSheet.pdf
- [31] *AZO MATERIALS* [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>
- [32] *HEXCEL* [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/AS4_HexTow_DataSheet.pdf
- [33] Resins for the Hot Zone, Part I: Polyimides. *Composites World* [online]. [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/resins-for-the-hot-zone-part-i-polyimides>
- [34] Anomálie vody. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/645-anomalie-vody>
- [35] What is an LVDT. *TE connectivity* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <http://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/lvdt-tutorial.html>
- [36] VOJÁČEK, Antonín. Jak pracují LVDT snímače pro měření pohybu či detekci přiblížení. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2011 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/jak-pracuji-lvdt-snimace-pro-mereni-pohybu-ci-detekci-priblizeni>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Synergický efekt [4]	11
Obrázek 2 - Rozdělení kompozitních materiálů [6].....	12
Obrázek 3 - Rozdělení kompozitů dle výztuží [7]	14
Obrázek 4 – Struktura geopolymery [14]	20
Obrázek 5 - Potrubí předchladiče [15]	21
Obrázek 6 - Maximální provozní teploty polymerních pryskyřic [16]	22
Obrázek 7 - Geopolymerní pryskyřice [17]	23
Obrázek 8 - Homogenizér [17]	24
Obrázek 9 - Impregnace výztuže stěrkou [17]	24
Obrázek 10 - Zpracování geopolymerního pojiva do výztuže [17].....	25
Obrázek 11 - Laboratorní aparatura k přípravě wet-pregu [17]	25
Obrázek 12 - Geopolymerní wet-preg s uhlíkovou tkaninou [17].....	26
Obrázek 13 - Vakuové lisování panelu z geopolymerního wet-pregu [17]	26
Obrázek 14 - Schéma RTM [20].....	28
Obrázek 15 - Schéma LRTM [21]	29
Obrázek 16 - Řez LVDT snímačem [35]	33
Obrázek 17 - Lineární oblast snímače [36].....	33
Obrázek 18 - Temperační komora, autor fotografie: Jan Vosáhlo.....	34
Obrázek 19 - Kalibrace LVDT snímače v měřicím přípravku, autor fotografie: Jan Vosáhlo	35
Obrázek 20 - Schéma měřicího přípravku: 1 - LVDT snímač, 2 - úchyt LVDT snímače, 3 - opěrné těleso pro měřený vzorek, 4 - měřený vzorek, autor schématu: Jan Vosáhlo.....	38
Obrázek 21 - Zkušební tělesa, autor fotografie: Jan Vosáhlo	42

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Ceny teplotně odolných pryskyřic [33].....	31
Tabulka 2 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti pro ocel S235 JR	40
Tabulka 3 - Materiály zkušebních těles	41
Tabulka 4 - Rozměry zkušebních těles	42
Tabulka 5 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti skupiny zkušebních těles A ...	43
Tabulka 6 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti skupiny zkušebních těles B ...	44
Tabulka 7 - Výsledné hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti skupiny zkušebních těles C ...	45
Tabulka 8 - Srovnání součinitelů délkové teplotní roztažnosti	47

Seznam grafů

Graf 1 - Závislost napětí na čase	36
Graf 2 - Závislost napětí na posuvu z 0 na 5 mm	37
Graf 3 - Závislost napětí na posuvu z 5 na 0 mm	37
Graf 4 - Průběh napětí při ohřevu oceli S235 JR	39
Graf 5 - Průběh napětí při ohřevu zkušebního tělesa A	43
Graf 6 - Průběh napětí při ohřevu zkušebního tělesa B	44
Graf 7 - Průběh napětí při ohřevu zkušebního tělesa C	46