

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Mechanické, fyzikální a tepelné vlastnosti kompozitních
materiálů pro elektrotechniku**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vladimír ČÍŽEK**
Osobní číslo: **E17N0006P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Mechanické, fyzikální a tepelné vlastnosti kompozitních materiálů pro elektrotechniku**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Charakterizujte základní dělení kompozitních materiálů, uveďte způsob jejich výroby a definujte jejich vlastnosti.
2. Popište soubor experimentálních metod pro hodnocení mechanických, fyzikálních a tepelných vlastností kompozitních materiálů.
3. Navrhněte a realizujte experiment vhodných testů na vybraný kompozitní materiál.
4. Naměřené vlastnosti vyhodnoťte a porovnejte.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0
2. ASKELAND, Donald R, Pradeep P FULAY a Wendelin J WRIGHT. The science and engineering of materials. 6th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, c2011. ISBN 0495296023
3. CROMPTON, T.R. Physical testing of plastics. Shawbury: Smithers Rapra, 2012. ISBN 9781847354853.
4. internetové informační zdroje - databáze ScienceDirect, IEEE, Scopus

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Prosr, Ph.D.

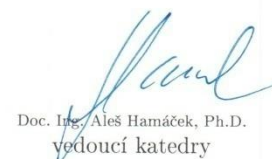
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá porovnáním dvou vybraných kompozitních materiálů z hlediska mechanických, fyzikálních a tepelných vlastností. V první části je popsána základní problematika týkající se kompozitních materiálů a způsobu jejich výroby. Další část práce je zaměřena na popis vybraných metod, pomocí kterých vyhodnocujeme samotné vlastnosti zkoumaných materiálů. V praktické části je nejprve popsán postup přípravy vzorků, na kterých jsou prováděny jednotlivé zkoušky a následně postup měření jednotlivých zkoušek. V poslední části jsou prezentovány a vyhodnocovány výsledky získané pomocí vybraných metod a oba materiály porovnány.

Klíčová slova

Kompozitní materiál, matrice, výztuž, vlákna, vzorek, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, tepelné vlastnosti, zkouška tahem, zkouška ohybem, zkouška rázem, tvrdost, hustota, termické analýzy

Abstract

This diploma thesis is focused on comparison of two selected composite materials in terms of mechanical, physical and thermal properties. The first part contains a description of basic issues concerning composite materials and a way of their production. The next part is focused on chosen methods used to evaluate the properties of the examined materials. In practical part, a preparation procedure of samples being tested and subsequently a measurement process of individual tests are described. In the last part, the results obtained by using the chosen methods are presented and evaluated, and the both materials are compared.

Key words

Composite materials, matrix, reinforcement, fibres, sample, mechanical properties, physical properties, thermal properties, tensile test, flexural test, impact test, hardness, density, thermal analysis

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 22.5.2019

Bc. Vladimír Čížek

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Pavlu Prosovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, ochotu, cenné rady a věnovaný čas, který mi poskytl. Tato diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607. Dále byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2018-016 „Diagnostika a materiály v elektrotechnice.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	11
1.2 VÝZTUŽE V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH.....	13
1.3 MATRICE V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH.....	15
1.4 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	16
2 METODY PRO HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	20
2.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	20
2.1.1 Zkouška tahem.....	22
2.1.2 Zkouška ohybem.....	23
2.1.3 Zkouška rázová.....	24
2.1.4 Zkouška tvrdosti.....	25
2.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI.....	26
2.2.1 Hustota.....	26
2.3 TEPELNÉ VLASTNOSTI.....	27
2.3.1 Teplota skelného přechodu.....	27
2.3.2 Teplota dekompozice.....	28
2.3.3 Teplotní roztažnost.....	28
2.3.4 Teplota tavení.....	28
2.3.5 Teplota krystalizace.....	28
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
3.1 TESTOVANÉ MATERIÁLY.....	29
3.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	30
3.3 POPIS METODY MĚŘENÍ ZKOUŠKY TAHEM.....	35
3.4 POPIS METODY MĚŘENÍ ZKOUŠKY TŘÍBODOVÝM OHYBEM.....	35
3.5 POPIS METODY MĚŘENÍ RÁZOVÉ ZKOUŠKY.....	36
3.6 POPIS METODY MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	37
3.7 POPIS METODY MĚŘENÍ HUSTOTY.....	38
3.8 POPIS METOD A PRINCIP MĚŘENÍ POMOCÍ TERMICKÝCH ANALÝZ.....	39
3.8.1 Diferenční skenovací kalorimetrie - DSC.....	39
3.8.2 Simultánní termická analýza - STA.....	40
3.8.3 Dynamická mechanická analýza - DMA.....	41
3.8.4 Termomechanická analýza - TMA.....	42
4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	43
4.1 ZNAČENÍ VZORKŮ.....	43
4.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	44
4.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TŘÍBODOVÉHO OHYBU.....	46
4.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	48
4.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TVRDOSTI.....	49
4.6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ HUSTOTY.....	51
4.7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÉ METODOU DSC.....	52
4.8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÉ METODOU STA.....	53
4.9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÉ METODOU DMA.....	56
4.10 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÉ METODOU TMA.....	59
ZÁVĚR	62
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64
PŘÍLOHY	66

Úvod

Kompozitní materiály jsou v dnešní době stále více využívány, převládá snaha vše co nejvíce zdokonalovat, protože vlastnosti základních materiálů již nemusí v některých případech samostatně dostačovat v konkrétních aplikacích. S jednotlivými kompozitními materiály se můžeme setkat v každodenním životě. Jako důkaz lze uvést stále se rozvíjející svět automobilového průmyslu, kde jsou kompozitní materiály nezbytnou součástí. Za zmínku také stojí pravděpodobně nejznámější kompozitní materiál železobeton, který je používán např. při stavbách mostů. V elektrotechnickém průmyslu jsou kompozitní materiály stále častěji využívány, např. jako základový materiál desky plošných spojů. Hlavním důvodem jejich použití jsou bezesporu výsledné vlastnosti, které získáme spojením minimálně dvou rozdílných materiálů. Tím je dosaženo produktu, jenž nabývá takových vlastností, které by neměl žádný ze samostatných materiálů.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř kapitol, z nichž první dvě jsou teoretické a zbývající dvě praktické. První kapitola se zabývá popisem problematiky kompozitních materiálů, jako je základní dělení, popis používaných výztuží a matic a také možnosti výroby kompozitních materiálů. Druhá kapitola obsahuje teoretický popis metod, pomocí kterých hodnotíme kompozitní materiály a také popis jednotlivých mechanických, fyzikálních a tepelných vlastností. Třetí kapitola představuje již samotnou experimentální část, kdy jsou nejprve popsány základní charakteristiky měřených materiálů, dále příprava vzorků pro jednotlivá měření a postup měření při jednotlivých zkouškách. Poslední kapitola je věnována samotnému vyhodnocení naměřených dat z jednotlivých zkoušek a následnému porovnávání z hlediska odlišnosti sledovaných vlastností měřených materiálů.

Seznam symbolů a zkratk

UV	Ultrafialové záření
MMC	Kompozity s kovovou maticí (Metal matrix composites)
CMC	Kompozity s keramickou maticí (Ceramic matrix composites)
PMC.....	Kompozity s polymerní maticí (Polymer matrix composites)
PA.....	Polyamidy
PMMA.....	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylen
PBT.....	Polykarbonát
ε	Poměrné prodloužení [%]
σ	Normálové napětí [MPa]
σ_m	Mez pevnosti [MPa]
σ_y	Napětí na mezi kluzu [MPa]
σ_b	Napětí při přetržení [MPa]
α	Koeficient teplotní délkové roztažnosti [ppm/°C]
β	Koeficient teplotní objemové roztažnosti [ppm/°C]
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry)
STA.....	Simultánní termická analýza (Simultaneous Thermal Analysis)
TGA.....	Termogravimetrická analýza (Thermogravimetric Analysis)
DMA.....	Dynamická mechanická analýza (Dynamic Mechanical Analysis)
TMA	Termomechanická analýza (Thermomechanical Analysis)
REL.....	Relanex
RTK.....	Remikakit
R_m	Pevnost v tahu [MPa]
R_{m0}	Pevnost v ohybu [MPa]
F_{max} ...	Maximální dosažená síla [N]
E.....	Modul pružnosti v tahu, resp. v ohybu [MPa]

1 Kompozitní materiály

Pod pojmem kompozitní materiál rozumíme materiál, jenž je složen ze dvou nebo více fází (složek), které mají odlišné mechanické a fyzikální vlastnosti [1]. Složením těchto fází získáme úplně nový materiál, jehož vlastnosti jsou daleko lepší než při pouhém sečtení jednotlivých fází. Dvousložkový kompozitní materiál se skládá ze spojitě fáze, nazývané se matrice (pojivo) a nespojitě fáze, kterou nazýváme výztuž (nosná složka) [1,2]. U vícesložkových kompozitních materiálů můžeme mít navíc ještě plnivo, které slouží pro zlepšení vlastností a může být ve formě různých přísad či aditiv. Samotné vlastnosti matrice a výztuže se výrazně liší. Výztuž zpravidla má daleko lepší mechanické vlastnosti, například tvrdost, tuhost a pevnost. Kdežto matrice plní funkci pojiva výztuže a chrání samotnou výztuž před vnějšími vlivy [1,2,3]. Kompozitní materiál je nejčastěji produkován mísením jednotlivých složek. Tyto složky musí být obsaženy nejméně z 5 % v celkovém množství materiálu [1,4].

Kompozitní materiály jsou využívány ve všech oblastech průmyslu, a to zejména pro konstrukční účely [1]. Díky jejich vlastnostem lze projektovat takové konstrukce, které mají výborné mechanické vlastnosti a zároveň mohou být mnohem lehčí s daleko větší životností než např. u slitin hliníku či titanu [1,5].

1.1 Základní dělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit dle dvou základních kritérií [2]:

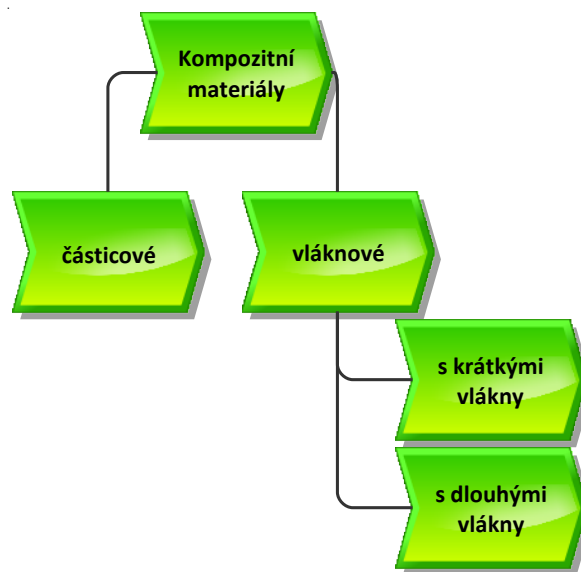
- 1) geometrického tvaru výztuže,
- 2) povahy matrice.

Geometrický tvar výztuže lze dělit na částicové a vláknové, které můžeme ještě klasifikovat podle typu použitých vláken, a to s krátkými nebo dlouhými vlákny. S tímto rozdělením se můžeme setkat převážně u termoplastů. Dle povahy matrice rozeznáváme tři základní kategorie, a to kompozitní materiály s polymerní matricí, s kovovou matricí a s keramickou matricí [2]. Pro přehlednost jsou tato rozdělení znázorněna na obrázcích 1.1 a 1.2.

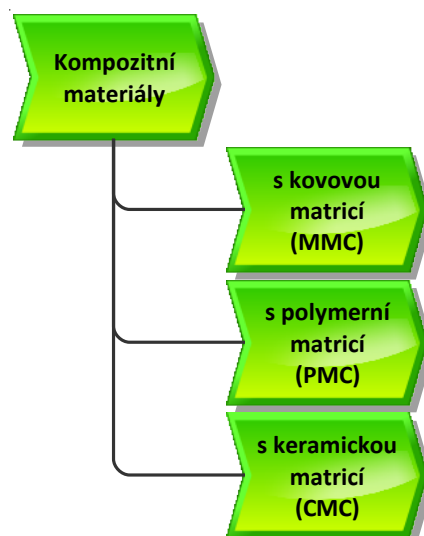
Jen ve výjimečných případech se můžeme setkat s dílčími vlákny. Ve většině aplikací se vyztužující vlákna sdružují do jednotlivých pramenců, tzv. rovingů [6]. U rovingů jsou vlákna pokládána tak, aby byla rovnoběžně uložena v celistvých a pokud možno

v nezkroucených délkách. Dále existují rohože, což jsou nepravidelně plošně uspořádaná vlákna. Jako další rozeznáváme tkaninu z pramenců a tkaninu z vláken. S těmito typy výztuží se můžeme setkat u reaktoplastů u reaktivních pryskyřic [4,6].

U částicových kompozitních materiálů velikost jedné částice nepřevyšuje velikost ostatních částic, kdežto vláknové kompozitní materiály s krátkými vlákny mají podstatně kratší vlákna, než je samotná velikost výrobku. Naopak u vláknových kompozitních materiálů s dlouhými vlákny máme daný výrobek srovnatelný s délkou jednotlivých vláken [2,3].



Obr. 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů dle geometrického tvaru termoplastických výztuží (upraveno z [3])



Obr. 1.2 Rozdělení kompozitních materiálů dle povahy matrice (upraveno z [3])

1.2 Výztuže v kompozitních materiálech

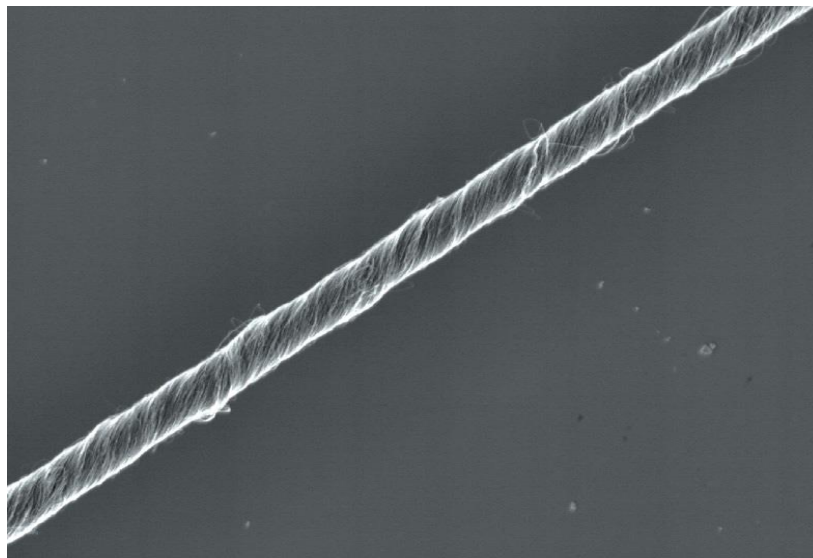
Vláknové výztuže

Kompozitní materiály s vláknovými výztužemi mají jednu obrovskou výhodu, a to především vysokou pevnost, která bývá mnohonásobně větší než u běžných materiálů [2]. Pro vláknové výztuže bývá také charakteristická anizotropie vlastností, tj. že v podélném směru osy mívají odlišné vlastnosti než ve směru kolmém. Z toho důvodu je ve směru vyztužených vláken nejvyšší pevnost [2,3].

Vlákna používaná v kompozitních materiálech mohou být jak organického, tak i anorganického původu. Pro vyztužení se nejvíce využívají tři základní typy vláken, a to vlákna skleněná, uhlíková a aramidová. Další možností je využití vláken přírodních, zakládající se na bázi celulózy. Ve speciálních případech se mohou použít i vlákna borová, ta se ale díky vyšší ceně využívají pro náročnější aplikace v letectví [2,5].

Skleněná vlákna jsou produkována z roztavené skloviny rychlým tažením. Díky této zjednodušené produkci jsou vlákna ve srovnání s ostatními vcelku levná a jejich nejčastější použití bývá v textilním průmyslu. Skleněná vlákna můžeme rozlišovat dle typu skloviny [6,7], přičemž pro výrobu vláken se nejčastěji používá sklovina typu E-sklovina [6]. Tyto skloviny se vyznačují velkou propustností pro záření a mohou sloužit jako velmi dobrý elektrický izolant. Dále jsou vyráběny skloviny typu S, R a T. Skloviny toho druhu mají vyšší obsah SiO_2 , MgO a Al_2O_3 a vyznačují se větší pevností, ale i vyšší cenou. V porovnání s ostatními vyztužujícími vlákny mají skleněná vlákna nízký modul pružnosti [2,5,6].

Uhlíková vlákna jsou charakteristická svojí tuhostí a vynikající pevností v tahu. Zároveň mají vysoké mechanické vlastnosti, navíc se vyznačují skvělými schopnostmi tlumení vibrací a nízkou hmotností. Mezi další vlastnosti uhlíkových vláken patří odolnost proti vysokým teplotám, žáruvzdornost, odolnost proti korozi či tepelná a elektrická vodivost [6,7]. Vlákna lze vyrábět několika způsoby, a to buď z polyakrylonitrilu nebo pyrolýzou zbytků po destilaci ropy, smoly či dehtu, což je levnější, avšak méně kvalitní forma výroby [7]. Uhlíková vlákna jsou hlavně díky svým pozitivním vlastnostem řazena mezi nejlepší výztuže používané pro kompozitní materiály. Největší bariérou použití těchto vláken je relativně vysoká cena [2,6,7].



Obr. 1.3 Ukázka uhlíkového vlákna (převzato z [8])

Aramidová vlákna řadíme do skupiny organických polymerů. Tato vlákna můžeme znát pod obchodní značkou Kevlar či Nomex, dodávající firma Du Pont. [5] Aramidová vlákna se vyznačují výbornou mechanickou pevností a vysokou tuhostí. Výslednou pevnost samotného vlákna ovlivňuje například UV záření nebo také vlhkost, a to z toho důvodů, že jsou velmi hydrofilní [6,9]. Proto nejsou vhodná pro použití tam, kde je vlhké prostředí. Avšak odolnost proti účinkům různých druhů rozpouštědel mají vynikající. Kompozitní materiály s aramidovými vlákny jsou používány tam, kde je nutné tahové namáhání, protože mají mez pevnosti v tahu výrazně vyšší než mez pevnosti v tlaku [5,6,9].

Přírodní vlákna se využívají pro vyztužení plastů. Nejvhodnějšími přírodními vlákny jsou vlákna rostlinná, jejichž základem je celulóza. Používané rostliny pro tvorbu vláken mohou být například: len, konopí, sisal, juta, ramie nebo bavlna [6]. Jejich velkou výhodou je velká pevnost v tahu, odolnost proti stárnutí, nízká hustota a likvidace spalováním. Jako nevýhody můžeme zmínit citlivost na vlhké prostředí či zhoršení vlastností při biologickém napadení vláken. Nejpoužívanější rostlinou pro výrobu těchto vláken je především len [3,6].

Částicové vyztuže

Kompozitní materiály s částicovými vyztužemi se vyznačují především dobrou tvrdostí, oteřuvzdorností a velmi dobrou odolností při zvýšených teplotách. Ve srovnání s vláknovými vyztužemi jsou méně využívány na trhu kompozitních materiálů [2,3].

1.3 Matrice v kompozitních materiálech

Jak již bylo zmíněno výše, matrice plní v kompozitním materiálu funkci pojiva samotné výztuže a chrání výztuž před vnějšími vlivy. Matrice musí zaručit správnou polohu vláken, přesun namáhání na jednotlivá vlákna a zajistit správnou tvarovou stálost materiálu [2,5,6].

Matrice rozdělujeme na tyto základní skupiny: polymerní, kovové a keramické matrice. Do skupiny keramických matric bývají ještě dále přidělovány matrice skleněné a uhlíkové [2].

Polymerní matrice (PMC)

Pro kompozitní materiály s polymerními matricemi obecně platí, že mají horší stabilitu při vyšších teplotách, citlivost na UV záření a vlhkost. Přítomnost ve vlhkém prostředí může mít za následek horší mechanické účinky [6]. Výhodou těchto matric je jejich nízká hustota. Nejčastějšími polymerními matricemi jsou reaktoplasty či termoplasty. Nejpoužívanějšími reaktoplastickými matricemi jsou fenoplasty, polyestery, epoxidy, aminoplasty či epoxidové pryskyřice. Mezi nejvýznamnější zástupce termoplastických matric řadíme například polypropylen, polyamidy (PA6, PA66, P12 apod.), polymethylmethakrylát (PMMA), polyoxymethylen (POM) či polykarbonáty (PBT) [4,6]. Častěji používány jsou však reaktoplasty, z důvodu snadnějšího zpracování a lepších vlastností při vyšších teplotách, kdy se vytvrzují a nerozpustí se. Mají tak lepší mechanické vlastnosti jako pevnost a tuhost, ale stávají se křehčími. Reaktoplasty jsou pryskyřice, které se teplem vytvrzují za pomoci katalyzátoru, mají dobrou odolnost proti vlhkosti a slouží tak jako pojivo výztuže. Polymerní matrice jsou nejpoužívanějším typem matric [3,4,6].

Kovové matrice (MMC)

Kovové matrice se vyznačují tvárností a především houževnatostí. Hlavní předností před více používanými polymerními matricemi je větší pevnost, tuhost a hlavně houževnatost [2,4]. Dále mají lepší elektrickou a tepelnou vodivost, nehořlavost či daleko lepší odolnost vůči vlhkému prostředí. Tyto přednosti jsou však kompenzovány složitější technologií výroby a samozřejmě vyšší cenou [1,4]. Nejtypičtějším příkladem kovových matric jsou slitiny hliníku, titanu, hořčíku nebo také niklu. Nejpoužívanějším materiálem těchto matric bývá hliník se zpevněnými částicemi, a to z důvodů příznivé ceny, dobrých

mechanických vlastností a dobrého zpracování. Pro vysokoteplotní aplikace se používají především slitiny niklu a pro elektrotechniku jsou nejvíce používány stříbrné matrice nebo cenově dostupnější měděné matrice [1,2,4].

Keramické matrice (CMC)

Keramické matrice jsou charakteristické svojí odolností vůči vysokým teplotám. Matrice jsou velmi tvrdé, lehké, ale i velice křehké. Křehkost je největší problém keramiky, proto se matrice vyztužují vlákny, která mají za následek zvýšení houževnatosti [5,9]. Kromě toho vykazují nízkou tepelnou a mechanickou rázovou odolnost a mají menší pevnost v tahu. Mají rovněž velmi dobrou odolnost proti oxidaci a poměrně nízkou hustotu. Jako keramické matrice můžeme brát například karbidy, nitridy či oxidické keramiky jako korund. Můžeme je popsat jako sloučeniny jednoho, popř. více kovů v kombinaci s dalšími nekovovými sloučeninami, jako například uhlík, kyslík nebo dusík [3,5,9].

1.4 Výrobní technologie kompozitních materiálů

Výroba prepregů

Samotná matrice a vláknové výztuže lze spojovat do tzv. prepregů, které slouží pro výrobu kompozitních materiálů. Největší výhodou prepregů jsou jejich výborné mechanické vlastnosti, nízká objemová hustota výrobku a také jednodušší proces výroby [6,10]. Při výrobě prepregu se z cívky odvíjí jednotlivá vlákna, která se poté za pomoci hřebenu srovnávají do jedné roviny. Tato vlákna se následně vkládají na papírový pás, jenž obsahuje nanos pryskyřice. Dále dochází k prosycení vláknové výztuže se samotnou matricí a ke konečnému vytvrzení [6,11]. Pomocí prepregů je možné vyrobit kompozitní materiály s výbornými vlastnostmi, které se používají zejména v letectví pro pevnostní díly nebo v automobilovém průmyslu jako velice lehké karbonové součásti, mj. jsou použitelné i v odvětví elektrotechniky [6,10]. Výsledné prepregy musejí být uchovány při teplotách okolo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, než dojde ke konečnému použití [12]. Pro ukázkou lze vidět prepreg na obrázku 1.4.



Obr. 1.4 Ukázka prepregu (převzato z [11])

V současné době se používá řada výrobních technologií pro kompozitní materiály, z tohoto důvodu budou popsány ty nejpoužívanější z nich.

Autoklávová technologie

Tato technologie výroby kompozitních materiálů využívá prepregů. Prepreg se nejprve nařeže podle přesných rozměrů a navrství se do požadované formy. Celá forma pokrytá dalšími foliemi se poté vloží do tzv. vakuového pytle a následně do autoklávu, což je nádoba, kde probíhá přesně řízené vytvrzení dílu za přítomnosti vysokých teplot a tlaku [6,10]. Velkou nevýhodou autoklávu je vysoká cena a použití při malosériové výrobě, přesto se však jedná o nejpoužívanější technologii pro výrobu karbonových součástek. Výsledkem autoklávové technologie jsou velmi kvalitní díly při reprodukovatelnosti výroby [6,12].

Technologie navíjení

Technologie spočívá v navíjení pramenců vláken, které jsou předem naimpregnovány pryskyřicí nebo jsou přímo prosyceny ve vaničce s pryskyřicí před navinutím na rotační trn. Vlákna jsou navíjena na navíjecí rotační trn či jádro podle určitého předem připraveného vzoru. Po vytvrzení musí být celé jádro vytaženo na speciálních přístrojích s velkou odtahovou silou [6,10]. Touto technologií se nejčastěji vyrábějí duté součástky, jako např. nádrže, roury, nosníky či různé hřídele. Navíjení se vyznačuje především vysokou přesností a reprodukovatelností [4,6].

Technologie RTM

RTM (resin transfer molding) neboli injekční vstřikování je technologie určena pro středně velké sériové výroby [6]. Tato technologie spočívá v tom, že se nejprve do uzavřené formy vloží výztuž. Výztuž může být v podobě skleněných tkanin či rohoží. Následně se pryskyřicí s nízkou viskozitou prosycuje výztuž za pomoci tlaku. Navíc se využívá vakua, které dopomáhá k lepšímu prosycení výztuže a tím i kvalitnějšímu výslednému dílu [6,10]. Vakuum pomáhá též k tomu, aby po prosycení nevznikaly nežádoucí vzduchové bubliny. Při použití forem, které mohou být vytápěné, se výrazně sníží celkový čas na výrobu. Pomocí RTM lze vyrábět složité a přesné výrobky s velkou reprodukovatelností výroby [4,6].

Technologie pultruze (tažení)

Při této metodě se do pultruzního stroje namotávají nejčastěji rovingy, které jsou prosyceny pryskyřicí [6]. Rovingy, popř. rohože či tkaniny jsou taženy, vytvarovány a vyprofilovány na požadovaný tvar, následně jsou díky vysoké teplotě vytvrzeny. Dotvrzování samotného profilu probíhá v tzv. vytvrzovací komoře. Pro doformátování celého profilu je nutné pultruzní stoj dovybavit ještě odtahovým a řezacím zařízením. Pultruze je vhodná na výrobu různých profilů s plným, dutým či jinak různě tvarovaným průřezem. Jejich nevýhodou je dražší provoz [1,4,6].

Ruční laminace

Ruční laminace neboli ruční kladení je jedna z nejjednodušších a nejpoužívanějších metod při malosériové výrobě [6]. Postup začíná nanesením vrstvy separátoru na povrch formy, na kterou se pak nanese tzv. gelcoat, což je vrstvička o tloušťce cca 0,5 mm a plní ochrannou funkci samotného povrchu. Následně se na gelcoat klade výztuž, nejčastěji ve formě tkanin či rohoží, která se za pomoci válečku, štětce či stěrky prosycuje pryskyřicí [6,13]. Po prosycení se musí dbát na to, aby nevznikaly nežádoucí vzduchové bubliny, které by se mohly projevit ve výsledném výrobku zhoršením mechanických vlastností. Nakonec se jen nechá celý výrobek vytvrdit. Kvalita této technologie se samozřejmě odvíjí od šikovnosti a zkušenosti pracovníka, který tento proces provádí. Největší výhodou ruční laminace je jednoduchost a cenová dostupnost [4,6,13].

Technologie SMC

SMC (sheet molding compound) technologie je určena převážně pro hromadnou výrobu kompozitních materiálů [6]. Tato technologie je založena na použití reaktoplastických pryskyřic, převážně pak polyesterových, které mají rychlé vytvrzovací vlastnosti, a na použití sekaných skelných vláken. Skelná vlákna jsou nasekána v sekacím zařízení zpravidla na délku 25 nebo 50 mm [1,6]. Poté jsou vlákna rovnoměrně nanášena na fólii, na jejímž povrchu je nanесena vrstva pryskyřice a plniva. Nakonec se ještě horní část pokryje druhou fólií, obsahující také vrstvu pryskyřice a plniva. Takto zhotovený plát neboli SMC prepreg, prochází přes prosycovací válečky, kde dochází k prosycení vláken. Po prosycení vláken dochází pomocí navíjecího zařízení k namotání samotného prepregu na cívku. Ke konečnému formování výsledného tvaru a vytvrzení výrobku dochází ve vyhřátých ocelových formách v hydraulických lisech. Výhodou SMC technologie je velká variabilita výsledných produktů, výborná mechanická vlastnost a vysoká kvalita povrchů. [6,14]

2 Metody pro hodnocení vlastností kompozitních materiálů

Pro hodnocení vlastností kompozitních materiálů slouží různé diagnostické metody, kdy v průběhu jejich měření posuzujeme vliv dané zkoušky na měřený materiál. V této kapitole budou dále detailněji popsány vybrané experimentální metody, které slouží k charakterizaci materiálu, a tím nám pomáhají k určení vhodnosti použitého materiálu na konkrétní aplikaci. Na základě naměřených dat můžeme také určit vhodného dodavatele, kterého dále vybíráme dle dodávaných vlastností či nabídnuté ceny pro daný materiál a jednotlivá data můžeme mezi sebou porovnávat. Přestože existuje celá řada diagnostických metod, které je možno použít pro hodnocení materiálů v elektrotechnice, v souladu se zadáním práce bude pozornost zaměřena na vybrané zástupce mechanických, fyzikálních a tepelných vlastností jednotlivých vzorků kompozitních materiálů.

Správný výběr materiálu je pro každý produkt velice důležitý, protože vlastnosti zvoleného materiálu určují vlastnosti finálního výrobku. Mechanické vlastnosti představují důležitou charakteristiku obzvláště u konstrukčních materiálů, kde je nezbytná určitá pevnost a životnost. Z hlediska elektrotechnických aplikací se jedná např. o desky plošných spojů, izolátory vysokého napětí, kompozitní konzole či různá elektrická zařízení [6]. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů hodnotíme pomocí mechanických zkoušek. Z hlediska fyzikálních vlastností je často využívanou vlastností zejména hustota, která může sloužit např. ke zjištění množství přidaných anorganických látek (skleněná vlákna) nebo ke zjištění kvality gumárenské směsi [15]. Při použití materiálů v elektrotechnických aplikacích se dá mnohdy očekávat i působení vyšších teplot, je proto vhodné určovat též tepelné vlastnosti, např. pomocí termických analýz. Tepelné vlastnosti je důležité sledovat i z pohledu strukturních změn materiálu, tedy mechanických vlastností [2,6,15].

2.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti jsou ve většině případů nejdůležitějším hlediskem při volbě materiálů či výrobku, a to především z důvodu, že téměř každá aplikace vyžaduje, aby odolávala určitému mechanickému namáhání [6]. Při mechanickém namáhání má největší vliv na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů hlavně vytvrzení matrice, rozložení vláken či plniva a orientace vláken. Další vliv na jeho vlastnosti může mít teplota, doba

zatížení nebo samotné podmínky prostředí, jako například vlhkost vzduchu nebo UV záření [6,16].

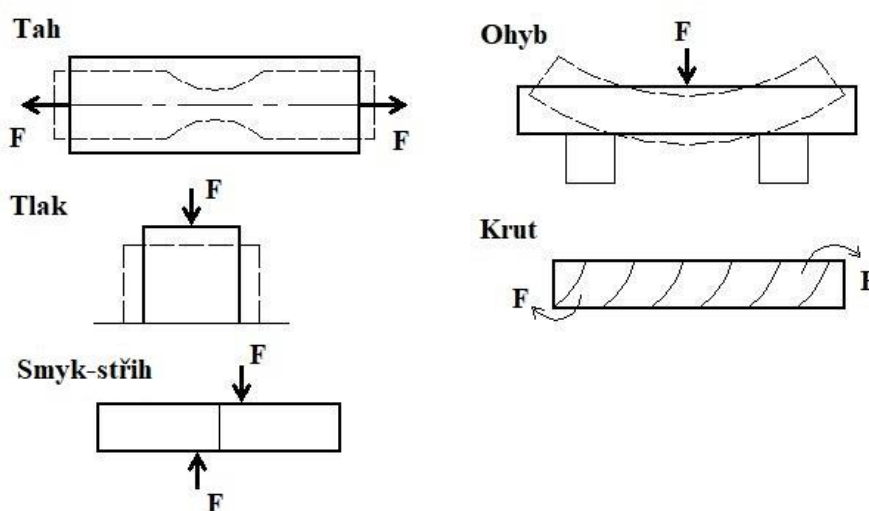
Pro posouzení mechanických vlastností kompozitních materiálů používáme mechanické zkoušky. Tyto zkoušky jsou z hlediska kvality kompozitního materiálu jedny z nejdůležitějších [2]. Mechanické vlastnosti vyjadřují deformaci daného materiálu a také podmínky pro vznik nalomení vlivem působení vnějších mechanických sil. Mechanické vlastnosti se obvykle provádějí na zkušebních vzorcích kompozitního materiálu s tím, že vzorek má totožné vlastnosti jako materiál výrobku, který zjišťujeme [2,6]. Zkoušky se provádějí na principu, že v daném vzorku či příslušném materiálu vznikne určité napětí, které je zvyšováno až do té doby, než dochází k porušení nebo nalomení vzorku. Takto jsou získány předpoklady, které poté slouží k ověření mechanických vlastností materiálu. Mechanické zkoušky jsou dány normami a každá zkouška má přesně dané postupy [2,3,6].

Mechanické zkoušky dělíme[2,3,15]:

- 1) dle časového hlediska:
 - krátkodobé,
 - dlouhodobé,
- 2) dle charakteru působící síly:
 - statické,
 - dynamické,
 - únavové (cyklické),
- 3) dle druhu působícího namáhání:
 - tahem,
 - tlakem,
 - krutem,
 - stříhem,
 - ohybem.

U krátkodobých zkoušek netrvá celý proces zkoušky měření více než několik minut a výsledný údaj bývá pouze pro informativní účely. Používají se ke kontrole samotných vlastností a porovnávání jednotlivých výsledků z měření různých vzorků. U dlouhodobých zkoušek slouží výsledné údaje především pro účely konstrukce a mají tak daleko větší praktické využití. Při statických zkouškách je daný vzorek kompozitního materiálu

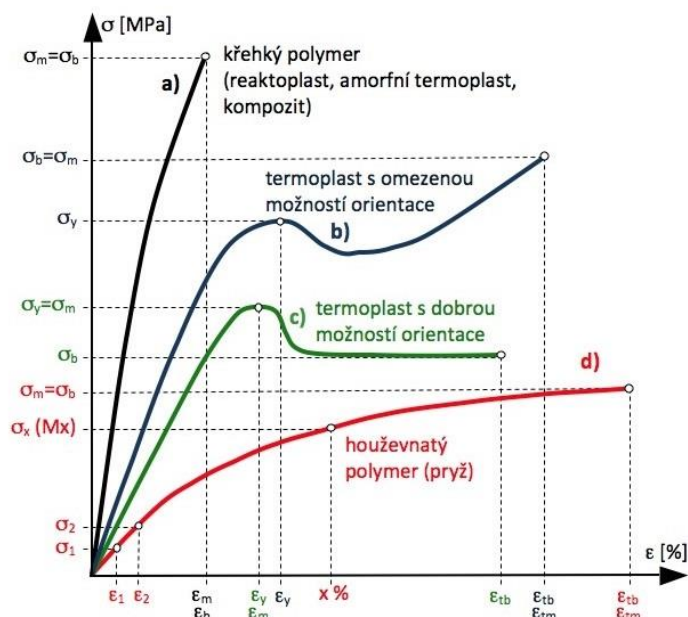
zatěžován určitou, pomalu narůstající silou až na trvale ustálenou hodnotu [3,15]. Mezi statické zkoušky řadíme: zkoušky tahem, tlakem, krutem, stříhem a ohybem. Naproti tomu u dynamických zkoušek, síla, která působí na daný vzorek kompozitního materiálu, vzrůstá velmi rychle a během velmi krátkého okamžiku dosahuje svého maxima [6,15]. Mezi dynamické zkoušky řadíme např. zkoušky rázové. U únavových zkoušek síla může buď vzrůstat, popř. klesat nebo měnit svoji velikost. Během statických i dynamických zkoušek pevnosti kompozitních materiálů může dojít k lokálnímu poškození různého typu a tato poškození způsobí narušení jednotlivých nosných vláken. Poté dojde k celkovému narušení nebo zlomení daného materiálu [6,15].



Obr.2.1 Druhy mechanického namáhání (převzato z [17])

2.1.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří mezi nejpoužívanější a nejrozšířenější zkoušky mechanických vlastností kompozitních materiálů. Průběh této zkoušky lze zobrazit pomocí deformační křivky, která popisuje průběh deformování (poměrné prodloužení ϵ) vzorku v závislosti na normálovém napětí (σ) [15]. Na obrázku 2.2 lze vidět typickou deformační křivku pro různé materiály. Principem tahové zkoušky je, že zkušební vzorek je uchycen do čelistí zkušebního stroje. Na zkušební vzorek působí síly v jedné ose konstantní rychlostí směrem od sebe, a to až do určitého tahového zatížení, kdy dojde k deformaci samotného vzorku. Při zkoušce se sleduje síla, resp. zatěžující napětí působící na vzorek v závislosti na poměrném prodloužení vzorku. Zkouška tahem je popsána normou ČSN EN ISO 527-1 [3,15,18].



Obr.2.2 Deformační křivka materiálů (převzato z [15])

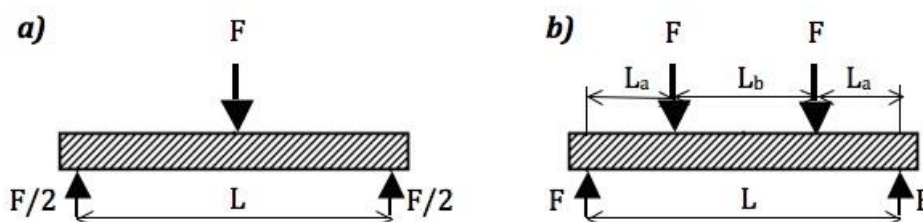
Pomocí deformační křivky můžeme vyhodnotit řadu hodnot, jako například mez pevnosti (σ_m), napětí na mezi kluzu (σ_y), napětí při přetržení (σ_b), mez úměrnosti, mez pružnosti, modul pružnosti či deformace (poměrné prodloužení vzorku) [15].

Mez pevnosti je maximální hodnota napětí, při které je ještě zkoušený vzorek neporušen, tzn., že není narušena jeho struktura. Napětí na mezi kluzu je napětí, kdy se vzorek plasticky deformuje. Napětí při přetržení je takové napětí, kdy dochází k úplné deformaci vzorku [3,15]. U kompozitních materiálů je napětí při přetržení totožné s mezí pevnosti. Mez úměrnosti je hodnota napětí, kdy se zkušební vzorek chová pružně, tedy po ukončení působení sil se vzorek vrátí do původního stavu, platí tedy Hookův zákon. Mez pružnosti je mezní hodnota napětí, kdy deformace je ještě vratná. Po dosažení této hodnoty napětí dochází k plastické deformaci. Modul pružnosti značí tuhost zkušebního vzorku a stanovuje se pro tu část, kdy platí Hookův zákon [3,15,18].

2.1.2 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem spočívá ve stanovení mechanických vlastností vzorku, který je namáhán silou působící kolmo na jeho podélnou osu. Nejčastěji používanými jsou zkoušky tříbodovým a čtyřbodovým ohybem [3], jak je vidět na obrázku 2.3. Při tříbodovém ohybu je vzorek položen na dvě podpěry, které jsou od sebe vzdáleny v délce L a síla působí na daný vzorek uprostřed těchto podpěr. Kdežto u čtyřbodového ohybu je vzorek namáhán

dvěma stejně velkými silami, které jsou v určité vzdálenosti od podpěr [15,18]. Výsledkem těchto zkoušek je pevnost v ohybu a poměrný průhyb při deformaci vzorku. Tyto zkoušky jsou důležité pro zjištění namáhání určitého materiálu v ohybu, což je nezbytné např. pro střešní konstrukce či různé nosníky. Ohybové zkoušky slouží pro výběr správného materiálu a ke kontrole kvality vzorku daného kompozitního materiálu. Zkouška ohybem je popsána normou ČSN EN ISO 178 [15,16].

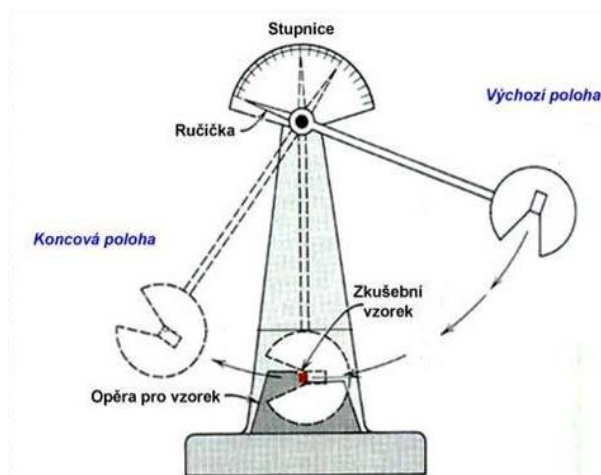


Obr.2.3 Zatěžování vzorku ohybem, a) třibodový ohyb, b) čtyřbodový ohyb (převzato z [15])

2.1.3 Zkouška rázová

Zkouška rázová se používá především pro stanovení deformační práce, tedy energie potřebné k přeražení či narušení zkušební vzorku. Rázová zkouška probíhá náraz, tzn., že dostatečně velká energie jedním rázem přerazí zkušební vzorek. Při rázu zjišťujeme křehkost a houževnatost vzorku [18]. Rázové zkoušky mohou probíhat několika metodami, například tahem, tlakem, smykem, krutem či ohybem. Nejvhodnější a nejčastější je rázová zkouška v ohybu, při které lze nejlépe zjistit dané vlastnosti. Nedílnou součástí této zkoušky je tzv. Charpyho kladivo, které lze vidět na obrázku 2.4.

Charpyho kladivo slouží jako měřicí zařízení, pomocí kterého určíme konečnou hodnotu energie, která samotný vzorek přerazí [3]. Princip zkoušky spočívá v tom, že kyvadlové rameno s těžkým kladivem je umístěno a zajištěno do výchozí polohy. Poté se na opěry, které jsou v nejnižší možné dráze kladiva, umístí zkoušený vzorek. Následně je kladivo uvolněno z výchozí polohy a kinetickou energií přerazí samotný vzorek [3,18]. Po přeražení vzorku kladivo kývne do koncové polohy, která je však nižší než poloha výchozí, a to z toho důvodu, že na přeražení vzorku byla spotřebovaná určitá energie. Výsledná kinetická energie potřebná na přeražení vzorku je rozdíl energií ve výchozí a koncové poloze. Rázová zkouška pomocí Charpyho kladiva je popsána v normě ČSN EN ISO 179-1 [18,20].

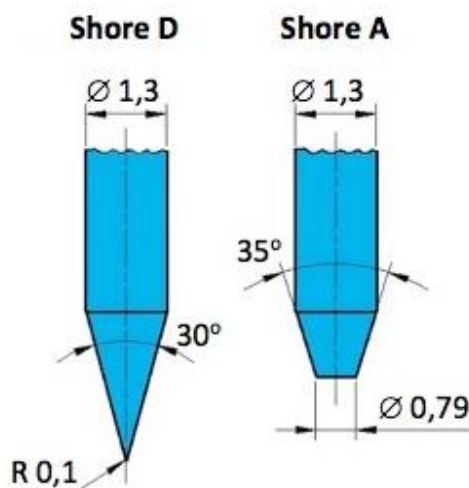


Obr.2.4 Charpyho kladivo (upraveno z [18])

2.1.4 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti neboli měření tvrdosti, je dalším druhem mechanických vlastností. Samotná tvrdost je definována jako odolnost povrchu proti vniknutí cizího předmětu. Tyto zkoušky jsou velmi často používané, a to zejména pro svoji jednoduchost a rychlost provedení. Pomocí těchto zkoušek můžeme také posoudit pevnost a tvárnost zkoušeného vzorku s tím, že samotný vzorek není v podstatě téměř porušen. Zkoušky tvrdosti lze dělit dle použité metody na vrypové, odrazové a vnikací [18,19]. Nejpoužívanějšími jsou zkoušky vnikací, jejichž princip spočívá v tom, že se do povrchu zkoušeného vzorku stlačuje určitou silou tělísko (indentor) kuličkového, kuželového nebo jehlanového tvaru, které musí být z velmi tvrdého materiálu, např. diamant. Na základě velikosti a tvaru vtisku, který zanechal indentor, je posouzena tvrdost zkoušeného vzorku [15,19]. Naproti tomu u odrazových zkoušek se z určité výšky pustí na vzorek závaží, které má daný tvar, hmotnost a následně se zkoumá výška odrazu. Dále pak lze zkoušky tvrdosti dělit na statické a dynamické z hlediska působení zátěžné síly. U statických zkoušek se většinou jedná o metodu vnikací, a u dynamických o metodu odrazovou [15,18,19].

V současné době existuje celá řada metod pro posouzení tvrdosti materiálu, např.: Brinellova, Rockwella, Vickersova nebo Shoreho metoda, ta také bude obsahem měření v praktické části této práce. Princip této metody spočívá ve vtlačení hrotu tvrdoměru do zkoušeného vzorku, kdy zjišťujeme výšku jeho odskoku. Jedná se tak o zkoušku tvrdosti odrazem [15,19]. Rozeznáváme několik druhů Shoreho metody podle použitého typu tvrdoměru a podle typu zkoušeného vzorku. V našem případě použijeme tvrdoměr typu A (Shore A) používaný pro měkčí materiály a tvrdoměr typu D (Shore D) používaný pro tvrdší materiály [15]. Tvar a velikost samotných hrotů metody lze vidět na obrázku 2.5.



Obr.2.5 Shoreho metoda typu D a typu A (převzato z [15])

2.2 Fyzikální vlastnosti

K fyzikálním vlastnostem patří zejména hustota, ale také vlhkost, teplota tání a tuhnutí, délková a objemová roztažnost, tepelná nebo elektrická vodivost [5,20].

2.2.1 Hustota

Obecně je hustota definována jako poměr hmotnosti (m) a objemu (V) za určité teploty. Samotná zkouška nebo měření probíhá za pomoci vah, kdy přímo zkušební vzorek zvážíme, a tím dostaneme hmotnost (m) [20]. Objem získáme tím, že změříme rozměry daného vzorku a objem dopočítáme. To však lze jen v případě, že daný vzorek je jednoduchých tvarů, a to především z důvodu přesnosti měření. Jednotlivé rozměry měříme pomocí posuvného měřítka nebo mikrometru, a to nejméně pětkrát na různých místech, abychom dosáhli co nejpřesnějších rozměrů [21]. Tento postup měření je jeden ze způsobů, jak zjistit hustotu materiálu.

Další ze způsobů měření hustoty je hydrostatická metoda, která bude zároveň použita v praktické části práce. Tato metoda probíhá za pomoci vah a spočívá ve zvážení vzorku, jehož hustotu chceme zjistit. V prvním kroku se provádí měření vzorku na vzduchu (m_1) a poté měření vzorku v tekutině (m_2), jejíž hustotu známe. Hustota této tekutiny je předem známa (ρ_1) a lze tedy vypočítat výslednou hustotu (ρ) daného vzorku pomocí vzorce [21]:

$$\rho = \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} * \rho_1 \text{ [g/cm}^3\text{]}. \quad (1)$$

2.3 Tepelné vlastnosti

Zkoumání tepelných vlastností je pro elektrotechnické aplikace velice důležité, protože zde bývá častý výskyt vysokých teplot, a je proto nezbytné vědět, jak se který materiál bude při dané teplotě chovat [15]. Materiál pro konkrétní aplikaci musí být vždy vhodně zvolen s ohledem na mechanické namáhání, spolehlivost při zvýšených teplotách a mj. i elektrických vlastností. Jako vhodný materiál pro zkoumání jednotlivých vlastností, popisovaných v této kapitole, můžeme zmínit plasty, které lze dělit dle struktury na amorfnní, semikrystalické a krystalické. U amorfnních plastů je limitujícím parametrem teplota skelného přechodu, která zároveň určuje další použití materiálu. Na rozdíl u krystalických a semikrystalických termoplastů, které lze provozovat i za teplotou skelného přechodu s určitým omezením vlastností. Limitujícím parametrem je teplota tavení [15,25].

Tepelných vlastností je celá řada, proto budou zkoumány ty nejdůležitější z pohledu kompozitních materiálů, poněvadž jejich vlastnosti jsou značně teplotně závislé [15,22]. Tepelné vlastnosti jsou sledovány pomocí termické analýzy, což je skupina metod, které umožňují analyzovat složení a vlastnosti zkušební vzorku v závislosti na teplotě a času [23]. Termické analýzy se provádí na různých měřících přístrojích v závislosti na použité metodě. Pomocí těchto přístrojů můžeme na jednotlivých vzorcích analyzovat např. tepelný tok, tepelnou kapacitu, teplotu skelného přechodu, změnu hmotnosti vzorku, teplotu dekompozice, uvolňování či pohlcování tepla, změny rozměrů vzorku atd. V průběhu měření může docházet např. ke krystalizaci, tavení, oxidaci, sublimaci či polymeraci [23,24].

Rozeznáváme dva druhy termické analýzy, a to statické a dynamické metody. U statických metod probíhá měření za konstantní teploty v závislosti na čase, kdežto u dynamických dochází k ochlazování nebo zahřívání vzorku podle určitého programu, který je předem nastaven [23]. V současné době existuje řada různých metod, mezi nejpoužívanější patří diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), termogravimetrická analýza (TGA), simultánní termická analýza (STA), dynamická mechanická analýza (DMA) a termomechanická analýza (TMA) [23,24].

2.3.1 Teplota skelného přechodu

Teplota skelného přechodu neboli teplota zesklenní je oblast, ve které polymery přechází ze stavu sklovitého do stavu kaučkovitého, tedy mezi stavy, kdy materiál

přechází z tvrdého a křehkého stavu až do stavu elastického [6,15]. Při této teplotě dochází ke změně vlastností materiálu, jako například pevnost či tvárnost. Rozmezí skelné transformace se pro různé materiály může lišit. Teplotu skelného přechodu stanovíme pomocí metod termické analýzy, např. DSC, DMA, TMA nebo STA [6,15,22].

2.3.2 Teplota dekompozice

Teplota dekompozice představuje teplotu, při které dochází k rozkladu materiálu působením zvýšené teploty. Takový rozklad znamená pro daný materiál nevratnou změnu struktury a jeho vlastností, zejména pak úbytek hmotnosti. Teplotu dekompozice lze určit prostřednictvím TGA či STA [15,26].

2.3.3 Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost je velmi důležitá vlastnost při sledování strukturních změn, zejména pak u konstrukčních materiálů. Vlivem vyšších teplot dochází k rozměrovým a objemovým změnám, které jsou charakterizovány koeficientem teplotní délkové roztažnosti α a koeficientem teplotní objemové roztažnosti β [15]. Teplotní roztažnost závisí na několika faktorech, např. na druhu kompozitního materiálu, jeho struktuře, typu či přídavku plniv (skleněná vlákna, která mají malou teplotní roztažnost). Teplotní roztažnost lze zjistit pomocí TMA [15,27].

2.3.4 Teplota tavení

Teplota tavení je typická zejména pro krystalické a semikrystalické termoplasty, které v oblasti této teploty přechází z pevného stavu látky do kapalného stavu a zcela tak vymizí krystalická struktura [15]. Tuto teplotu lze považovat za horní mez používání samotných termoplastů. Teplota tavení je pro většinu látek (termoplastických polymerních látek) definována, ale přesně stanovit ji můžeme pomocí DSC, TMA nebo DMA [15,28].

2.3.5 Teplota krystalizace

Krystalizace je děj, při kterém dochází k vylučování pevné látky z polymerní taveniny a vzniku malých krystalických útvarů, děje se tak pouze u krystalických a semikrystalických termoplastů [15]. Teplota krystalizace je pro polymery velice důležitá, protože ovlivňuje jejich fyzikální a také chemické vlastnosti. Při ohřevu začíná proces krystalizace za teplotou skelného přechodu a může končit až u teploty tavení. Samotná rychlost krystalizace je v blízkosti teplot tavení velmi malá a zvyšuje se až při výraznějším snížení teploty. Teplotu krystalizace stanovíme prostřednictvím DSC nebo TMA [18,29].

3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na analýzu dvou typů kompozitního materiálu. Prvním materiálem je Relanex, jehož složení je skleněná tkanina, slídový papír a epoxidová pryskyřice. Druhým je Remikakit, který je složen pouze ze slídového papíru a epoxidové pryskyřice. Cílem experimentu bylo otestovat jednotlivé vzorky kompozitního materiálu a především změřit jejich mechanické, fyzikální a tepelné vlastnosti za pomoci vybraných zkoušek.

Celému měření předcházela příprava samotných vzorků desek, které byly lisovány z dostupných vzorků prepregu s ohledem na možnosti laboratorního lisu. Z vylisovaných desek byly nařezány vzorky pro měření vybraných metod vždy dle potřeb a požadavků stanovených na základě studia norem. Následně bylo provedeno na těchto vzorcích měření vybranými metodami. Ze zástupců mechanických zkoušek byla vybrána měření v tahu, v ohybu, rázové houževnatosti, tvrdosti a dále jako zástupce fyzikálních vlastností, měření hustoty. Teplotní stabilita a chování materiálu za zvýšených teplot byly hodnoceny termickými analýzami. Veškerá měření probíhala v laboratořích za pomoci náležitých pomůcek a přístrojů k těmto zkouškám určeným.

3.1 Testované materiály

Relanex (REL)

Relanex 45.033 S je izolační materiál, který je za pokojové teploty velmi ohebný a za zvýšené teploty lepkavý. Materiál je vyroben ze skleněné tkaniny, nekalcinovaného slídového papíru Remika (muskovit) a jako pojivo je použita epoxidová pryskyřice. Relanex je vytvrzován v lisu při teplotě cca 165 °C do formy desek [30]. Materiál je používán pro izolaci cívek a tyčí vinutí elektrických točivých strojů, které pracují s provozním napětím do 24 kV a v podmínkách tepelné izolační třídy 155 °C [30,31].

Remikakit (RTK)

Remikakit 35.004 je izolační materiál, pružný při pokojových teplotách a lepkavý při zvýšených teplotách. Je vyroben ze slídového papíru Remika (muskovit), který je spojen epoxidovou pryskyřicí. Remikakit je vytvrzován v lisu při teplotě cca 165 °C do formy desek [30]. Je vhodný pro izolaci středních a velkých vysokonapěťových elektrických strojů pracujících v podmínkách tepelné izolační třídy 155 °C [30,31].

Oba testované materiály jsou podrobněji popsány v Datasheetu (viz příloha 1).

3.2 Příprava vzorků

Před samotným lisováním bylo nutné vyndat desky prepregu z lednice, a to den před lisováním z důvodu vyrovnání teplot a také, aby nedošlo ke srážení vlhkosti. Tyto prepregy byly již předem nastříhány z navinuté role na rozměry 23x23 cm. Před lisováním byla připravena teflonová folie a důkladně očištěna lihem, aby se zbavilo nečistot a nedošlo tak k následnému poškození vzorků. Teflonová folie byla velice důležitá a sloužila k tomu, aby se vzorky nepřipékaly na plotny laboratorního lisu. Celý vzorek byl vytvořen tím, že byly navrstveny 4 prepregy na sebe a následně pomocí ručního válečku byly vrstvy stlačeny k sobě. Poté byla teflonová folie s připravenými vzorky vložena do lisu a do každého rohu vzorku umístěn distanční plíšek, který vymezil výslednou tloušťku samotné vzorku kompozitu, tedy 0,5 mm. Tento plíšek byl důkladně zbaven pryskyřice a ostrých hran, aby nedošlo k proříznutí teflonové fólie. Pokud byly lisovány dvě desky najednou, což byl přesně náš případ, tak byla mezi dvě teflonové folie vložena kovová deska. Potom byly opět vloženy folie se vzorkem a do každého rohu pak distanční plíšek. V posledním kroku byl natlakován lis tak, aby došlo k počátečnímu kontaktu horní a dolní elektricky vyhřívané plotýnky lisu a teflonové folie, následně bylo zapnuto jejich vyhřívání. Byl nastaven přednastavený teplotní program, kterým byly plotýnky ohřány na 100 °C, tento přehřev trval cca 10 minut. Na konci tohoto časového intervalu bylo nutno dotlakovat lis na požadovaný tlak 60 kPa a následovalo hlavní vytvrzení při teplotě 165 °C po dobu tří hodin. V průběhu vytvrzování bylo nutné občas lis zkontrolovat, jestli tlak výrazně nepoklesl a popř. lis dotlakovat. Po celém procesu vytvrzování byly vzorky ponechány v lisu až do úplného vychladnutí, které probíhalo samovolně do následujícího dne, kdy byl lis vypnut a samotné vzorky opatrně z lisu vyjmuty.

Grafické zobrazení postupu přípravy vzorků desky lze vidět na obrázku 3.1.



Obr.3.1 Postup přípravy vzorků desky

Laboratorní lis

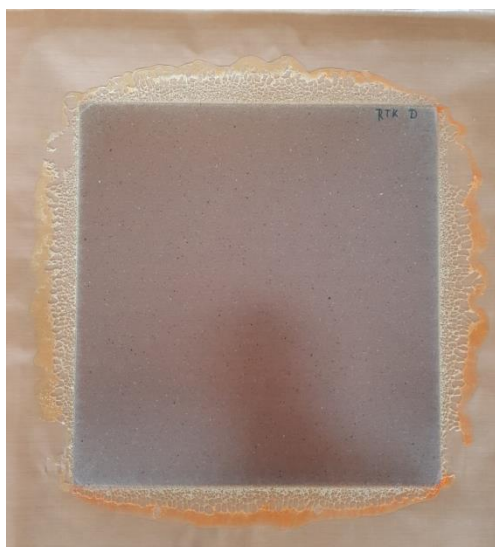
Tabulka 3.1: Základní technické parametry laboratorního lisu

Název	Laboratorní lis Carver Laboratory Press, model 2518
Regulátor	EZ-ZONE PM PID PM9B1CJ-AAAAAAA
Plotny	2x s topným tělesem 2 kW
Napětí	400 V
Tlak při ohřevu na 100 °C	40 kPa
Tlak při ohřevu na 165 °C	60 kPa



Obr.3.2 Laboratorní lis

Po vyndání vzorků z laboratorního lisu byla očištěna a odstraněna vyteklá pryskyřice z okrajů vytvrzených desek. Na obrázku 3.3 lze vidět vyteklou pryskyřici po lisování vzorku a distanční plíšky, které byly obaleny zaschlou pryskyřicí.



Obr.3.3 Vyteklá pryskyřice na teflonové fólii (vlevo) a distanční plíšky se zbytky pryskyřice (vpravo)

Obroušení distančních plíšků pro použití na přípravu dalších vzorků bylo provedeno na ruční brusce, která byla upevněna v malém svěráku pro lepší stabilizaci a snadnější broušení. Tloušťka plíšků byla kontrolována digitálním mikrometrem vždy po každém lisování, jestli nebyla náhodou tímto procesem změněna.

Po vyjmutí obou desek z lisu a důkladném očištění přišlo na řadu další lisování. To probíhalo stejným způsobem jako při postupu uvedeném výše. Vždy byly lisovány dva vzorky a to z důvodu, aby byla naplněna kapacita laboratorního lisu. Nejprve byly lisovány 4 vzorky Relanexu a poté 4 vzorky Remikakitu. Dohromady tedy bylo lisováno 8 vzorků desek o celkových rozměrech 23x23 cm, z nichž byly dále připraveny vzorky na jednotlivé zkoušky. Na těchto deskách byly poté odměřeny přesné rozměry výsledného vzorku (20x20 cm) tak, aby mohly být odříznuty kraje z původního rozměru, u kterých došlo k vytečení pryskyřice a nemusela tak být zachována konstantní tloušťka vzorku v celé ploše. Tento obrys byl poté vyříznut pomocí kotoučové pily, čímž byl získán vzorek s konečnými rozměry, na který byly následně nakresleny jednotlivé vzorky pro mechanické zkoušky, měření hustoty a měření tepelných vlastností pomocí termických analýz.

Na obrázku 3.4 lze vidět značení vzorků pro jednotlivá měření.

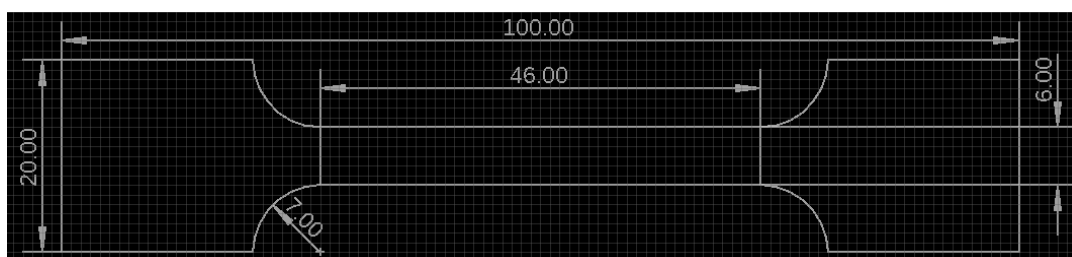
1.Charpy 80x10 mm	1.Tah 100x20 mm			
2.Charpy 80x10 mm	2.Tah 100x20 mm			
3.Charpy 80x10 mm	3.Tah 100x20 mm			
4.Charpy 80x10 mm	4.Tah 100x20 mm			
5.Charpy 80x10 mm	5.Tah 100x20 mm			
6.Charpy 80x10 mm	6.Tah 100x20 mm			
7.Charpy 80x10 mm	7.Tah 100x20 mm			
8.Charpy 80x10 mm	8.Tah 100x20 mm			
9.Charpy 80x10 mm				
1.Ohyb 80x10 mm				
2.Ohyb 80x10 mm				
3.Ohyb 80x10 mm				
4.Ohyb 80x10 mm				
5.Ohyb 80x10 mm				
6.Ohyb 80x10 mm				
7.Ohyb 80x10 mm				
8.Ohyb 80x10 mm				
9.Ohyb 80x10 mm				
				Hustota
	Tvrdość 30x30 mm	Tvrdość 30x30 mm	Tvrdość 30x30 mm	Hustota
TMA 0,7x0,7	DMA 60x13 mm			

Obr.3.4 Značení vzorků pro jednotlivá měření (vyrobena z desky 20x20 cm)

Takto označené vzorky platí pro všech 8 připravených desek o rozměrech 20x20 cm. Tedy z jedné desky bylo připraveno 9 ks vzorků pro zkoušku rázové houževnatosti (Charpy), 9 ks pro zkoušku tříbodového ohybu, 8 ks pro zkoušku tahem,

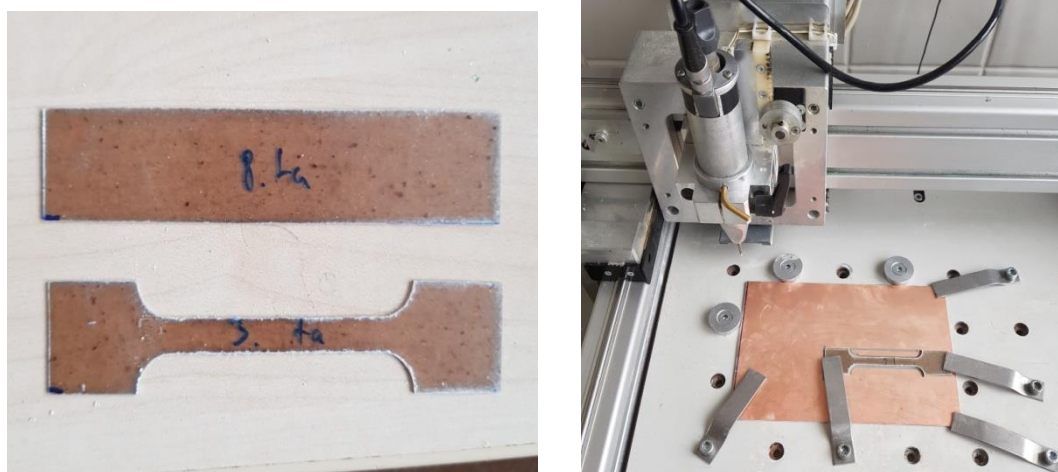
3 ks pro zkoušku tvrdosti metodou Shore A a Shore D, 2 ks pro měření hustoty a po 1 ks pro měření termických analýz pro DMA a TMA. Zelená část značí zbytek, který z desky zbyl. Tento zbytek byl použit pro další termické analýzy a to DSC, STA, kde není přesně definovaný rozměr a stačí pouze malý vzorek (řádově miligramy), který se však musel vejít do kalíšku, ve kterém byl umístěn v průběhu zkoušky.

Pro tahovou zkoušku musely být vzorky ještě upraveny a to především tak, že výsledný tvar je určen normou ČSN ISO 527-1. Proto byl pomocí programu Eagle nakreslen tvar vzorku, odpovídající uvedené normě. Na obrázku 3.5 lze vidět tvar s kótami výsledného vzorku pro tahovou zkoušku.



Obr.3.5 Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku

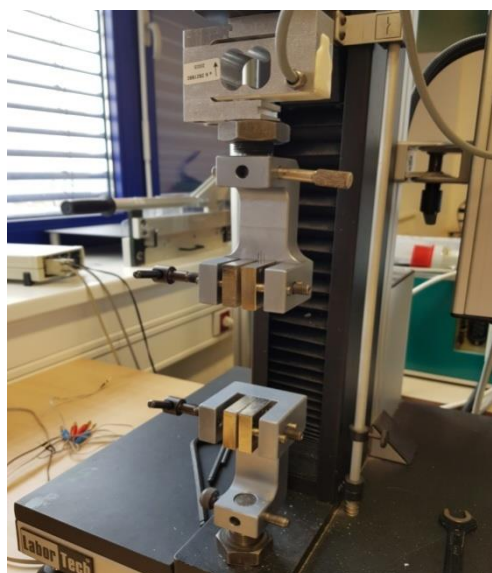
Obrázek byl vyexportován a nahrán do programu, který obsluhuje frézování. V prvním kroku byl vyfrézován obrys na destičku, aby bylo vidět, kam vzorek před frézováním položit. Potom vzorek musel být pevně ukotven, aby při frézování nebyl posunut. Následně byl spuštěn program, který podle definovaného tvaru objel obrys výřezů a vznikl z něho konečný tvar pro tahovou zkoušku. Nakonec stačilo ze vzorku odstranit zbytky po frézování. Vyřiznutý tvar s frézku lze vidět na obrázku 3.6.



Obr.3.6 Výsledný tvar vzorku (vlevo) a pracoviště s frézku (vpravo)

3.3 Popis metody měření zkoušky tahem

Celá zkouška probíhala na trhacím stroji LaborTech s maximálním zatížením 3 kN a příkonem 12 VA. Rychlost průběhu zkoušky, tedy oddalujících čelistí, byla 10 mm/min a vzdálenost čelistí byla s ohledem na rozměr vzorků cca 80 mm. Před spuštěním zkoušky bylo zapotřebí změřit vzorek a jeho rozměry vložit do programu. Měřila se tloušťka pomocí digitálního mikrometru a šířka pomocí digitálního posuvného měřítka. Poté byl vzorek pevně uchycen do čelistí trhacího stroje a program spuštěn. Při průběhu zkoušky bylo na vzorek působeno silou oddalujících čelistí, která byla s časem konstantně zvyšována až do přetržení. Z mechanických vlastností byla zaznamenána pevnost v tahu R_m , modul pružnosti v tahu E a maximální dosažená síla F_{max} s tím, že vyhodnocována byla jen R_m a E . Zkouška tahem probíhala za pokojové teploty $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a vlhkosti 33 %. Ukázka trhacího stroje pro zkoušku tahem lze vidět na obrázku 3.7.



Obr.3.7 Trhací stroj LaborTech připravený pro zkoušku tahem

3.4 Popis metody měření zkoušky tříbodovým ohybem

Zkouška tříbodovým ohybem probíhala na trhacím stroji LaborTech, tedy na stejném jako zkouška tahem. Pro tuto zkoušku bylo zapotřebí oproti tahu vyměnit čelisti na trhacím stroji. Rychlost průběhu zkoušky byla 10 mm/min a vzdálenost podpěr činila 50 mm. Před začátkem zkoušky byla změřena a zadána do programu délka, šířka a tloušťka vzorku. Následně se vzorek položil na samotné podpěry a program byl zahájen. Při zkoušce bylo na vzorek působeno silou, která způsobila nevratnou deformaci, která postupně narůstala s časem až do porušení. Z mechanických vlastností byla zaznamenána pevnost v ohybu

R_{m0} , modul pružnosti v ohybu E a maximální dosažená síla F_{max} s tím, že vyhodnocována byla jen R_{m0} a E . Zkouška ohybem probíhala za pokojové teploty $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a vlhkosti 33 %. Ukázku trhacího stroje pro zkoušku tří bodovým ohybem lze vidět na obrázku 3.8.



Obr.3.8 Trhací stroj LaborTech připravený pro zkoušku třibodovým ohybem

3.5 Popis metody měření rázové zkoušky

Měření rázové houževnatosti probíhalo pomocí Charpyho kladiva, které lze vidět na obrázku 3.9. Při měření bylo použito kladivo s maximální energií 1 J. Měření muselo být provedeno na rovném podkladu, kterého bylo dosaženo pomocí vyrovnávacích nožiček a malé vodováhy, která je umístěna na stojanu Charpyho kladiva. Před vlastním měřením byly změřeny rozměry vzorku na 5 různých místech, tedy tloušťka (h) a šířka (b). Poté byl vzorek umístěn mezi čelisti vzdálené 40 mm od sebe a kladivo, jenž bylo upevněné v počáteční poloze, bylo spuštěno směrem dolů po své ose. Následně byla zaznamenána hodnota energie (W), která je potřebná k přeražení vzorku na stupnici Charpyho kladiva. Měření probíhalo při teplotě $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a vlhkosti 33 %.

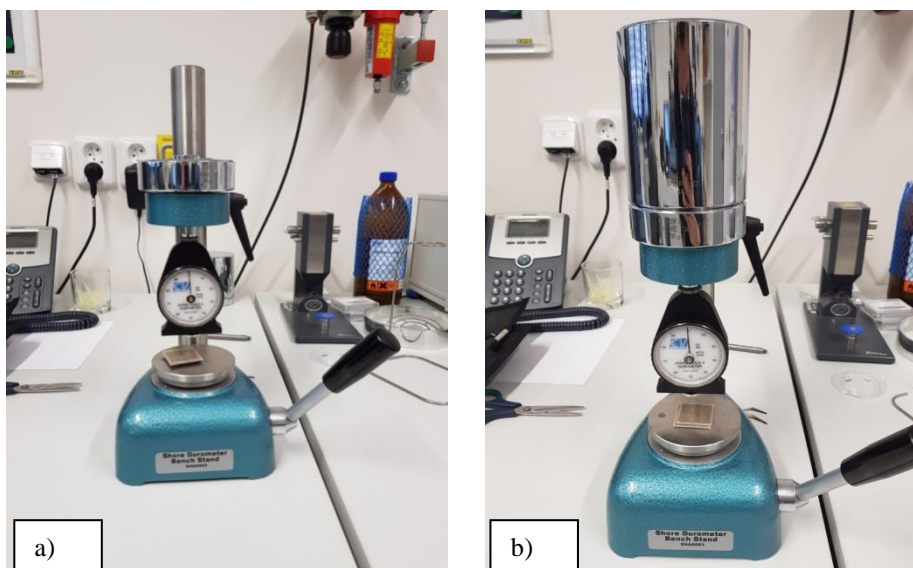


Obr.3.9 Použité Charpyho kladivo

3.6 Popis metody měření tvrdosti

Měření bylo prováděno pomocí durometru a stojanu se stlačovací pákou, přes kterou bylo celé měření obsluhováno. V prvním kroku byl připraven durometr Shore A s tupým hrotem, který byl přišroubován na určené místo ve stojanu. Celý stojan musel být na rovném podkladu, aby měření bylo co možná nejpřesnější. Poté byly připraveny vzorky o rozměrech 30x30 mm. Pro metodu Shore A by tloušťka měřeného vzorku měla být minimálně 6 mm [32]. Z toho důvodu musel být měřený vzorek podložen ještě 11 destičkami (vzorky), protože vzorky určené pro experiment mají výslednou tloušťku zhruba 0,5 mm. K určení hodnot tvrdosti sloužila stlačovací páka, která musela být dostatečnou silou stlačena, aby se plocha hrotu spojila s povrchem vzorku. Samotný údaj tvrdosti byl poté vyobrazen na stupnici s rozsahem od 0 do 100 dílků. Vzorek byl měřen na 8 různých místech. Každé měření bylo dle doporučení provedeno ve vzdálenosti 12 mm od krajů.

Po změření všech vzorků metodou Shore A byly jen přišroubovány durometry a mohlo se měřit metodou Shore D s ostrým hrotem. Pro tuto metodu je doporučováno zatížení stojanu do 5 kg. Proto musel být vložen na horní podložku stojanu kovový válec, jak lze vidět na obrázku 3.10 b. Oproti Shore A je doporučena tloušťka vzorku 3 mm [32]. Proto bylo na sebe naskládáno jen 6 vzorků, stejným způsobem změřena a odečtena výsledná tvrdost ze stupnice tvrdoměru. Obě metody byly měřeny při teplotě 23 °C.



Obr.3.10 Durometr a) Shore A, b) durometr Shore D

3.7 Popis metody měření hustoty

Měření hustoty bylo prováděno pomocí laboratorní váhy Radwag, obsahující sadu pro stanovení hustoty kapalin a pevných látek, kterou lze vidět na obrázku 3.11. Měření probíhalo hydrostatickou metodou. V prvním kroku bylo nastaveno měření hustoty a nadefinování hustoty známé kapaliny. V prvním měření byl použit isopropylalkohol s hustotou $0,786 \text{ g/cm}^3$. Poté již přišlo na řadu samotné měření připravených vzorků. Nejprve byl vzorek změřen ve vzduchu (m_1) na horní váze. Poté byl vzorek změřen v kádince s izopropylalkoholem, tedy bylo provedeno měření vzorku v kapalině (m_2) tak, aby celý vzorek byl zcela ponořen. Na základě těchto dvou změřených hodnot byl proveden váhou automatický výpočet výsledné hustoty vzorku. Kontrolu správnosti výpočtu na základě změřených hmotností je možno provést dle vzorce (1) v kapitole 2.2.1.

Druhé měření hustoty probíhalo obdobně, jen s tím rozdílem, že místo izopropylalkoholu byla použita obyčejná voda. Tudiž v nastavení váhy byla změněna hustota kapaliny z $0,786 \text{ g/cm}^3$ na 1 g/cm^3 . Poté již byl postup úplně stejně jako v prvním měření. Nejprve byla změřena hmotnost vzorku na vzduchu (m_1) a následně hmotnost vzorku ve vodě (m_2). Nakonec byl váhou opět proveden automatický výpočet hustoty. Měření hustoty probíhalo při teplotě $23 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr.3.11 Laboratorní váha Radwag pro měření hustoty

3.8 Popis metod a princip měření pomocí termických analýz

Veškerá měření probíhala v laboratořích budovy RICE na přístrojích od společnosti TA Instruments, které jsou určené pro měření fázových přeměn látek jako funkce teploty, atmosféry nebo času.

3.8.1 Diferenční skenovací kalorimetrie - DSC

DSC je metoda, při níž jsou měřeny tepelné toky ve vzorcích a následně dochází k vyhodnocování tepelných vlastností, např. teploty skelného přechodu, teploty tavení, teploty krystalizace nebo oxidace různých materiálů. [23,33]. Měření probíhá za pomoci dvou kalíšků, kdy jeden kalíšek je zcela prázdný, neprobíhají tam žádné fázové změny, a ve druhém kalíšku je umístěn vzorek kompozitního materiálu. Tyto kalíšky jsou postupně ohřívány nebo ochlazovány podle nastaveného programu a dochází k vyhodnocování rozdílu tepelných toků v jednotlivých nádobách [23,24,33].

Měření probíhalo na přístroji DSC Q2000. Před samotným měřením bylo nutné připravit vzorek. Nejprve byl připraven malý hliníkový kalíšek, do kterého byl vložen vzorek. Kalíšek s víčkem byl zvážen na laboratorní váze Radwag a jeho hmotnost zadána do programu, který obsluhuje přístroj. Poté byl připraven vzorek, který byl vystříhnut pomocí štípacích kleští z části desky, která zbyla tak, aby nedošlo k rozlistování vzorku a tím k odstranění pojiva (zachování homogenity vzorku). Následně byl vzorek vložen do kalíšku, zvážen a jeho hmotnost zadána do programu. Nakonec byl kalíšek hermeticky uzavřen a vložen do přístroje. Byl nastaven teplotní program a spouštěno měření.



Obr.3.12 Přístroj DSC Q2000

3.8.2 Simultánní termická analýza - STA

STA je termická analýza, jež obsahuje kombinaci termogravimetrické analýzy (TGA) a diferenční skenovací kalorimetrie (DSC). Je tedy možné zároveň měřit změny hmotnosti a rozdíly tepelných toků [23,34]. TGA je metodou, při které jsou sledovány změny hmotnosti zkušební vzorku v závislosti na teplotě. Hmotnost vzorku je měřena na přesných mikrováhách při zahřívání či ochlazování a za daných podmínek atmosféry [23,34,35].

Samotné měření bylo prováděno na přístroji SDT Q600. Stejně jako u metody DSC byl vzorek připraven vystřížením ze zbylé části desky v celé jeho tloušťce tak, aby byly zahrnuty všechny složky, ze kterých je materiál složen. Vzorek byl vložen na mikrováhy do platinových kalíšků, zvážen a byl nastaven teplotní program, který byl následně spuštěn. Před začátkem nového měření bylo nutné kalíšek vždy vyčistit od zbytku předchozího vzorku a dalších mikroskopických částí. Čištění kalíšku bylo prováděno pomocí malého hořáku, který tyto nečistoty vypálil.

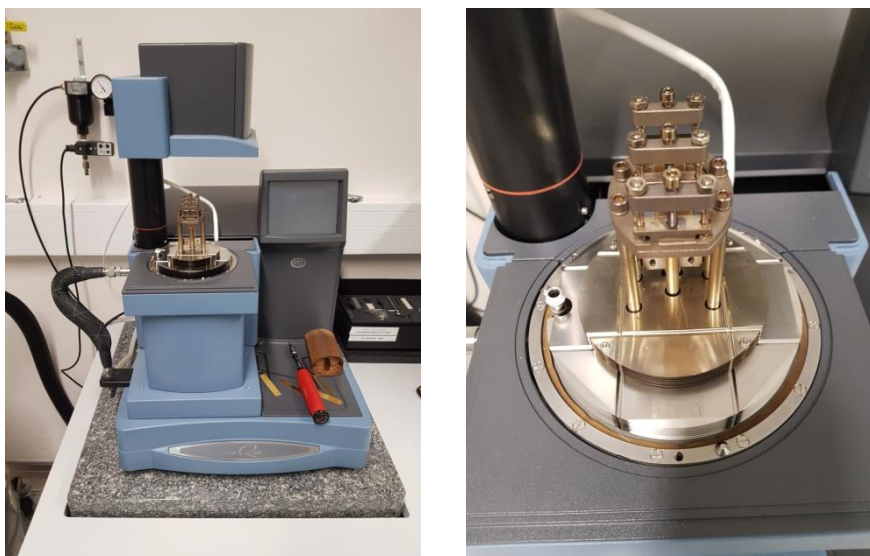


Obr.3.13 Přístroj SDT Q600

3.8.3 Dynamická mechanická analýza - DMA

DMA je metodou termické analýzy, pomocí které jsou měřeny mechanické vlastnosti viskoelastických materiálů v závislosti na teplotě [33,36]. Princip měření spočívá v ochlazování či ohřívání zkušební vzorku podle nastaveného programu, kdy je vzorek mechanicky namáhán, např. ohybem, smykem nebo ve formě vibrací o definované frekvenci nebo napětí, způsobující deformaci vzorku [36,37].

Měření bylo prováděno na analyzátoru DMA Q800. Pro metodu DMA byly použity vzorky o rozměrech 60x13 mm. Před spuštěním programu bylo nutné vzorek vždy změřit a rozměry zadat do programu. Poté byl vzorek upnut do čelistí přístroje (dvojitě vetknutý nosník) a utážen momentovým klíčem. Nakonec byl nastaven teplotní program a následně spuštěno měření.

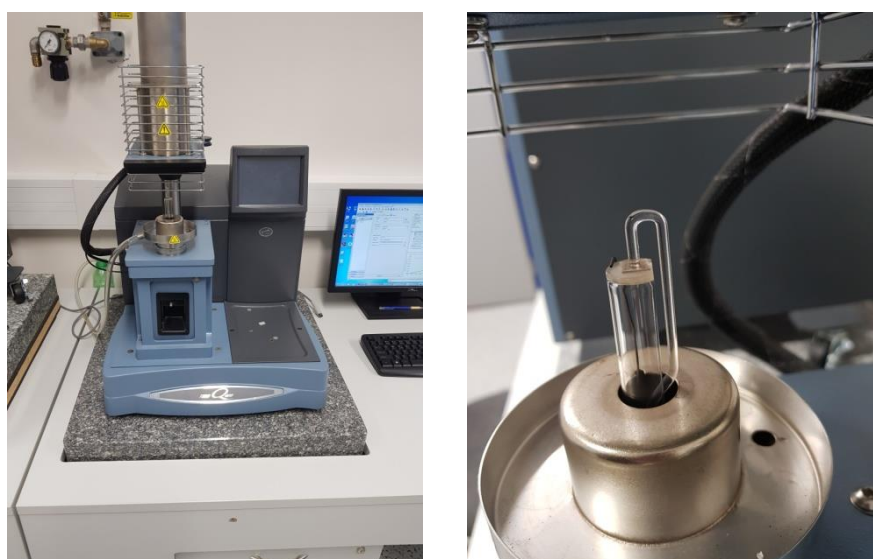


Obr.3.14 Přístroj DMA Q800

3.8.4 Termomechanická analýza - TMA

Metoda TMA je nejčastěji používána pro analýzu změn rozměrů vzorku jako funkce teploty. Tato metoda je velice citlivá na okolní vibrace a bývá často zaměňována se starší metodou, nazývanou se dilatometrie, která se v současné době používá jen zřídka [33,36,37].

Měření probíhalo na přístroji TMA Q400. Před vložením vzorku do měřícího prostoru bylo nutno obrousit jeho hrany jemným brusným papírem, aby nedošlo k ovlivnění změny rozměrů vzorku v důsledku nečistot na jednotlivých hranách. Následně byl vzorek o rozměrech 0,7x0,7 mm vložen pod sondu, byl nastaven a spuštěn teplotní program.



Obr.3.15 Přístroj TMA Q400

4 Vyhodnocení naměřených výsledků

K vyhodnocení výsledků sloužila data, která byla naměřena z jednotlivých zkoušek měření. Data byla získána vždy z měření pro dva materiály, tedy Relanex a Remikakit a následně mezi sebou porovnávána. Porovnávané výsledky pro tahovou a ohybovou zkoušku byly získány programem LabTest, jenž obsluhuje trhací stroj. U rázové zkoušky byly výsledky ručně zaznamenány a následně vypočteny hodnoty rázové houževnatosti. U obou metod měření tvrdosti a měření hustoty byly také hodnoty manuálně zaznamenány a následně vyhodnoceny. Pro samotné porovnání materiálů byla proto vypočítána průměrná hodnota daného parametru, jenž má být vyhodnocen, směrodatná odchylka a variační koeficient.

Směrodatná odchylka vypovídá o tom, do jaké míry se od sebe navzájem liší čísla v souboru zkoumaných hodnot, tedy jak moc jsou hodnoty rozptýleny kolem průměru. Pokud je směrodatná odchylka malá, tak jsou hodnoty ze zkoumané řady navzájem velmi podobné. Oproti tomu, když nabývá větší hodnoty, tak značí velké rozdílnosti mezi čísly [38]. Variační koeficient je podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru [39].

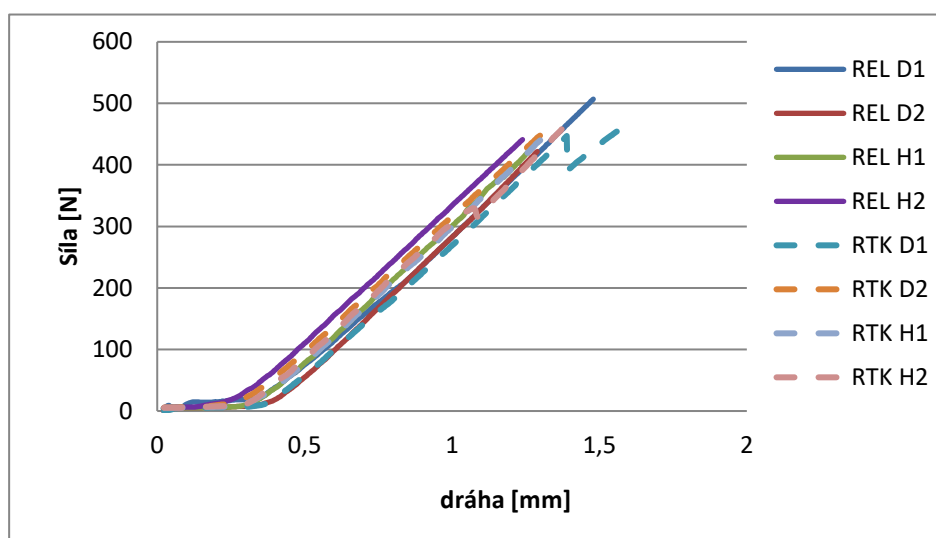
K vyhodnocování výsledků získaných termickými analýzami sloužil program Thermal Universal Analysis. V tomto programu byly analyzovány jednotlivé termogramy, které byly naměřeny pomocí jednotlivých metod pro materiály Relanex a Remikakit. Vlastnosti těchto materiálů byly následně porovnány pomocí průměrných hodnot daného parametru, který je měřen danou metodou.

4.1 Značení vzorků

Jednotlivé vzorky pro vyhodnocení naměřených výsledků jsou v této práci značeny podle materiálu, pozice v mechanickém lisu a pořadí lisování. Vzorky materiálu Relanex jsou značeny se zkratkou REL a vzorky materiálu Remikakit se zkratkou RTK. Další písmeno označuje, v jaké části lisu byly umístěny při lisování. Písmeno D značí dolní část lisu a písmeno H pak horní část lisu. Následné číslo značí pořadí lisování, tedy vzorky s jedničkou byly lisovány první den a vzorky s dvojkou druhý den pro daný materiál.

4.2 Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky

Veškeré naměřené hodnoty tahové zkoušky pro jednotlivé vzorky jsou zaznamenány v tabulce P.2.1 (viz příloha 2) a vypočítané hodnoty v tabulce P.2.2 (viz příloha 2). Grafické znázornění průběhu síly, která působí na vzorek upnutý v čelistích trhačím stroje v závislosti na dráze oddalujících čelistí je zobrazeno na obrázku 4.1.



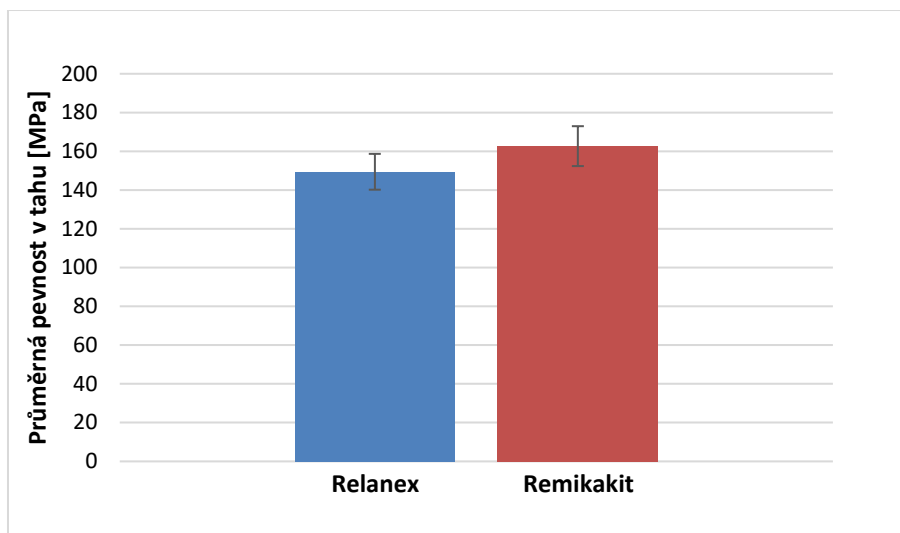
Obr.4.1 Graf průběhu síly v závislosti na dráze čelistí

Jak je z průběhu patrné, k výraznému zvýšení síly došlo při 0,3-0,4 mm dráhy čelistí. Poté síla stále rostla až do F_{\max} , která značí přetržení vzorku. F_{\max} se u každého vzorku lišila v řádech desítek newtonů. U vzorku RTK D1 lze vidět menší prokluz, který byl s největší pravděpodobností zapříčiněn nedostatečným upevněním vzorku v čelistích stroje. Tento graf slouží pouze pro ilustraci, proto byl také vybrán pouze průběh z jednoho měření na každé desce.

Tabulka 4.1: Vypočítané hodnoty průměrné pevnosti v tahu, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrná pevnost v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1,D2,H1,H2	149,44	9,24	5,53
RTK D1,D2,H1,H2	162,67	10,29	6,33

V obrázku 4.2 byly porovnávány průměrné pevnosti v tahu v závislosti na typu materiálu. Lze tedy konstatovat, že průměrná hodnota pevnosti v tahu u Remikakitu je přibližně o 13 MPa vyšší než u Relanexu. Směrodatná odchylka se u obou materiálů příliš neliší, to značí, že vychýlení čísel okolo průměrné hodnoty pevnosti byly velmi podobné.

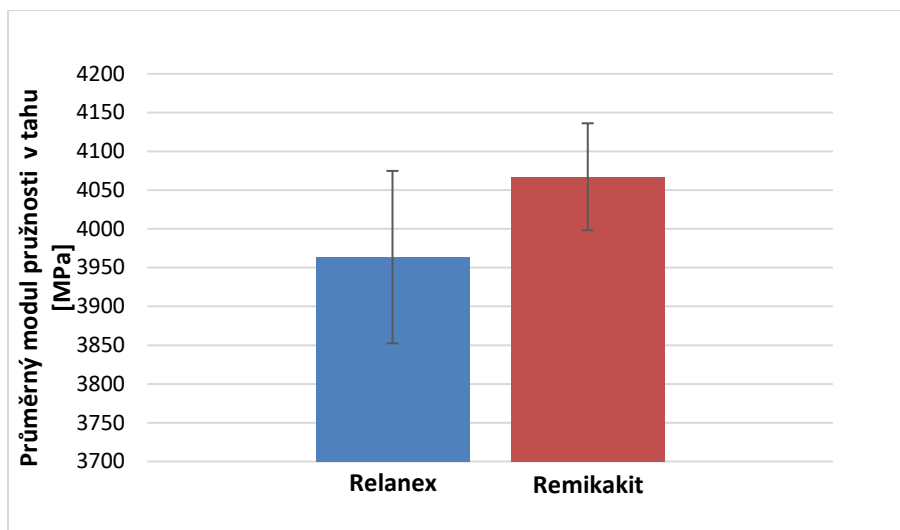


Obr.4.2 Graf průměrné pevnosti v tahu v závislosti na materiálu

Tabulka 4.2: Vypočítané hodnoty průměrného modulu pružnosti v tahu, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrný modul pružnosti v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1,D2,H1,H2	3963,63	111,21	2,81
RTK D1,D2,H1,H2	4067,26	69,03	1,70

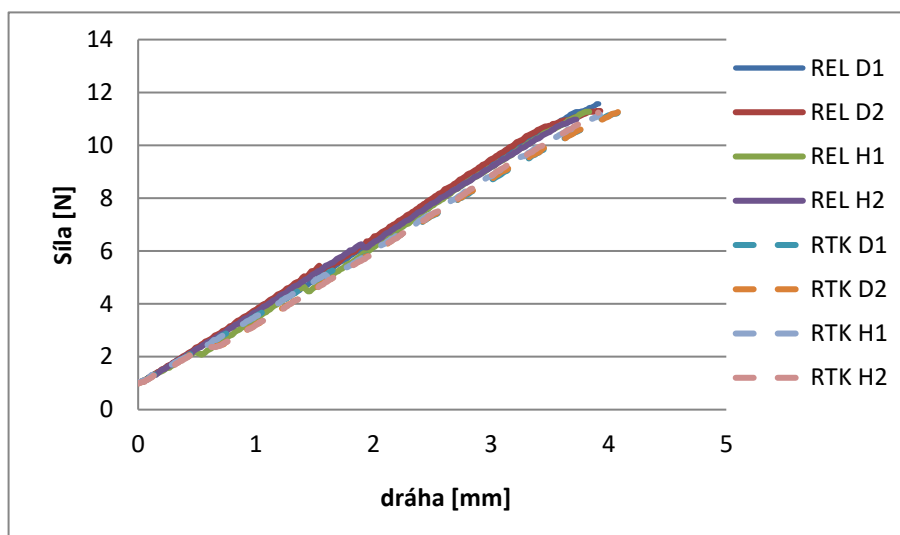
Obrázek 4.3 značí výsledky průměrného modulu pružnosti v tahu v závislosti na typu materiálu. Z grafu lze vidět, že průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu je u Remikakitu přibližně o 104 MPa větší než u Relanexu. U modulu pružnosti však záleží, jak byl zvolen začátek a konec modulu. Začátek modulu byl volen v lineární části průběhu křivky síly při 100 N a konec při 300 N. V grafické podobě se modul pružnosti udává jako směrnice lineární části (lze vidět na obrázku 4.1). Hodnoty začátku a konce modulu byly ručně zadány do programu před spuštěním, pokud by byly hodnoty zvoleny jinak, výsledky by se mohly nepatrně lišit. Proto byly tyto hodnoty zadány u všech měřených vzorků stejně, aby bylo dosaženo co možná nejlepších výsledků pro samotné porovnání. Směrodatná odchylka je u Relanexu o dost vyšší, což značí, že jsou hodnoty více rozptýleny od průměrné hodnoty modulu pružnosti.



Obr.4.3 Graf průměrného modulu pružnosti v tahu v závislosti na materiálu

4.3 Vyhodnocení výsledků tříbodového ohybu

Veškeré naměřené hodnoty tříbodového ohybu pro dílčí vzorky jsou zapsané v tabulce P.3.1 (viz příloha 3) a vypočítané hodnoty v tabulce P.3.2 (viz příloha 3). Na obrázku 4.4 lze vidět graf znázorňující průběh síly, která působila na vzorek položený na podpěrách trhacího stroje v závislosti na dráze přibližující se čelisti.



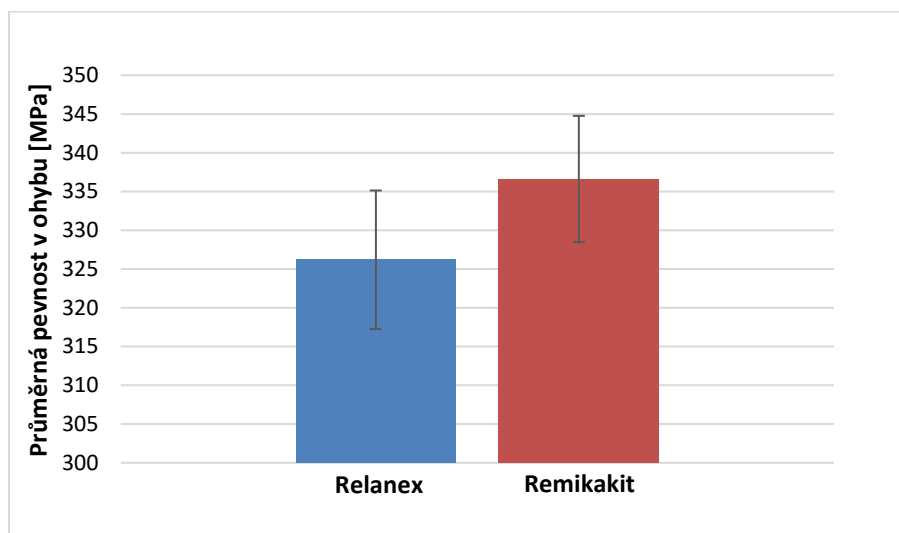
Obr.4.4 Graf průběhu síly v závislosti na dráze čelistí

Z grafu lze vyčíst, že síla od počátku měření konstantně vzrůstala až do porušení vzorku. Z těchto vybraných vzorků lze konstatovat, že F_{\max} se pohybovala v rozmezí od 11,6 – 11,7 N. Stejně jako u tahové zkoušky, slouží tento graf pouze pro ilustraci.

Tabulka 4.3: Vypočítané hodnoty průměrné pevnosti v ohybu, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrná pevnost v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1,D2,H1,H2	326,19	8,94	2,74
RTK D1,D2,H1,H2	336,61	8,15	2,42

Obrázek 4.5 značí porovnávané výsledky průměrné pevnosti v ohybu v závislosti na typu materiálu. Stejně jako u pevnosti v tahu lze říci, že Relanex má průměrnou hodnotu pevnosti, tentokrát v ohybu menší než Remikakit a to zhruba o 10 MPa. Variabilita reprezentovaná směrodatnou odchylkou je pro oba materiály srovnatelná.



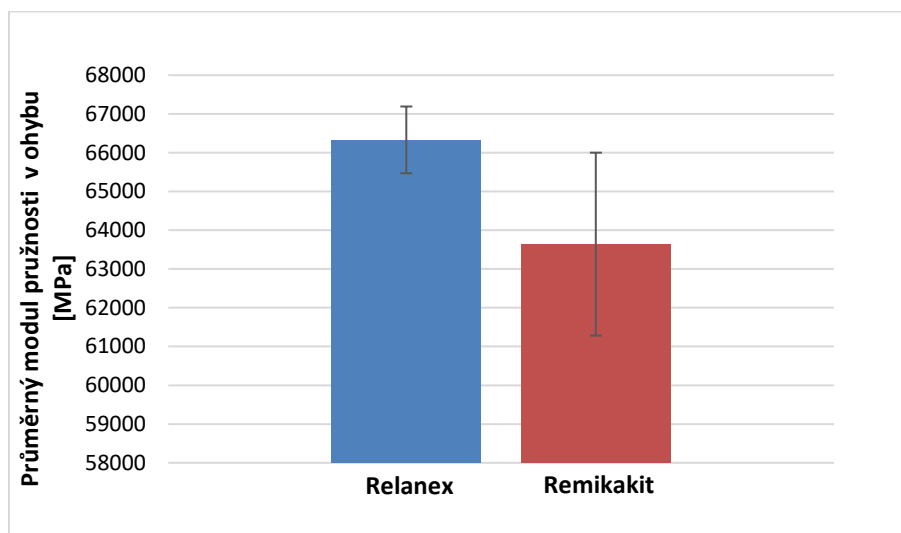
Obr.4.5 Graf průměrné pevnosti v ohybu v závislosti na materiálu

Tabulka 4.4: Vypočítané hodnoty průměrného modulu pružnosti v ohybu, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrný modul pružnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1,D2,H1,H2	66331,28	861,26	1,30
RTK D1,D2,H1,H2	63642,16	2359,20	3,71

Obrázek 4.6 ukazuje výsledky průměrného modulu pružnosti v ohybu v závislosti na typu materiálu. Z výsledných hodnot si lze všimnout, že průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu je u Relanexu výrazně vyšší než u Remikakitu. To samé můžeme říci i o směrodatné odchylce, kde ale výrazně vyšší hodnota, tedy i výraznější odchýlení od průměrné hodnoty, byla vypočítána u Remikakitu, což dokládá vyšší variabilitu a vyšší

nepřesnost měření. Stejně jako u modulu pružnosti v tahu, i zde záleží, jak byly zvoleny hodnoty začátku a konce modulu. Začátek modulu byl volen v lineární části průběhu křivky síly při 3 N a konec při 7 N (lze vidět na obrázku 4.4). Tyto hodnoty byly do programu ručně zadány a u všech měřených vzorků zadány stejně, to proto, aby bylo dosaženo přesnějších výsledků pro porovnání.



Obr. 4.6 Graf průměrného modulu pružnosti v ohybu v závislosti na materiálu

4.4 Vyhodnocení výsledků rázové houževnatosti

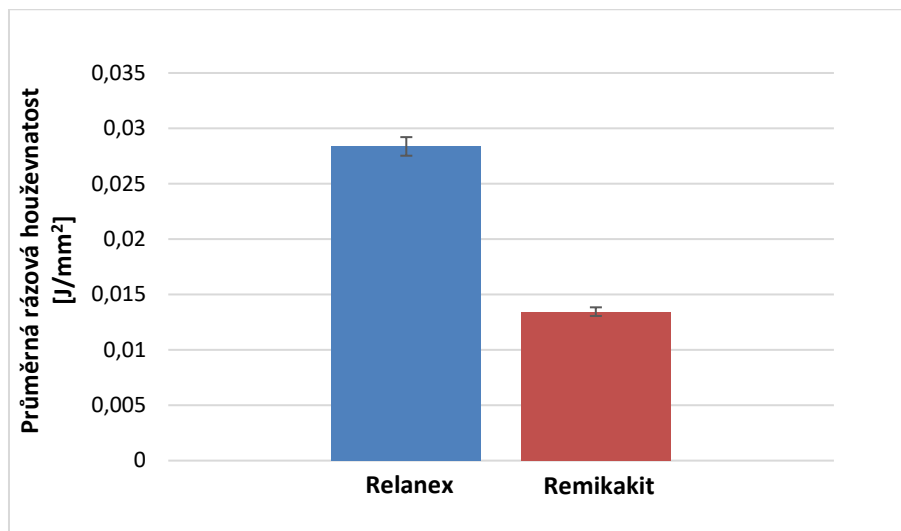
Všechna naměřená data rázové zkoušky pro jednotlivé vzorky jsou k nahlédnutí v tabulce P.4.1 (viz příloha 4) a vypočítané hodnoty poté v tabulce P.4.2 (viz příloha 4). V těchto tabulkách je možné vidět práci potřebnou k přeražení vzorků (A), rozměry vzorků, tedy tloušťku (h) a šířku (b). Z těchto dat byla poté vypočítána rázová houževnatost pro jednotlivé vzorky, dle vztahu (2):

$$a = \frac{A}{h \cdot b} \quad [\text{J}/\text{mm}^2]. \quad (2)$$

Tabulka 4.5: Vypočítané hodnoty průměrné rázové houževnatosti, směrodatné odchytky a variačního koeficientu pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrná rázová houževnatost [J/mm^2]	Směrodatná odchytka σ [J/mm^2]	Variační koeficient v [%]
REL D1,D2,H1,H2	0,02837	0,00084	2,95099
RTK D1,D2,H1,H2	0,01345	0,00039	2,90962

V obrázku 4.7 byly porovnávány průměrné hodnoty rázové houževnatosti v závislosti na typu materiálu. Z výsledků lze říci, že výsledná rázová houževnatost je více jak o polovinu větší u materiálu s přidavkem skleněné tkaniny, tedy Relanexu. Co se týče směrodatné odchylky, ta je u obou materiálů velice malá, protože i hodnoty rázové houževnatosti nejsou příliš vysoké.



Obr.4.7 Graf průměrné rázové houževnatosti v závislosti na materiálu

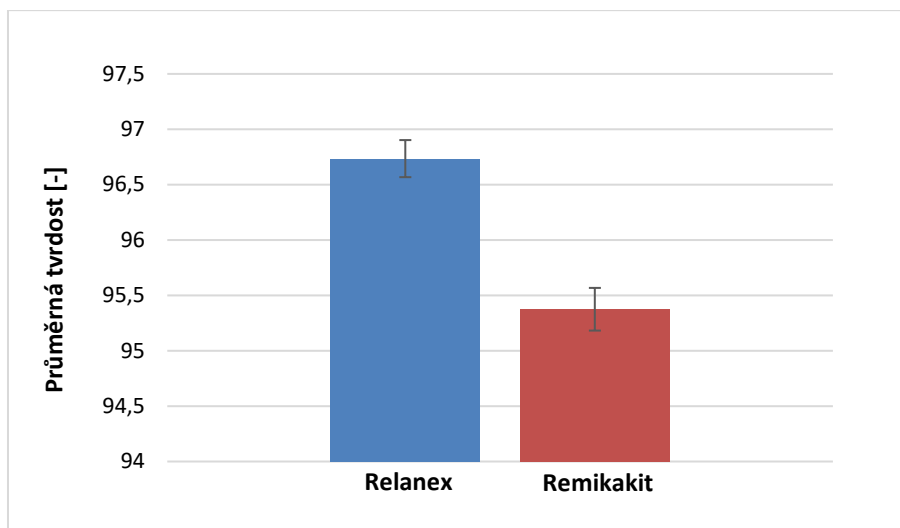
4.5 Vyhodnocení výsledků tvrdosti

Naměřené hodnoty tvrdostí oběma metodami jsou zaneseny v tabulce P.5.1 (viz příloha 5) a vypočítané hodnoty poté v tabulce P.5.2 (viz příloha).

Tabulka 4.6: Vypočítané hodnoty průměrné tvrdosti, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vzorky Relanex a Remikakit metodou Shore A

Vzorky	Průměrná tvrdost [-]	Směrodatná odchylka σ [-]	Variační koeficient v [%]
REL D1,D2,H1,H2	96,735	0,16743	0,17308
RTK D1,D2,H1,H2	95,375	0,19272	0,20206

Na obrázku 4.8 jsou zaneseny průměrné hodnoty tvrdosti pro metodu Shore A v závislosti na typu materiálu. Z grafu lze vidět, že hodnota výsledné tvrdosti je u Relanexu o něco vyšší než je tomu u Remikakitu. Směrodatná odchylka se u obou materiálů liší pouze v setinách.

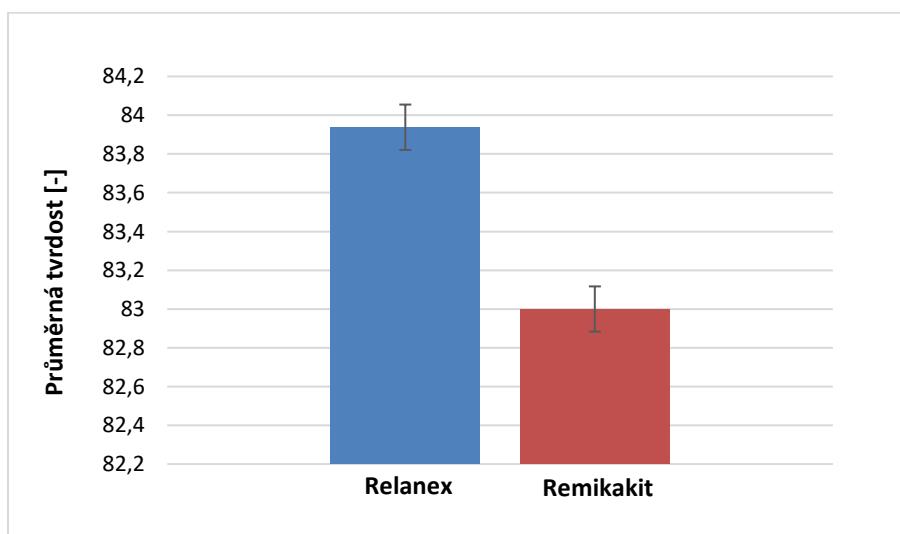


Obr. 4.8 Graf průměrné tvrdosti pro metodu Shore A v závislosti na materiálu

Tabulka 4.7: Vypočítané hodnoty průměrné tvrdosti, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vzorky Relanex a Remikakit metodou Shore D

Vzorky	Průměrná tvrdost [-]	Směrodatná odchylka σ [-]	Variační koeficient [%]
REL D1,D2,H1,H2	83,938	0,11706	0,13946
RTK D1,D2,H1,H2	83,000	0,11679	0,14071

Obrázek 4.9 znázorňuje průměrné hodnoty tvrdosti pro metodu Shore D v závislosti na typu materiálu. Stejně tak jako u metody Shore A lze vidět, že hodnota výsledné tvrdosti je u Relanexu opět vyšší než u Remikakitu, ale s menšími průměrnými hodnotami. Směrodatná odchylka je pak pro oba materiály téměř totožná.



Obr. 4.9 Graf průměrné tvrdosti pro metodu Shore D v závislosti na materiálu

Z naměřených hodnot tvrdostí oběma metodami lze konstatovat, že podle předpokladů dosáhly měřené vzorky vyšších hodnot u metody Shore A. To je především z důvodu tvaru tvrdoměru, kdy u metody A má hrot spíše kuželovitý tvar a je tak do vzorku méně stlačen, proto je také metoda používána pro měkčí materiály. Kdežto u metody D má tvrdoměr hrot špičatý, a tak se do vzorku lépe dostane, tím dochází i k menším naměřeným hodnotám.

4.6 Vyhodnocení výsledků hustoty

Veškerá data pro měření hustoty, která byla zaznamenána laboratorní váhou pro jednotlivé vzorky, jsou v tabulce P.6 (viz příloha 6).

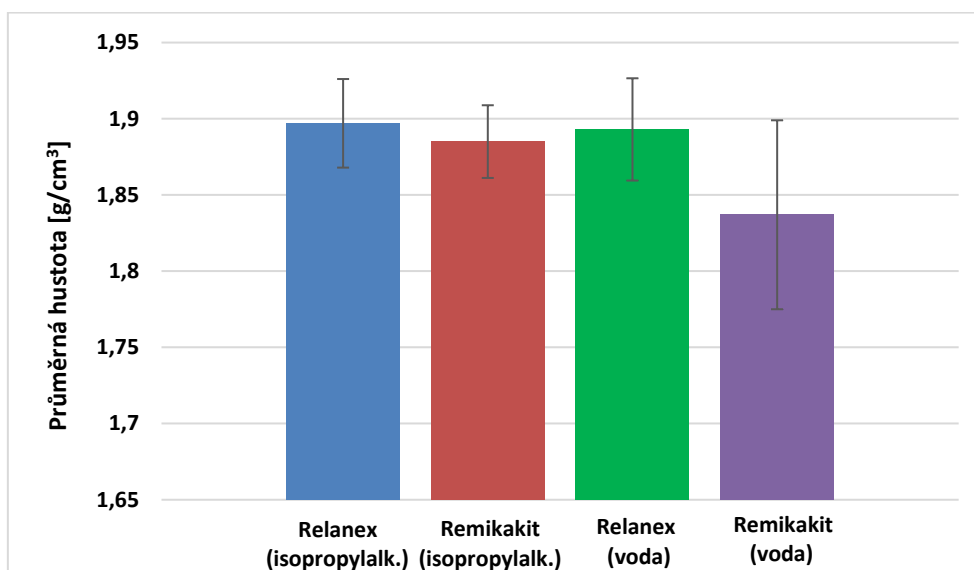
Dle doporučení výrobce použitých vzorků se u slídových materiálů hustota neměří, tedy jen u Relanexu, protože je dodáván ve formě pásky a je udávána pouze plošná hustota jednotlivých komponent, z nichž je vyroben. Oproti tomu u Remikakitu se udává, protože je dodáván ve formě desky, která je složena z několika vrstev, a proto je měřena hustota pro různé tloušťky této desky. I přes tento fakt byla hustota u obou materiálů měřena, a to obzvláště s ohledem na zadání této práce.

Tabulka 4.8: Vypočítané hodnoty průměrné hustoty, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vzorky Relanexu a Remikakitu měřených v isopropylalkoholu a ve vodě

Měření hustoty ve vzduchu a v isopropylalkoholu			
Vzorky	Průměrná hustota [g/cm³]	Směrodatná odchylka σ [g/cm³]	Variační koeficient v [%]
REL D1,D2,H1,H2	1,897	0,02907	1,53276
RTK D1,D2,H1,H2	1,885	0,02385	1,26567
Měření hustoty ve vzduchu a ve vodě			
REL D1,D2,H1,H2	1,893	0,03356	1,77286
RTK D1,D2,H1,H2	1,837	0,06199	3,37472

Obrázek 4.10 znázorňuje porovnání průměrných hodnot hustoty zkoumaných materiálů, které byly měřeny v isopropylalkoholu a ve vodě. Z výsledků měření ve vzduchu a v isopropylalkoholu lze říci, že u materiálu Relanex byla hustota vyšší než u Remikakitu a to zhruba o setinu, což ve výsledku není příliš velký rozdíl. Dále je z grafu patrné, že při měření ve vzduchu a ve vodě vychází větší rozdíl mezi měřenými materiály než v předchozím případě. To však bylo způsobeno vzorkem RTK H2, kdy výsledná hustota vyšla zhruba o desetinu menší než u ostatních vzorků. Tato nepřesnost mohla být

způsobena např. úlomkem pojiva při řezání vzorku. Z toho důvodu je zde i větší směrodatná odchylka a tím pádem i větší vychýlení od průměrné hodnoty.



Obr. 4.10 Graf porovnání průměrných hodnot hustoty (měřených v isopropylalkoholu a ve vodě) v závislosti na materiálu

4.7 Vyhodnocení výsledků získané metodou DSC

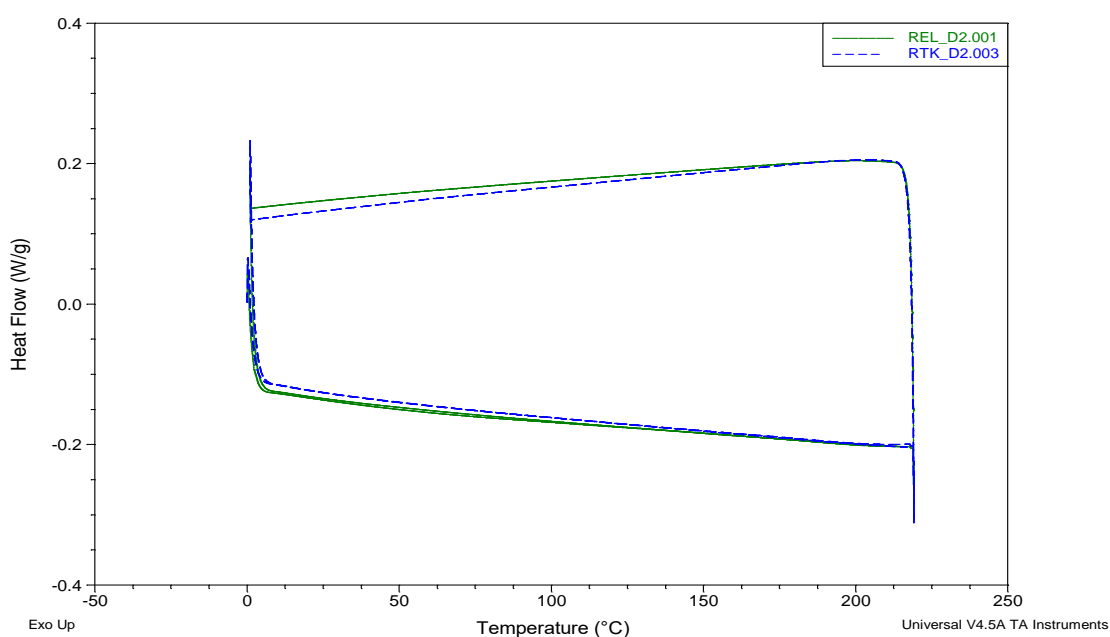
Nezbytné parametry pro měření metodou DSC byly velikost navážky, tedy hmotnost vzorku, dále hmotnost hliníkového kalíšku, rychlost ohřevu vzorku, teplotní rozsah měření, typ proudící atmosféry a rychlost proudící atmosféry. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 4.9.

Tabulka 4.9: Měřicí podmínky pro metodu DSC

Parametry	Hodnoty
Velikost navážky [mg]	12,1;15,52
Rychlost ohřevu [°C/min]	10
Teplotní rozsah [°C]	0-220
Proudící atmosféra	dusík
Rychlost proudící atmosféry [ml/min]	50

Měření probíhalo ve třech krocích (režim opakovaného ohřevu). Nejprve byl nastaven ohřev do teploty 220 °C s rychlostí 10 °C/min. V druhém kroku následovalo chlazení až do 0 °C a nakonec opět ohřev na 220 °C se stejnou rychlostí ohřevu jako v prvním kroku. V tomto případě první ohřev sloužil k případnému dotvrzení vzorku a odstranění tepelné a mechanické historie. Druhý pak k analýze samotných výsledků.

Na obrázku 4.11 je zobrazen průběh měření pomocí metody DSC pro materiály Relanex a Remikakit. Dalo by se tedy přepokládat, že pomocí této metody bude zanalyzována teplota skelného přechodu pro zkoumané materiály a též by mohl být vidět pík případného dotvrzení vzorku. To však z naměřených termogramů zanalyzovat nejde, z čehož lze usuzovat, že metoda DSC není určena na analýzu teploty skelného přechodu epoxidových pryskyřic, které mají velmi malé změny tepelné kapacity v jejím okolí [36] a chybějící pík, by mohl značit úplné dotvrzení vzorku. Další z důvodu, proč z termogramu teplotu skelného přechodu nelze určit je ten, že v měřeném vzorku bylo obsaženo málo pojiva, tedy epoxidové pryskyřice a to i přesto, že metoda byla přeměřována několikrát na různých vzorcích, vždy však se stejným výsledkem. Dokonce byly zkoušeny různé způsoby přípravy jednotlivých vzorků, jako je příprava pevného vzorku, kdy byl nastříhán pomocí štípacích kleští, vyseknut raznicí nebo napráškován, tzn., že byl vzorek připraven naškrábáním pomocí skalpelu tak, aby byly zahrnuty všechny složky materiálu (včetně pojiva ve formě pryskyřice). Z naměřených výsledků metodou DSC pro oba materiály lze tedy konstatovat, že metoda není vhodná pro analýzu teploty skelného přechodu měřených vzorků a pro vyhodnocení této teploty byly použity jiné metody.



Obr.4.11 Termogram metody DSC pro vzorky Relanex a Remikakit

4.8 Vyhodnocení výsledků získané metodou STA

Důležité parametry pro měření metodou STA byly velikost navážky vzorku, rychlost ohřevu vzorku, teplotní rozsah měření, typ proudící atmosféry a rychlost proudící atmosféry. Tyto parametry, jsou uvedeny v tabulce 4.10.

Tabulka 4.10: Měřicí podmínky pro metodu STA

Parametry	Hodnoty
Velikost navážky [mg]	10,2-20,7
Rychlost ohřevu [°C/min]	10
Teplotní rozsah [°C]	20-900
Proudící atmosféra	dusík, vzduch
Rychlost proudící atmosféry [ml/min]	100

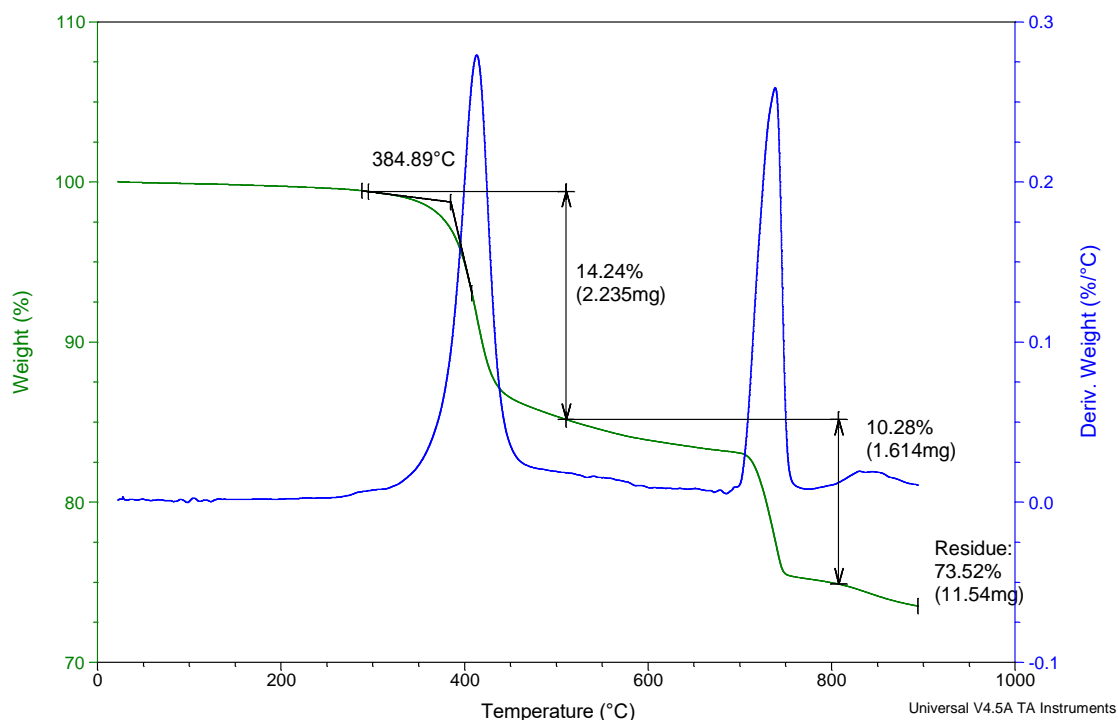
Měření probíhalo ve dvou krocích, tedy docházelo ke dvěma rozkladům. Nejprve byl nastaven ohřev do teploty 700 °C s rychlostí 10 °C/min a v atmosféře proudícího dusíku. Poté následoval druhý ohřev až do teploty 900 °C též s rychlostí 10 °C/min, ale již v atmosféře proudícího vzduchu. Rychlost proudící atmosféry byla u obou ohřevů 100 ml/min.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, STA je kombinací metod TGA a DSC. Zde však byly porovnány výsledky pouze z TGA, protože metodě DSC bylo určeno samostatné měření.

Jak lze vidět z výsledného termogramu na obrázku 4.12 byly vyhodnocovány parametry úbytků hmotnosti při jednotlivých rozkladech, zbytkového materiálu po konci teplotního programu a také teplota dekompozice. Pro přesnější vyhodnocení byla zobrazena křivka derivace TGA (tzv. derivační termogravimetrická analýza) [36], která slouží pro lepší oddělení oblastí jednotlivých rozkladů.

Na obrázku 4.12 je zobrazen termogram pro vybraný vzorek Relanexu. K prvnímu úbytku hmotnosti došlo při teplotě cca 275 °C a to 14,24 %. Druhý úbytek hmotnosti byl už mírnějšího rázu a dosáhl zhruba 10,28 % při teplotě 702 °C. Po konci teplotního programu zbylo z původní váhy vzorku 73,52 %. Tato hodnota značí procentuální účast slídy a skleněné tkaniny ve sledovaném vzorku. Procentuální úbytek epoxidové pryskyřice byl tedy 26,48 %. Teplota dekompozice sledovaného vzorku, analyzovaná jako teplota první rozkladné reakce, činila 384,89 °C.

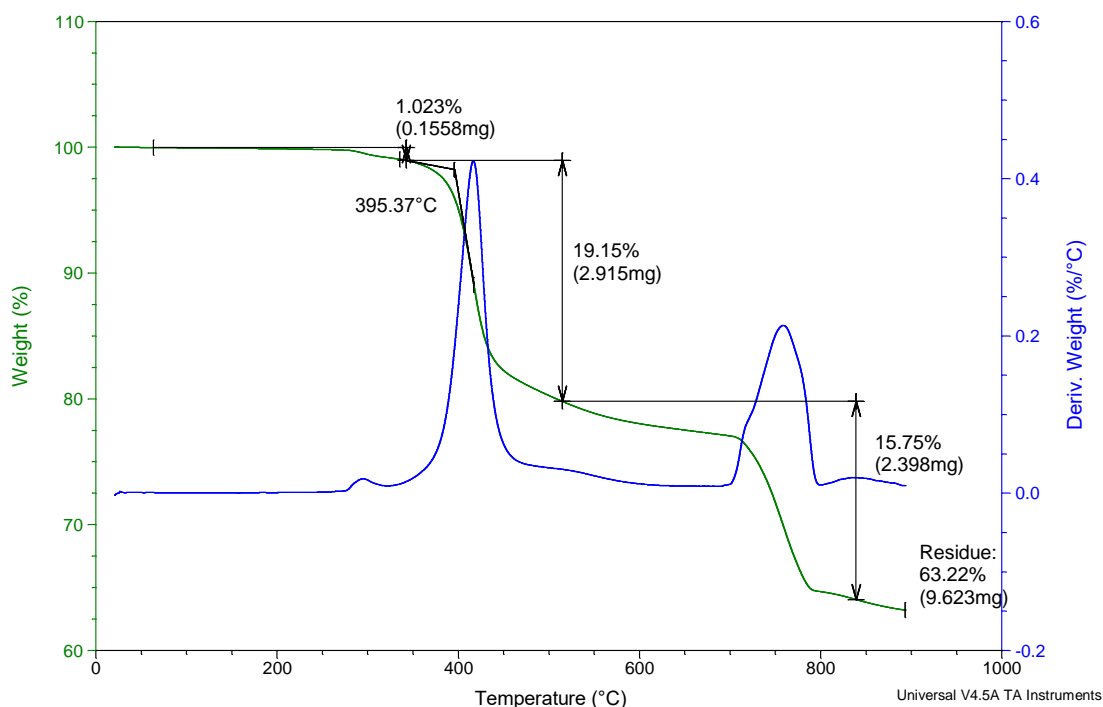
Tyto parametry se v dalších měřených vzorcích Relanexu příliš nelišily. K prvním úbytkům hmotnosti docházelo vždy v rozmezí teplot 270 – 275 °C a mezi 14 – 15 %. K druhým úbytkům docházelo v oblasti teplot 700 – 704 °C a 10 – 12 %. Zbytek slídy a skleněné tkaniny po konci teplotního programu se pohyboval vždy mezi 73 – 74 %.



Obr.4.12 Termogram metody STA pro vzorek Relanex

U vybraného vzorku Remikakit na obrázku 4.13 lze vidět, že k prvnímu velice mírnému úbytku hmotnosti došlo při teplotě kolem 255 °C a to 1 %. Další úbytek hmotnosti je již znatelnější a činil zhruba 19% původní váhy. Při posledním rozkladu činil úbytek necelých 16 %. Tedy po konci teplotního programu zbylo z původní váhy vzorku 63,22 %. Tato hodnota značí procentuální zastoupení slídy ve sledovaném vzorku a procentuální úbytek pojiva, tedy epoxidové pryskyřice. Teplota dekompozice tohoto vzorku činila 395,37 °C.

Pro další měřené vzorky Remikakitu sledované parametry vycházely obdobně. K prvním velmi malým úbytkům hmotnosti docházelo při teplotách 255 – 260 °C, a to v rozmezí 0,9 - 1 %. Další úbytky hmotnosti vycházely okolo 19 – 21 % a poslednímu 14 - 16 %. Procentuální účast slídy po konci teplotního programu byla v rozmezí 63 – 64 %.



Obr.4.13 Termogram metody STA pro vzorky Remikakit

Tabulka 4.11: Vypočítané hodnoty průměrné teploty dekompozice pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrná teplota dekompozice [°C]
REL D1,D2,H1,H2	385,08
RTK D1,D2,H1,H2	394,72

Z vypočítaných hodnot v tabulce 4.11 můžeme vidět, jak se liší průměrná teplota dekompozice pro jednotlivé materiály. Pro vzorky Remikakitu, který složen ze slídy a epoxidové pryskyřice, vyšla 394,72 °C. Kdežto u Relanexu, který obsahuje navíc skleněnou tkaninu, dosáhla hodnoty 385,08 °C. Obě tyto hodnoty se tedy viditelně rozcházejí od teoretických předpokladů, kdy teplota dekompozice začíná na 400 °C [40].

4.9 Vyhodnocení výsledků získané metodou DMA

Parametry pro měření metodou DMA byly šířka a tloušťka vzorku, rychlost ohřevu vzorku, teplotní rozsah měření, typ proudící atmosféry a rychlost proudící atmosféry. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 4.12.

Tabulka 4.12: Měřicí podmínky pro metodu DMA

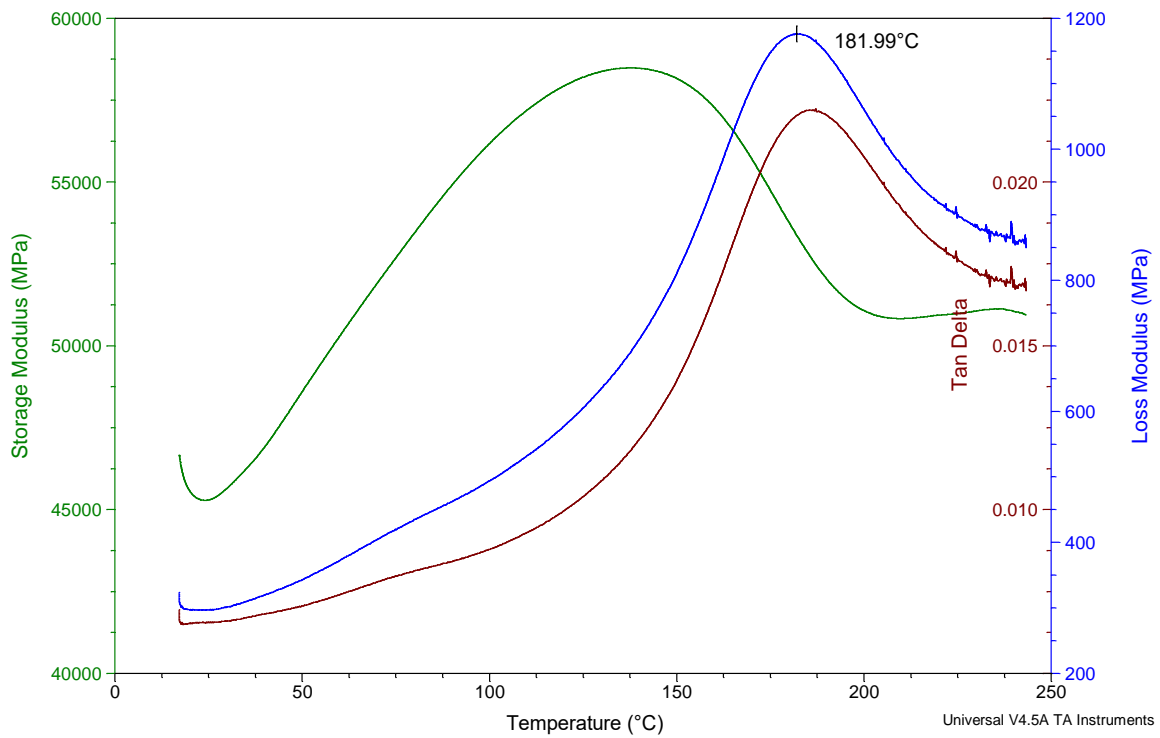
Parametry	Hodnoty
Šířka vzorku [mm]	12,5-13,5
Tloušťka vzorku [mm]	0,5-0,57
Rychlost ohřevu [°C/min]	5
Teplotní rozsah [°C]	20-250
Proudící atmosféra	vzduch
Rychlost proudící atmosféry [ml/min]	50

Měření probíhala v aktivní atmosféře proudícího vzduchu s rychlostí 50 ml/min s ohřevem vzorku do teploty 250 °C s rychlostí 5 °C/min. DMA patří k metodě termické analýzy, pomocí které lze nejlépe určit teplotu skelného přechodu, protože je udávána jako nejcitlivější a nejpřesnější ke stanovení tohoto parametru [36].

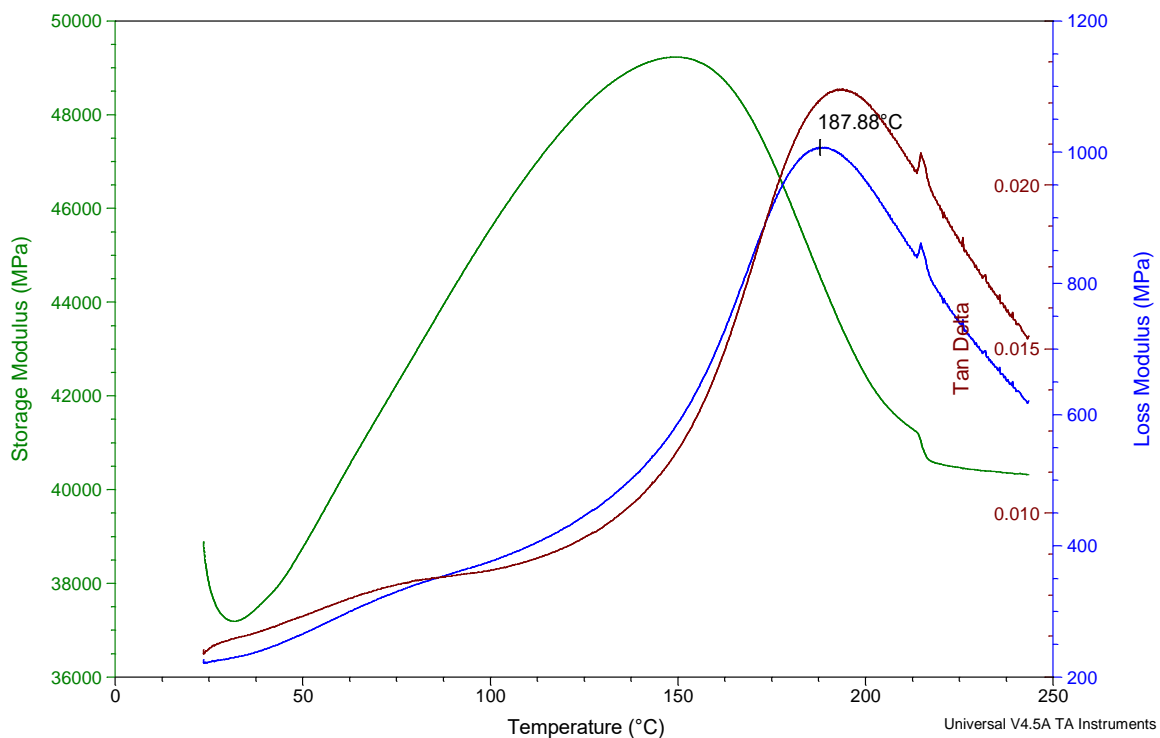
Na obrázcích 4.14 a 4.15 je možné vidět DMA termogramy pro měřené vzorky. Termogramy zobrazují závislosti signálů storage modulus (elastický modul), loss modulus (ztrátový modul) a $\tan \delta$ (ztrátový činitel) na teplotě. Z každého signálu pak lze vyčíst teplotu skelného přechodu. Pokud by byla tato teplota vyhodnocována pro každý signál zvlášť, vyšly by tři odlišné teploty. Z toho důvodu byl vybrán pouze jeden signál, ze kterého bude teplota skelného přechodu vyhodnocena.

Signál storage modulus reprezentuje teplotu, při které materiál ztrácí svoji pevnost a nastává v oblasti prudkého poklesu křivky. Signál $\tan \delta$ udává tlumící vlastnosti materiálu a teplota je dána maximem píku. Poslední signál loss modulus značí teplotu, při níž dochází k maximální změně pohyblivosti polymerních řetězců v materiálu. Z tohoto důvodu byl právě tento signál vybrán pro vyhodnocení teploty skelného přechodu, protože z chemického hlediska se nejvíce shoduje s formulací této teploty [36].

Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny výsledky vybraných vzorků měřených materiálů pro signál loss modulus, tedy signál, ze kterého byla vyhodnocována teplota skelného přechodu. Na prvním obrázku 4.14 lze vidět, že teplota skelného přechodu pro vzorek Relanex byla 181,99 °C a u druhého obrázku 4.15 pro vzorek Remikakit dosáhla teplota 187,88 °C. Jak lze vidět, tak vyhodnocení bylo prováděno vždy z maxima píku, což je vždy jednodušší a hlavně přesnější než z určitého rozsahu (oblasti) výběru.



Obr.4.14 Termogram metody DMA pro vzorek Relanex



Obr.4.15 Termogram metody DMA pro vzorek Remikakit

Tabulka 4.13: Vypočítané hodnoty průměrné teploty skelného přechodu pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrná teplota skelného přechodu [°C]
REL D2,H1,H2	182,93
RTK D1,D2,H1,H2	189,32

Z vypočítaných hodnot v tabulce 4.13 lze vidět odlišnost průměrných teplot skelného přechodu z jednotlivých hodnot vyhodnocovaných ze signálu loss modulus pro měřené materiály. Pro Relanex průměrná hodnota vyšla 182,93 °C a pro Remikakit 189,32 °C. Tato skutečnost znamená, že Remikakit přechází ze sklovitého stavu do kaučkovitého za vyšších teplot. Tyto hodnoty se příliš nerozcházejí od teoretických předpokladů, kdy se teplota skelného přechodu pohybuje v rozmezí 0 - 180 °C [40].

4.10 Vyhodnocení výsledků získané metodou TMA

Důležité parametry pro měření metodou TMA byly typ sondy, velikost vzorku, rychlost ohřevu vzorku, absolutní velikost přitlačné síly, teplotní rozsah měření, typ proudící atmosféry a rychlost proudící atmosféry. Tyto parametry, jsou uvedeny v tabulce 4.14.

Tabulka 4.14: Měřicí podmínky pro metodu TMA

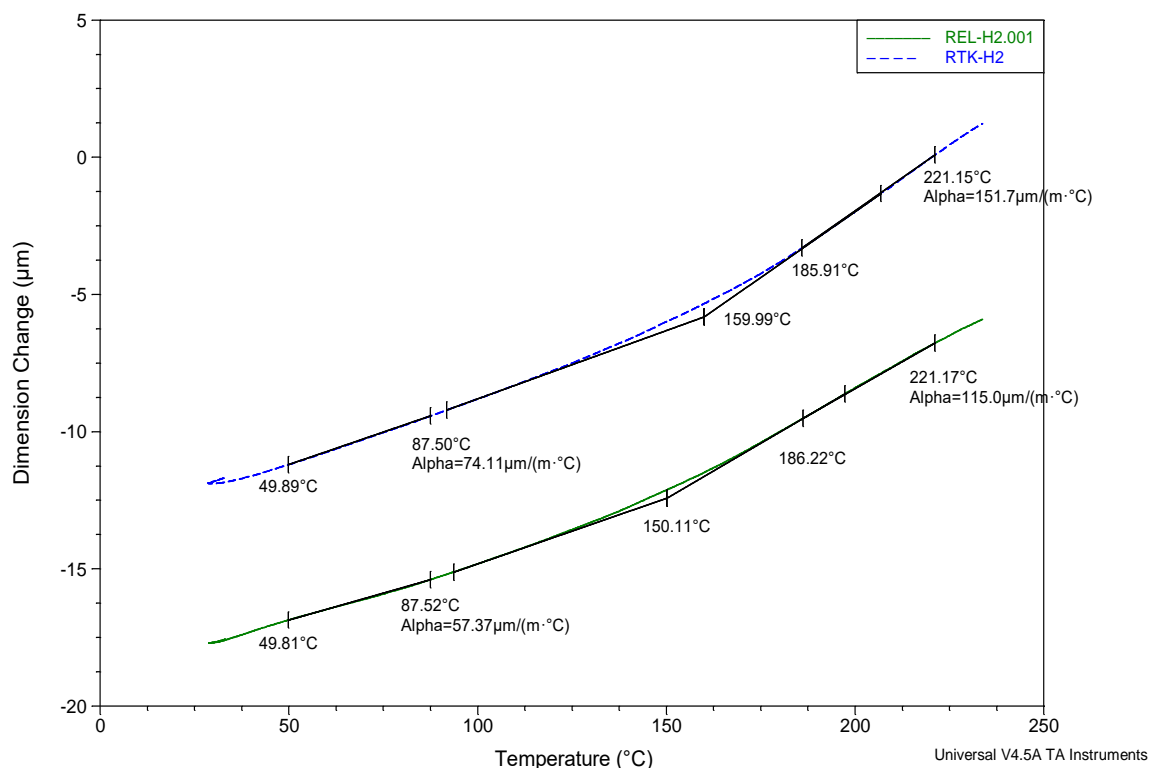
Parametry	Hodnoty
Typ sondy	expanzní
Velikost vzorku [mm]	0,6-0,7
Rychlost ohřevu [°C/min]	5 a 10
Přítlačná síla [N]	0,1
Teplotní rozsah [°C]	20-235
Proudící atmosféra	vzduch
Rychlost proudící atmosféry [ml/min]	50

Měření probíhalo ve třech krocích. V prvním kroku byl nastaven ohřev do teploty 235 °C s rychlostí 10 °C/min. V druhém kroku následovalo chlazení na teplotu 20 °C s rychlostí 5 °C/min a v posledním kroku opět ohřev na teplotu 235 °C s již pomalejší rychlostí ohřevu 5 °C/min. Režim měření byl zvolen s ohledem na doporučení normy [41].

Stejně jako u metody DSC první ohřev sloužil k odstranění tepelné a mechanické historie vzorku a zároveň k dotvrzení vzorku, tudíž pro vyhodnocení výsledků teploty skelného přechodu sloužil pouze druhý. Pokud by byla teplota skelného přechodu vyhodnocována z obou ohřevů, vliv tepelné historie vzorku by způsobil, že by hodnoty, ale i průběhy sledovaného parametru, byly velmi odlišné. Tato odlišnost obou teplot byla způsobena závislostí teploty skelného přechodu na teplotní historii vzorku [36]. Mimo jiné pomocí metody TMA lze ještě určit koeficient délkové roztažnosti vzorku, což nelze žádnou jinou námi používanou metodou.

Na obrázku 4.16 jsou zobrazeny průběhy druhého ohřevu metody TMA, ze kterých byla vyhodnocována teplota skelného přechodu a především pak koeficient teplotní

délkové roztažnosti, který byl vyhodnocován před i po skelné transformaci v určitém rozmezí teplot. U modrého (horního) průběhu, který je určen pro vybraný vzorek Remikakit, lze vidět, že teplota skelného přechodu dosáhla teploty 159,99 °C. Koeficient teplotní délkové roztažnosti byl analyzován v lineární části křivky v teplotním intervalu 49,89 – 87,50 °C a činil 74,11 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$. Koeficient teplotní délkové roztažnosti za teplotou skelného přechodu v intervalu 185,91 – 221,15 °C byl 151,7 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$. Naproti tomu u zeleného (dolního) průběhu odpovídajícímu vybranému vzorku Relanexu, nastal skelný přechod při teplotě 150,11 °C. Koeficient teplotní délkové roztažnosti v podobném rozmezí jako u Remikakitu činil 57,37 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ před skelnou transformací a po skelné transformaci 115,0 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$.



Obr.4.16 Termogram metody TMA pro vzorky Relanex a Remikakit

Tabulka 4.15: Vypočítané hodnoty průměrné teploty skelného přechodu a průměrného koeficientu teplotní délkové roztažnosti v rozmezí zvolených teplot pro vzorky Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrná teplota skelného přechodu [°C]	Průměrný koeficient teplotní délkové roztažnosti [ppm/°C] (48-88 °C)	Průměrný koeficient teplotní délkové roztažnosti [ppm/°C] (184-222 °C)
REL D1,D2,H1,H2	149,04	62,24	114,75
RTK D1,D2,H1,H2	160,23	68,32	154,55

Z vypočítaných hodnot v tabulce 4.15 můžeme vidět rozdílnost průměrných hodnot teploty skelného přechodu a koeficientu teplotní délkové roztažnosti ve zvoleném rozmezí teplot z jednotlivých měření. Pro vzorky Relanexu průměrná hodnota teploty skelného přechodu vyšla 149,04 °C a vzorky Remikakitu 160,23 °C. Průměrná hodnota koeficientu teplotní délkové roztažnosti v rozmezí teplot 48 – 88 °C pro vzorky Relanexu dosahovala 62,24 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ a pro vzorky Remikakitu 68,32 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$. V rozmezí teplot 184-222 °C činil koeficient průměrné hodnoty 114,75 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ pro vzorky Relanexu a 154,55 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ pro vzorky Remikakitu. Podle teoretických předpokladů byla hodnota koeficientu teplotní délkové roztažnosti před teplotou skelného přechodu udávána 60 $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ [40], což se především v případě Relanexu příliš neliší.

V porovnání s metodou DMA vyšla průměrná hodnota teploty skelného přechodu u obou měřených materiálů výrazně nižší. Je nutné si uvědomit, že u metody TMA byl vyhodnocen tento parametr z druhého ohřevu a u DMA z prvního. Hodnota teploty skelného přechodu by po druhém ohřevu měla být vyšší. Další z aspektů této rozdílnosti je přesnost obou metod. U metody DMA byla skelná transformace vyhodnocena ze signálu loss modulus, kde byla brána teplota z maxima píku. Oproti tomu u TMA závisí na rozsahu výběru (bodů vyhodnocení), tedy teplota skelného přechodu se může tímto výběrem mírně lišit, protože v naměřených termogramech chybí odseparování v tomto bodě, ze kterého by byl výsledek lépe poznatelný. Z důvodu lepšího odseparování byla prováděna optimalizační měření, kdy byly zkoušeny různé přitlačné síly i rychlosti ohřevu, které však k vyšší citlivosti nevedly. Proto jako hlavní výsledky z metody TMA byly brány koeficienty teplotní délkové roztažnosti.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnat mechanické, fyzikální a tepelné vlastnosti dvou kompozitních materiálů (Relanex, Remikakit) za pomoci vybraných zkoušek a analyzovat vliv rozdílného složení na výsledné vlastnosti kompozitu. Podstatou práce byl experiment, jenž se skládal z přípravy vzorků na jednotlivá měření a samotného měření. Pro tento experiment byly vybrány mechanické zkoušky jako měření pevnosti v tahu, měření pevnosti v ohybu, měření rázové houževnatosti a měření tvrdosti. Dále obsahoval měření hustoty jako zástupce fyzikálních vlastností a také měření tepelných vlastností za pomoci termických analýz, které nám pomáhají určit chování kompozitních materiálů za zvýšených teplot, protože jejich vlastnosti jsou značně teplotně závislé. Výsledkem práce bylo vyhodnocení výsledků z naměřených dat pro oba testované materiály a následné porovnání těchto výsledků z jednotlivých zkoušek měření.

Pro konkrétní porovnání výsledků byla vždy vypočítána průměrná hodnota sledovaného parametru. Pomocí experimentálních metod byly zjištěny následující výsledky měřených materiálů Relanexu a Remikakitu lišící se svými složením. U tahové zkoušky byly vyhodnocovány dva parametry, pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. U obou zmíněných parametrů dosahoval vyšších hodnot materiál Remikakit. Při zkoušce tříbodovým ohybem byla vyhodnocována pevnost v ohybu a také modul pružnosti v ohybu. Zde už však byly výsledky odlišné, kdy průměrná hodnota pevnosti v ohybu byla u vzorků Remikakit vyšší, ale modul pružnosti v ohybu byl znatelnější u vzorku Relanexu. Z těchto výsledků lze usuzovat, že materiál Remikakit je vhodnější k použití v aplikacích, kde je zapotřebí vyšší pevnosti v tahu a ohybu. U výsledků rázové houževnatosti byly rozdílnosti zřetelnější. Při přeražení vzorku Charpyho kladivem měla skleněná tkanina značný vliv na výsledky a hodnota rázové houževnatosti vyšla více jak o polovinu větší než u Remikakitu. U měření tvrdosti metodou Shore byla prokázána větší tvrdost u vzorků Relanexu, a to jak u tvrdoměru A, tak i tvrdoměru D. Tedy i zde měla skleněná tkanina vliv na tvrdost měřeného materiálu. Z hlediska fyzikálních vlastností byl měřen jediný parametr, a to hustota. Dle výrobce materiálů se u vzorku Relanexu hustota neměří. Hustota i přesto toto doporučení změřena byla, a to v souladu se zadáním práce. Tento parametr byl měřen dvakrát, poprvé byl vzorek měřen ve vzduchu a v isopropylalkoholu, podruhé ve vzduchu a ve vodě. Výsledky z obou měření se příliš nelišily a v obou případech vyzněla vyšší hustota pro materiál Relanex.

Pro vyhodnocení výsledků tepelných vlastností sloužily jednotlivé metody termické

analýzy. Z těchto analýz byly získány výsledné termogramy, pomocí nastaveného teplotního programu, z nichž se poté tepelné vlastnosti analyzovaly. Pro měření byly použity metody diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), simultánní termická analýza (STA), dynamická mechanická analýza (DMA) a termomechanická analýza (TMA). Z naměřených DSC termogramů můžeme usuzovat, že tato metoda není vhodná pro zvolené materiály s epoxidovou pryskyřicí, a tudíž i k určení teploty skelného přechodu. Jako další metoda pro určování tepelných vlastností materiálu byla STA, která sloužila k vyhodnocení úbytků hmotnosti při jednotlivých rozkladech, zbytkového materiálu po konci teplotního programu a teploty dekompozice. U vzorků Remikakitu docházelo při jednotlivých rozkladech k větším procentuálním úbytkům hmotnosti, a tím pádem i k větším úbytkům pojiva. Z naměřených hodnot vycházela pro vzorky Remikakitu i vyšší teplota dekompozice tzn., že k rozkladu materiálu dochází při vyšších teplotách než u Relanexu. Zbývající dvě metody DMA a TMA jsou určeny na analýzu teploty skelného přechodu. Metoda DMA je udávána jako citlivější a především přesnější pro analýzu tohoto bodu. Při DMA můžeme určit teplotu skelného přechodu ze tří signálů. V práci je však vyhodnocována pouze ze signálu loss modulus, kdy byla vyhodnocována teplota z maxima píku, což samozřejmě vedlo k přesnějším výsledkům. To je oproti metodě TMA velká výhoda, protože tam byla teplota skelného přechodu vyhodnocována z určitého rozsahu, z tohoto důvodu byla vyšší korektnost přisuzována metodě DMA. Velká výhoda TMA však je, že z výsledných termogramů lze vyhodnocovat koeficient teplotní délkové roztažnosti, což nelze žádnou jinou námi používanou metodou. Koeficient před i po skelné transformaci ve zvoleném intervalu teplot vycházel vyšší vždy pro vzorek Remikakitu. Zmiňovaná teplota skelného přechodu dosahovala vyšších hodnot u vzorků Remikakitu a to u obou metod, které jsou k analýze teploty určeny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SKÁLOVÁ, Jana; MOTYČKA, Vladislav; KOUTSKÝ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010, 232 s. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil; ŠVORCÍK, Václav; VOJTĚCH, Dalibor. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [3] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [4] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [5] JANOVEC, Jiří; CEJP, Jiří; STEIDL, Josef. *Perspektivní materiály*. 2. vyd. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2001, 135 s. ISBN 80-01-02341-9.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 2001, 173 s. ISBN 80-86073-82-3.
- [8] *Composite products: Uhlíková vlákna* [online]. [cit. 13.10.2018]. Dostupné z: <https://www.carbonmax.cz/zpracovani-uhlikovych-vlaken.html>
- [9] CHAWLA, Krishan K. *Composite materials*. V USA 3. vyd. Birmingham: Springer, 2011. ISBN 978-0-387-74364-6.
- [10] DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. *Engineering mechanics of composite materials*. V USA 2. vyd. New York: Oxford University Press, 2006. ISBN 978-0-19-515097-1.
- [11] *Technologie výroby kompozitních materiálů* [online]. [cit. 26.10.2018]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/technologie>
- [12] *Moderní technologie výroby kompozitních dílů* [online]. [cit. 27.10.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-technologie-vyroby-kompozitnich-dilu.html>
- [13] *Plastic: Carbon composite technology* [online]. [cit. 27.10.2018]. Dostupné z: <http://www.plastic.cz>
- [14] *SMC technologie* [online]. [cit. 2.12.2018]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>
- [15] *Mechanické vlastnosti polymerů* [online]. [cit. 25.1.2019]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [16] CAMPO, Alfredo E. *Selection of Polymeric Materials*. V USA 1. vyd. New York: Norwich, 2008. ISBN 978-0-8155-1551-7
- [17] *Druhy mechanického namáhání* [online]. [cit. 23.1.2019]. Dostupné z: <https://www.moodle-trebesin.cz>
- [18] *Elektronická učebnice: Mechanické vlastnosti* [online]. [cit. 28.1.2019]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz>
- [19] JANOVEC, Jiří; CEJP, Jiří. *Nauka o materiálu*. [online]. Fakulta strojní ČVUT [cit. 31.1.2019]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2_struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf
- [20] DRIML, Bohuslav. *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení*. [cit. 2.2.2019]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [21] *Měření hustoty látek* [online]. [cit. 4.2.2019]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~ehejnova/PraktikumA/uloha1.pdf>

- [22] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [23] *Metody termické analýzy* [online]. [cit. 5.2.2019]. Dostupné z: <https://www.sci.muni.cz/chemsekcetgir/termanal.pdf>
- [24] TA Instruments: *Termická analýza* [online]. [cit. 5.2.2019]. Dostupné z: <https://www.tainstruments.com/>
- [25] *Polymery amorfni a semikrystalické* [online]. [cit. 29.3.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani.html>
- [25] *Teplota dekompozice* [online]. [cit. 9.3.2019]. Dostupné z: <https://www.thefreedictionary.com/Decomposition+temperature>
- [27] *Stanovení koeficientu teplotní roztažnosti* [online]. [cit. 9.3.2019]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP1_lab_08.pdf
- [28] *Teplota tavení polymerů* [online]. [cit. 11.3.2019]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP1_lab_06.pdf
- [29] *Krystalizace polymerů* [online]. [cit. 11.3.2019]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP1_lab_03.pdf
- [30] Cogebi, a.s. *Datasheet*. [online]. [cit. 6.4.2019]. Dostupné z: <https://www.cogebi.com/>
- [31] Cogebi, a.s. *Resin Rich izolační systém*. [online]. [cit. 6.4.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9718124-Resin-rich-izolacni-system-pro-vysokonapetova-vicezavitova-civkova-vinuti-tocivych-stroju-tridy-f-155-c.html>
- [32] Proinex Instruments, s.r.o. *Návod k použití - Durometr Shore CV-SHA/SHD*. Ostrava.
- [33] Mettler Toledo: *Thermal Analysis of Polymers* [online]. [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: https://www.mt.com/dam/LabDiv/guides-glen/ta-polymer/TA_Polymers_Selected_Apps_EN.pdf
- [34] KLOUŽKOVÁ, A.; ZEMENOVÁ, P.; KLOUŽEK, J.; PABST, W. *Termická analýza*. [online]. VŠCHT PRAHA 2012 [cit. 9.2.2019]. Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>
- [35] Mettler Toledo: *Metody termické analýzy* [online]. [cit. 11.2.2019]. Dostupné z: [https://www.mt.com/cz/cs/home/search/library.tabs.custom2.html#805314468\(page=\)](https://www.mt.com/cz/cs/home/search/library.tabs.custom2.html#805314468(page=))
- [36] MENTLÍK, V.; PIHERA, J.; POLANSKÝ, R.; PROSR, P.; TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [37] CHEMPOINT – Vědci pro průmysl a praxi: *Termická analýza* [online]. [cit. 15.2.2019]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz>
- [38] Peníze.cz: *Směrodatná odchylka* [online]. [cit. 26.4.2019]. Dostupné z: <https://www.penize.cz/slovník/smerodatna-odchylka>
- [39] *Statistika & My* [online]. [cit. 26.4.2019]. Dostupné z: <https://www.statistikaamy.cz/2017/01/rozptyl-smerodatna-odchylka-a-variacni-koeficient/>
- [40] EHRENSTEIN, Gottfried W.; RIEDEL, Gabriela; TRAWIEL, Pia. *Thermal Analysis of Plastics* [online]. [cit. 13.5.2019]. Dostupné z: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/pdf/10.3139/9783446434141.fm>
- [41] TMA Method: *Glass Transition Temperature of Organic Films* [online]. [cit. 6.5.2019]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/TM/2.4.24.3.pdf>

Přílohy

Příloha 1 – Datasheety k měřeným materiálům + inspekční certifikát měřených vzorků



COGEBI
EXCELLENCE IN MICA

Remikakit 35.004

Consolidation Materials

GENERAL DESCRIPTION Remikakit 35.004 is a thermosetting insulating material, flexible and plastic at room temperatures, sticky at elevated temperatures. It is made of mica paper Remika® (Muscovite) and modified epoxy-novolac resin that are pressed at elevated temperature and pressure to the form of flexible compact plates.

APPLICATIONS Remikakit 35.004 is used for the conductor interlayers and to fill up the holes, like a paste. It is suitable for the production of the medium and large high voltage electric machines, working under the conditions of the thermal insulation class 155°C. Remikakit is processed by being cut and then formed under cold or mildly warm conditions. The viscosity of the bonding agent is reduced at temperature 100°C and the holes and unevenness of the surface are filled. As a rule, Remikakit is fully cured together with the main insulation.

AVAILABILITY Sheets 1000 x 500 mm + 10 mm / - 30 mm
Material is inset by a separation film on both sides that must be removed before using.

STORAGE Max. 3 months at temperature 20 °C
Max. 6 months at temperature 5 °C
Maximum storage and transport temperature is 30 °C

CHARACTERISTICS

Nominal thickness	mm	0,5 - 2,00	IEC 60371-2
Tolerances			
+th. 0,05 - 1,40	mm	± 0,15	
-th. 1,50 - 2,00	%	± 10	
Mica content	%	58 - 70	IEC 60371-2
Bond content	%	30 - 42	IEC 60371-2
Volatile matters	%	≤ 0,8	IEC 60371-2
Density (informative)	g/cm ³	2,3	IEC 60371-2
Curing conditions: shape stability 30 + 40 minutes at temperature 140°C Cured insulation (a model insulation sheet, thickness 0,8 mm) Curing condition: 3 hours at temperature 165 °C, pressure 2 + 3 MPa			
Volume resistivity	Ωm	≥ 10 ¹³	IEC 60093
Loss factor at 1kV/mm and			
23°C	-	≤ 0,015	IEC 60250
130°C	-	≤ 0,800	
155°C	-	≤ 0,250	

Data are average results of laboratory tests conducted under standard procedures and are subject to variation. These do not constitute a warranty or representation for which we assume legal responsibility.

COGEBI sa Huysmanslaan 65 | B-1651 LOT BELGIUM | Phone: +32 233 491 11 | Fax: +32 237 812 09 | Email: mica@cogebi.com | sales@cogebi.com
COGEBI inc. Crosby Road Industrial Park | 14 Faraday Drive DOVER | N.H. 03820-USA | Phone: +1 603 749 68 96 | Fax: +1 603 749 69 58 | E-mail: mica.inc@cogebi.com | sales.inc@cogebi.com
COGEBI a.s. Vozicka 2104 | 390 02 TABOR | CZECH REPUBLIC | Phone: +420 381 281 113 | Fax: +420 381 281 567 | E-mail: mica@cogebi.com | sales@cogebi.com
COGEBI Asia Sdn Bhd 752, No. 3, Jalan Subang 3 -Taman Perindustrian Sungai | Penapa | 47610 Subang Jaya, Selangor | Darul Ehsan - MALAYSIA | Phone: +603 56 35 08 00
 Fax: +603 56 38 21 00 | E-mail: mica.asia@cogebi.com | sales.asia@cogebi.com
COGEBI PRC (China) Shanghai Representative Office | Suite 321, 3/F Apollo Building | 1440 Yanan Road (C), Shanghai | PRC-CHINA | E-mail: mica.china@cogebi.com | sales.china@cogebi.com
ELINAR 143322, Ateptsevo | Naro-Fominsk, Mosco region | RUSSIA | Phone: (495) 509 0316 | Fax: (495) 509 0317 | E-mail: holding@elinar.ru



COGEBI
EXCELLENCE IN MICA

Relanex 45.033, 45.033 S

Resin Rich Materials

GENERAL DESCRIPTION Relanex 45.033 and 45.033 S are insulating materials, flexible at room temperatures, plastic and sticky at elevated temperatures. They are made of uncalcined mica paper Remika® (Muscovite) and a glass cloth, bonded together with epoxy-novolac resin. Relanex 45.033 is delivered without any separation film. Relanex 45.033 S is inset by a separation film that must be removed before using.

APPLICATIONS Relanex 45.033, 45.033 S is used in Resin Rich insulating systems for the insulation of coils and bars of the electric machines with an operating voltage of up to 24 kV, working under the conditions of the thermal insulation class 155°C. The coils (bars) are insulated by winding of the tape, usually with a 50% overlap in the necessary number of layers. The insulation acquires its final properties after the curing at elevated pressure and temperature.

AVAILABILITY

Relanex 45.033 S

Tapes widths from 15 mm upwards except thickness 0,28 mm
standard widths: 15, 20, 25, 30 mm
width tolerance up to 20 mm: ± 0,5 mm, over 20 mm: ± 1,0 mm
inside diameter of core: 55 mm
standard lengths: 50, 100 m

Rolls width: 1000 mm ± 30 mm except thickness 0,28 mm
width for thickness 0,28 mm: 980 mm ± 30 mm
inside diameter of core: 150 mm
max. weight of roll: 30 kg

Relanex 45.033

Tapes widths from 15 mm upwards except thickness 0,28 mm
standard widths: 15, 20, 25, 30 mm
width tolerance up to 20 mm: ± 0,5 mm, over 20 mm: ± 1,0 mm
inside diameter of core: 55 mm
standard lengths: 50, 100 m

STORAGE

Max. 6 months at temperature 20°C
Max. 12 months at temperature 5°C
Max. storage and transport temperature is 30°C

CHARACTERISTICS

		0,22 ± 0,035	0,24 ± 0,035	IEC 60371-2
Nominal thickness	mm			
Total substance	g/m ²	301 ± 27	331 ± 33	IEC 60371-2
Mica content	g/m ²	160 ± 12	180 ± 12	IEC 60371-2
Glass content	g/m ²	33 ± 2	33 ± 2	IEC 60371-2
Bond content	g/m ²	108 ± 13	118 ± 25	IEC 60371-2
Volatile matters	%	≤ 0,8	≤ 0,8	IEC 60371-2
Tensile strength	N/cm	≥ 150	≥ 150	IEC 60371-2

Data are average results of laboratory tests conducted under standard procedures and are subject to variation. These do not constitute a warranty or representation for which we assume legal responsibility.

1/2

COGEBI sa Huysmanstaen 65 | B-1651 LOT BELGIUM | Phone: +32 233 491 11 | Fax: +32 237 812 09 | Email: mica@cogebi.com | sales@cogebi.com
COGEBI Inc. Crosby Road Industrial Park | 14 Faraday Drive DOVER | N.H. 03820-USA | Phone: +1 603 749 68 96 | Fax: +1 603 749 69 58 | E-mail: mica.inc@cogebi.com | sales.inc@cogebi.com
COGEBI a.s. Vozicka 2104 | 390 02 TABOR | CZECH REPUBLIC | Phone: +420 381 281 113 | Fax: +420 381 281 567 | E-mail: mica@cogebi.com | sales@cogebi.com
COGEBI Asia Sdn Bhd 752, No. 3, Jalan Subang 3 -Taman Perindustrian Sungai | Penaga | 47610 Subang Jaya, Selangor | Darul Ehsan - MALAYSIA | Phone: +603 56 35 06 00
 Fax: +603 56 38 21 00 | E-mail: mica.asia@cogebi.com | sales.asia@cogebi.com
COGEBI PRC (China) Shanghai Representative Office | Suite 321, 3/F Apollo Building | 1440 Yanan Road (C), Shanghai | PRC-CHINA | E-mail: mica.china@cogebi.com | sales.china@cogebi.com
ELINAR 143322, Ateptsevo | Naro-Fominsk, Mosco region | RUSSIA | Phone: (495) 509 0316 | Fax: (495) 509 0317 | E-mail: holding@elinar.ru



COGEBI
EXCELLENCE IN MICA

Relanex 45.033, 45.033 S

Resin Rich Materials

CHARACTERISTICS

Nominal thickness	mm	0,25 ± 0,025	0,28 ± 0,035	IEC 60371-2
Total substance	g/m ²	350 ± 30	423 ± 35	IEC 60371-2
Mica content	g/m ²	180 ± 18	250 ± 20	IEC 60371-2
Glass content	g/m ²	50 ± 3	33 ± 2	IEC 60371-2
Bond content	g/m ²	120 ± 15	140 ± 20	IEC 60371-2
Volatile matters	%	≤ 0,8	≤ 0,8	IEC 60371-2
Tensile strength	N/cm	≥ 180	≥ 150	IEC 60371-2

Curing conditions: 0,5 + 8 hours* at 130 + 180 °C and 1,5 + 3 MPa
 Minimum curing condition: 20 minutes* at 165 °C and 1,5 + 3 MPa
 Recommended curing condition: 1 hour* at 165 °C and 1,5 + 3 MPa
 (*after the material has achieved the curing temperature)
 Maximum qualities are achieved after 3 hours at 165 °C.

Properties after curing process (a model insulation sheet, thickness 1 mm)

Curing process: 3 hours at temperature 165 °C and pressure (after reaching temperature 110 ± 10 °C) 1 MPa.

Volume resistivity	Ωm	≥ 1.10 ¹²	IEC 60093
Loss factor at 1kV/mm and	23 °C	≤ 0.01*	IEC 60250
	130 °C	≤ 0.04*	
	155 °C	≤ 0.10*	
Dielectric strength	kV/mm	≥ 35	IEC 60371-2
Flexural strength	MPa	≥ 150	IEC 60371-2
Tracking resistance - from side of glass cloth - from side of mica paper	CTI	475	IEC 60112
		200	
Thermal conductivity (informative)	W/m.K	0,2	
Coefficient of linear expansion	1/K	(1 + 10) · 10 ⁻⁶	

Data are average results of laboratory tests conducted under standard procedures and are subject to variation. These do not constitute a warranty or representation for which we assume legal responsibility.

2/2

COGEBI sa Huysmanslaan 65 | B-1651 LOT BELGIUM | Phone: +32 233 491 11 | Fax: +32 237 812 09 | Email: mica@cogebi.com | sales@cogebi.com
COGEBI Inc. Crosby Road Industrial Park | 14 Faraday Drive DOVER | N.H. 03820-USA | Phone: +1 603 749 88 96 | Fax: +1 603 749 69 58 | E-mail: mica.inc@cogebi.com | sales.inc@cogebi.com
COGEBI a.s. Vozicka 2104 | 390 02 TABOR | CZECH REPUBLIC | Phone: +420 381 281 113 | Fax: +420 381 281 567 | E-mail: mica@cogebi.com | sales@cogebi.com
COGEBI Asia Sdn Bhd 752, No. 3, Jalan Subang 3 -Taman Perindustrian Sungai | Penaga | 47610 Subang Jaya, Selangor | Darul Ehsan - MALAYSIA | Phone: +603 56 35 08 00
 Fax: +603 56 38 21 00 | E-mail: mica.asia@cogebi.com | sales.asia@cogebi.com
COGEBI PRC (China) Shanghai Representative Office | Suite 321, 3/F Apollo Building | 1440 Yanan Road (C), Shanghai | PRC-CHINA | E-mail: mica.china@cogebi.com | sales.china@cogebi.com
ELINAR 143322, Aleptsevo | Naro-Fominsk, Mosco region | RUSSIA | Phone: (495) 509 0316 | Fax: (495) 509 0317 | E-mail: holding@elinar.ru

	COGEBI EXCELLENCE IN MICA	27/17
Inspekční certifikát EN 10204 3.1		
Zákazník:	ZČU Plzeň	
Vaše objednávka:	Vzorky	Naše objednávka: Vzorky

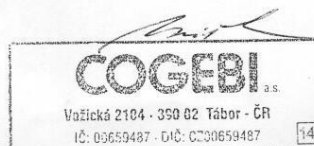
Výrobek: Relanex 45.033S 0,22 x 1030 mm (ID76)
Množství: 14 m

Katalogové hodnoty:		nominál	min.	max.	Naměřené hodnoty
Role č.					700005
Tloušťka	[mm]	0,220	0,185	0,255	0,208
Obsah pojiva	[g.m ⁻²]	108,000	95,000	121,000	101,800
Plošná hmotnost	[g.m ⁻²]	301,000	274,000	328,000	300,500
Tékaviny	[%]			0,8	0,283
Elektrická pevnost	[kV.mm ⁻¹]		35,000		91,700
Ztrátový činitel tg δ (E=1 kV.mm ⁻¹)	[Ω.m]				
23°C				0,01	0,002
130°C				0,04	0,011
155°C				0,1	0,029

Výrobek: RTK 45.205 0,15 x 1040 mm (ID76)
Množství: 20 m

Katalogové hodnoty:		nominál	min.	max.	Naměřené hodnoty
Role č.					600179
Obsah pojiva	[g.m ⁻²]	95,000	85,000	105,000	100,000
Plošná hmotnost	[g.m ⁻²]	255,000	245,000	265,000	257,600
Tékaviny	[%]			0,8	0,077

Tábor, 22.2.2017



Příloha 2 – Naměřené a vypočítané hodnoty měření zkoušky tahem

Tabulka P.2.1: Naměřené hodnoty měření zkoušky tahem

Jednotlivé měření								
REL D1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
a [mm]	0,56	0,55	0,56	0,56	0,55	0,54	0,55	0,54
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
S [mm²]	3,36	3,3	3,36	3,36	3,3	3,24	3,3	3,24
F_{max}[N]	417,41	487,37	494,86	506,84	475,14	396,57	498,52	550,84
R_m[MPa]	124,23	147,69	147,28	150,84	143,98	122,4	151,07	166,92
E [MPa]	4186,17	3513,18	3979,62	3770,62	3879,77	4055,94	3734,44	4038,25
Jednotlivé měření								
REL D2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
a [mm]	0,55	0,56	0,54	0,55	0,54	0,53	0,54	0,55
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
S [mm²]	3,3	3,36	3,24	3,3	3,24	3,18	3,24	3,3
F_{max}[N]	494,63	431,23	432,35	441,09	584,8	599,41	482,94	593,15
R_m[MPa]	149,89	128,34	131,02	136,14	180,49	188,49	149,06	179,74
E [MPa]	4183,37	3922,86	3548,85	4166,47	4196,2	4127,19	4171,45	4209,33
Jednotlivé měření								
REL H1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	
a [mm]	0,55	0,56	0,58	0,57	0,59	0,57	0,56	
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	
S [mm²]	3,3	3,36	3,48	3,42	3,54	3,42	3,36	
F_{max}[N]	707,28	576,51	417,99	465,69	387,38	391,33	423,36	
R_m[MPa]	181,35	171,58	120,11	133,82	113,27	114,42	126	
E [MPa]	3545,98	4057,9	3669,75	3760,52	3930,63	3948,87	3806,03	
Jednotlivé měření								
REL H2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
a [mm]	0,55	0,54	0,53	0,54	0,55	0,55	0,54	0,55
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
S [mm²]	3,3	3,24	3,18	3,24	3,3	3,3	3,24	3,3
F_{max}[N]	662,37	503,72	585,57	515,45	393,97	441,09	579,37	513,04
R_m[MPa]	200,72	155,47	184,14	159,09	119,38	133,66	178,82	155,47
E [MPa]	4391,5	4010,17	4033,23	4172,27	3958,15	4046,17	3963,45	4040,51
Jednotlivé měření								
RTK D1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.

a [mm]	0,54	0,55	0,53	0,54	0,54	0,55	0,55	0,54
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
S [mm²]	3,24	3,3	3,18	3,24	3,24	3,3	3,3	3,24
F_{max}[N]	456,31	446,9	484,32	440,51	521,71	384,07	435,4	592,73
R_m[MPa]	152,1	135,42	152,3	135,96	161,02	118,54	131,94	182,94
E [MPa]	3958,18	3889,31	3961,85	4106,83	3981,46	3934,24	3740,66	4196,07
Jednotlivé měření								
RTK D2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
a [mm]	0,53	0,53	0,54	0,55	0,55	0,54	0,53	0,54
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
S [mm²]	3,18	3,18	3,24	3,3	3,3	3,24	3,18	3,24
F_{max}[N]	683,86	550,01	458,27	489,2	705,7	459,49	398,75	553,99
R_m[MPa]	215,05	172,96	141,44	148,24	213,85	141,82	125,39	170,99
E [MPa]	4374,76	3819,33	4097,52	3862,49	4218,98	4190,1	4148,61	3967,69
Jednotlivé měření								
RTK H1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
a [mm]	0,5	0,51	0,52	0,51	0,5	0,52	0,52	0,53
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
S [mm²]	3	3,06	3,12	3,06	3	3,12	3,12	3,18
F_{max}[N]	378,16	667,41	602,14	468,9	463,09	423,97	741,97	566,42
R_m[MPa]	126,05	218,11	192,99	153,24	154,36	135,89	237,81	178,12
E [MPa]	4064,9	4312,61	4037,98	4325,96	4433,57	3651,91	4395,68	4082,58
Jednotlivé měření								
RTK H2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
a [mm]	0,53	0,53	0,54	0,53	0,52	0,52	0,53	0,52
b [mm]	6	6	6	6	6	6	6	6
S [mm²]	3,18	3,18	3,24	3,18	3,12	3,12	3,18	3,12
F_{max}[N]	630,25	511,24	503,47	492,58	593,34	457,89	552,00	403,06
R_m[MPa]	198,19	160,77	155,39	154,9	190,17	146,76	173,59	129,18
E [MPa]	3690,81	4124,14	3979,15	4159,69	4261,52	4250,19	4124,94	3808,39

Tabulka P.2.2: Vypočítané hodnoty zkoušky tahem

Vypočítané hodnoty pro pevnost v tahu			
Vzorky	Průměrná pevnost v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1	144,30	13,71	9,50
REL D2	155,40	22,6	14,54
REL H1	137,22	25,75	18,79
REL H2	160,84	24,94	15,50
RTK D1	146,28	18,81	12,86
RTK D2	166,22	31,47	18,93
RTK H1	174,57	37,01	21,20
RTK H2	163,62	21,28	13,00
Vypočítané hodnoty pro modul pružnosti v tahu			
Vzorky	Průměrný modul pružnosti v tahu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1	3894,75	201,75	5,18
REL D2	4065,72	213,35	5,25
REL H1	3817,10	163,35	4,28
REL H2	4076,93	134,01	3,29
RTK D1	3971,08	127,74	3,22
RTK D2	4084,94	177,13	4,34
RTK H1	4163,15	242,18	5,82
RTK H2	4049,85	193,77	4,78

Příloha 3 – Naměřené a vypočítané hodnoty měření zkoušky tříbodovým ohybem

Tabulka P.3.1: Naměřené hodnoty měření zkoušky tříbodovým ohybem

Jednotlivé měření									
REL D1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	
l [mm]	80	80,1	80,24	80,03	80,32	80,4	80,48	80,65	
h [mm]	0,538	0,545	0,535	0,525	0,535	0,531	0,54	0,541	
b [mm]	9	8,9	9,65	8,5	9,1	8,6	9,8	10,1	
S [mm ²]	4,84	4,85	5,16	4,46	4,87	4,57	5,29	5,46	
F _{max} [N]	11,76	11,66	13,18	10,51	10,48	11,57	13,58	12,95	
R _{m0} [MPa]	336,18	337,1	351,3	343	296,16	345,9	356,3	329,77	
E [MPa]	61516,41	66975,5	62643,76	70186,94	60945,17	67327,39	66302,85	67244,29	
Jednotlivé měření									
REL D2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
l [mm]	80,76	80,75	80,8	80,8	80,7	80,72	80,71	80,78	80,8
h [mm]	0,532	0,533	0,528	0,531	0,523	0,52	0,527	0,531	0,533
b [mm]	8,9	9,18	8,92	9,18	9,31	8,81	8,99	8,9	9
S [mm ²]	4,73	4,89	4,71	4,87	4,87	4,58	4,74	4,73	4,80
F _{max} [N]	11,24	11,63	10,87	11,3	11,99	11,73	11,07	10,05	10,77
R _{m0} [MPa]	337,09	338,31	325,48	328,72	357,34	355,51	328,82	301,5	319,66
E [MPa]	58837,46	67991,17	70133,78	65232,14	67874,74	67797,46	63421,55	68354,65	67672,24
Jednotlivé měření									
REL H1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
l [mm]	81,1	81,2	81,3	81,1	81,2	81,3	81,35	81,3	81,32
h [mm]	0,54	0,535	0,533	0,531	0,548	0,531	0,532	0,536	0,531
b [mm]	9	9,07	9,35	9,5	8,8	9,02	8,85	9,05	9,25
S [mm ²]	4,86	4,85	4,98	5,04	4,82	4,79	4,71	4,85	4,91
F _{max} [N]	10,91	11,07	11,27	11,27	10,25	11,07	10,38	11,14	11,14
R _{m0} [MPa]	311,69	313,69	321,81	316,73	288,72	327,73	313,15	316,53	321,48
E [MPa]	67624,88	66234,83	65445,96	67560,26	59334,8	69028,41	66225,84	60887,37	70450,05
Jednotlivé měření									
REL H2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
l [mm]	79,9	79,85	79,7	79,77	79,9	79,91	79,99	80,3	80,45
h [mm]	0,52	0,523	0,525	0,521	0,522	0,518	0,518	0,52	0,515
b [mm]	8,82	9,07	8,76	9,3	9,03	9,33	8,85	9,25	9,18
S [mm ²]	4,59	4,74	4,60	4,85	4,71	4,83	4,58	4,81	4,73
F _{max} [N]	10,15	10,38	10,74	10,41	10,38	10,58	10,21	10,97	10,08
R _{m0} [MPa]	319,16	317,42	340,13	310,55	318,82	314,45	320,14	329,02	316,71
E [MPa]	68619,73	70537,91	70731,53	64300,12	62674,54	70785,45	65273,27	69920,68	66440,04
Jednotlivé měření									
RTK D1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
l [mm]	80,6	80,16	80,45	80,27	80,44	80,4	80,23	80,13	80,31

h [mm]	0,536	0,537	0,528	0,518	0,539	0,53	0,532	0,531	0,522
b [mm]	9,4	9	9,3	9,31	9,01	9,2	8,93	8,91	9,3
S [mm²]	5,04	4,83	4,91	4,82	4,86	4,88	4,75	4,73	4,85
F_{max}[N]	12,55	11,43	12,55	12,29	11,07	11,7	11,24	11,43	12,42
R_{m0}[MPa]	343,51	326,76	360,43	366,17	316,05	339,49	335,96	342,63	370,5
E [MPa]	59041,68	59147,51	62627,86	64166,9	57868,99	59268,83	60192,78	59607,04	64500,95
Jednotlivé měření									
RTK D2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
l [mm]	79,3	79,6	79,9	80	79,8	79,6	79,68	79,66	79,82
h [mm]	0,529	0,518	0,516	0,517	0,52	0,518	0,515	0,52	0,515
b [mm]	8,65	9	9,35	9,1	9,15	9,31	8,9	8,87	9,4
S [mm²]	4,58	4,66	4,82	4,70	4,76	4,82	4,58	4,61	4,84
F_{max}[N]	11,1	11,4	11,24	10,81	12,03	9,92	11,8	11,8	10,81
R_{m0}[MPa]	342,76	351,37	333,32	329,43	364,58	295,49	382,19	368,88	331,54
E [MPa]	59994,43	66751,17	61478,03	62770,17	62875,18	62045,76	66569,42	65249,19	65153,85
Jednotlivé měření									
RTK H1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
l [mm]	80,2	80,22	80,4	80,36	80,6	80,7	80,66	80,8	80,65
h [mm]	0,54	0,535	0,54	0,545	0,546	0,548	0,544	0,549	0,551
b [mm]	8,88	8,85	9,6	9,1	8,9	9,47	8,7	8,71	9,25
S [mm²]	4,80	4,73	5,18	4,96	4,86	5,19	4,73	4,78	5,10
F_{max}[N]	10,31	12,22	12,69	10,87	10,91	12,65	11,17	11,76	11,43
R_{m0}[MPa]	334,91	355,28	339,89	296,26	303,84	331,27	330,24	334,86	306,47
E [MPa]	75882,94	62739,47	62121,34	61338,53	60055,03	58526,54	63836,22	61491,46	60365,94
Jednotlivé měření									
RTK H2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
l [mm]	80,55	80,32	80,5	80,62	80,61	80,78	80,64	80,61	80,58
h [mm]	0,526	0,526	0,517	0,518	0,522	0,515	0,516	0,516	0,518
b [mm]	8,9	8,44	8,87	9,48	9,26	8,9	9	8,92	9,31
S [mm²]	4,68	4,44	4,59	4,91	4,83	4,58	4,64	4,60	4,82
F_{max}[N]	10,81	10,15	10,38	11,24	11,1	10,87	10,74	10,97	11,01
R_{m0}[MPa]	324,24	321,06	324,57	328,75	332,62	352,3	331,06	341,2	327,89
E [MPa]	67108,1	67072,23	69680,36	66237,72	65404,18	71537,77	65661,84	66652,28	66095,95

Tabulka P.3.2: Vypočítané hodnoty měření zkoušky třibodovým ohybem

Vypočítané hodnoty pro pevnost v tahu			
Vzorky	Průměrná pevnost v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1	336,96	17,37	5,15
REL D2	332,49	16,34	4,92
REL H1	314,61	10,33	3,28
REL H2	320,71	8,31	2,59
RTK D1	344,61	17,08	4,96
RTK D2	344,40	24,47	7,11
RTK H1	325,89	18,29	4,78
RTK H2	331,52	9,18	2,77
Vypočítané hodnoty pro modul pružnosti v tahu			
Vzorky	Průměrný modul pružnosti v ohybu [MPa]	Směrodatná odchylka σ [MPa]	Variační koeficient v [%]
REL D1	65392,79	3079,22	4,71
REL D2	66368,35	3222,46	4,86
REL H1	65865,82	3413,43	5,18
REL H2	67698,14	2921,80	4,32
RTK D1	60713,62	2281,73	3,76
RTK D2	63654,13	2235,76	3,51
RTK H1	62928,61	4808,82	7,64
RTK H2	67272,27	1914,33	2,85

Příloha 4 – Vypočítané hodnoty rázové houževnatosti

Tabulka P.4.1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro měření rázové houževnatosti jednotlivých vzorků

Jednotlivé měření									
REL D1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,532	0,529	0,531	0,516	0,525	0,528	0,527	0,525	0,528
b [mm]	11,2	10	9,7	9,2	9	9,25	9,05	9,27	9,3
S [mm ²]	5,958	5,29	5,151	4,747	4,725	4,884	4,77	4,867	4,91
A [J]	0,171	0,151	0,145	0,12	0,14	0,151	0,141	0,14	0,139
a[J/mm ²]	0,0287	0,02854	0,02815	0,02528	0,02963	0,03092	0,02956	0,02877	0,02831
Jednotlivé měření									
REL D2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,521	0,518	0,52	0,527	0,526	0,523	0,524	0,521	0,522
b [mm]	10,96	9,72	8,81	9,04	9,28	9,2	9,25	9,18	9,06
S [mm ²]	5,71	5,035	4,581	4,764	4,881	4,811	4,847	4,783	4,729
A [J]	0,16	0,123	0,115	0,141	0,142	0,139	0,138	0,137	0,131
a[J/mm ²]	0,02802	0,02443	0,0251	0,0296	0,02909	0,02889	0,02847	0,02864	0,0277
Jednotlivé měření									
REL H1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,545	0,549	0,544	0,539	0,529	0,531	0,528	0,529	0,53
b [mm]	10,25	10,15	9,3	9,1	9,1	8,9	8,95	9,08	9,3
S [mm ²]	5,586	5,572	5,059	4,905	4,814	4,726	4,726	4,803	4,929
A [J]	0,169	0,161	0,154	0,153	0,14	0,142	0,14	0,138	0,139
a[J/mm ²]	0,03025	0,02889	0,03044	0,03119	0,02908	0,03005	0,02962	0,02873	0,0282
Jednotlivé měření									
REL H2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,547	0,542	0,535	0,529	0,527	0,52	0,524	0,523	0,524
b [mm]	10,98	10,5	9,07	9,09	9,32	9,15	8,87	8,83	9,68
S [mm ²]	6,006	5,691	4,852	4,808	4,912	4,758	4,648	4,618	5,072
A [J]	0,179	0,168	0,141	0,12	0,122	0,121	0,13	0,129	0,14
a[J/mm ²]	0,0298	0,02952	0,02906	0,02496	0,02484	0,02543	0,02797	0,02793	0,0276
Jednotlivé měření									
RTK D1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,549	0,532	0,535	0,529	0,547	0,534	0,54	0,535	0,534
b [mm]	9,1	9	9,2	8,95	9,3	8,3	9,2	8,7	8,9
S [mm ²]	4,996	4,788	4,922	4,735	5,087	4,432	4,968	4,655	4,753
A [J]	0,068	0,064	0,066	0,063	0,07	0,06	0,068	0,063	0,062
a[J/mm ²]	0,01361	0,01337	0,01341	0,01331	0,01376	0,01354	0,01369	0,01353	0,01304
Jednotlivé měření									

RTK D2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,524	0,532	0,525	0,533	0,531	0,527	0,522	0,522	0,521
b [mm]	9,9	9,9	8,9	9,4	8,9	8,95	9,1	9,25	9,1
S [mm²]	5,188	5,267	4,673	5,01	4,726	4,717	4,75	4,829	4,74
A [J]	0,072	0,073	0,062	0,069	0,068	0,064	0,069	0,071	0,07
a[J/mm²]	0,01388	0,01386	0,01327	0,01377	0,01439	0,01357	0,01452	0,0147	0,01477
Jednotlivé měření									
RTK H1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,49	0,508	0,521	0,528	0,529	0,534	0,535	0,534	0,537
b [mm]	11	9,2	8,93	9,1	8,85	9	9,35	9	9,3
S [mm²]	5,39	4,674	4,653	4,805	4,682	4,806	5,002	4,806	4,994
A [J]	0,07	0,061	0,062	0,065	0,061	0,063	0,064	0,065	0,066
a[J/mm²]	0,01299	0,01305	0,01332	0,01353	0,01303	0,01311	0,01279	0,01352	0,01322
Jednotlivé měření									
RTK H2	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
h [mm]	0,522	0,524	0,528	0,517	0,519	0,521	0,524	0,523	0,531
b [mm]	10,95	10	9,05	9,1	9,09	8,95	8,83	9,35	8,9
S [mm²]	5,716	5,24	4,778	4,705	4,718	4,663	4,627	4,89	4,726
A [J]	0,072	0,07	0,062	0,062	0,061	0,062	0,061	0,064	0,062
a[J/mm²]	0,0126	0,01336	0,01298	0,01318	0,01293	0,0133	0,01318	0,01309	0,01312

Tabulka P.4.2: Vypočítané hodnoty průměrné rázové houževnatosti, směrodatné odchytky a variačního koeficientu jednotlivých vzorků Relanex a Remikakit

Vzorky	Průměrná rázová houževnatost a [J/mm²]	Směrodatná odchytky σ [J/mm²]	Variační koeficient v [%]
REL D1	0,02865	0,00144	5,02618
REL D2	0,02777	0,00170	6,12171
REL H1	0,02961	0,00090	3,03951
REL H2	0,02746	0,00183	6,66424
RTK D1	0,01347	0,00021	1,55902
RTK D2	0,01408	0,00050	3,55114
RTK H1	0,01317	0,00023	1,74639
RTK H2	0,01308	0,00021	1,60550

Příloha 5 – Naměřené a vypočítané hodnoty měření tvrdosti metodou Shore A a Shore D

Tabulka P.5.1: Naměřené hodnoty měření tvrdosti

Jednotlivé měření (metoda Shore A)								
Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
REL D1	97	97	96	96,5	96	96,5	96,5	97
REL D2	97	97,5	97	97,5	96,5	96	97	97,5
REL H1	96	96,5	96,5	97	97	96,5	97	97,5
REL H2	96,5	97	95,5	97	96,5	97	96,5	97
RTK D1	95	95,5	94,5	95	95	95,5	96	95
RTK D2	96	95,5	95	96	96,5	96	95,5	95
RTK H1	95	95	95,5	96	94,5	95	96	95
RTK H2	95	95,5	96	94,5	95	96	95,5	95,5
Jednotlivé měření (metoda Shore D)								
Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
REL D1	84	83,5	85	84	84,5	83,5	84	83
REL D2	85	83,5	84	83,5	84	83,5	84	84,5
REL H1	83,5	83	83,5	84,5	83,5	84,5	84	83,5
REL H2	83	84,5	85	83,5	84,5	83,5	84,5	84
RTK D1	83	83,5	82,5	82	83	84,5	83	82,5
RTK D2	82,5	82,5	83	83,5	82	83	82,5	83,5
RTK H1	83,5	82,5	82	84	83,5	83	82,5	83,5
RTK H2	82	83	82,5	84	83,5	84	83,5	82,5

Tabulka P.5.2: Vypočítané hodnoty měření tvrdosti

Vypočítané hodnoty pro metodu Shore A			
Vzorky	Průměrná tvrdost [-]	Směrodatná odchylka σ [-]	Variační koeficient v [%]
REL D1	96,563	0,39031	0,40421
REL D2	97	0,5	0,51546
REL H1	96,75	0,43301	0,44756
REL H2	96,625	0,48412	0,50103
RTK D1	95,188	0,42848	0,45014
RTK D2	95,688	0,49608	0,51843
RTK H1	95,25	0,5	0,52493
RTK H2	95,375	0,48412	0,5076
Vypočítané hodnoty pro metodu Shore D			
Vzorky	Průměrná tvrdost [-]	Směrodatná odchylka σ [-]	Variační koeficient v [%]
REL D1	83,938	0,58296	0,69451
REL D2	84	0,5	0,59524
REL H1	83,75	0,5	0,59701
REL H2	84,063	0,63431	0,75457
RTK D1	83	0,70711	0,85194
RTK D2	82,813	0,49608	0,59904
RTK H1	83,063	0,63431	0,76365
RTK H2	83,125	0,69597	0,83726

Příloha 6 – Výsledky měření hustoty

Tabulka P.6: Výsledky měření hustoty

Měření hustoty ve vzduchu a v isopropylalkoholu			
	m₁[g]	m₂[g]	ρ [g/cm³]
REL D1	0,37956	0,22025	1,87266
REL D2	0,51622	0,29902	1,86809
REL H1	0,23412	0,13928	1,9403
REL H2	0,54852	0,3223	1,90583
RTK D1	0,56131	0,32959	1,90398
RTK D2	0,19175	0,11265	1,90538
RTK H1	0,25017	0,14367	1,8463
RTK H2	0,17656	0,10286	1,88322
Měření hustoty ve vzduchu a ve vodě			
	m₁[g]	m₂[g]	ρ [g/cm³]
REL D1	0,28239	0,13189	1,87635
REL D2	0,23491	0,10899	1,86555
REL H1	0,20912	0,09786	1,87956
REL H2	0,1777	0,08689	1,95039
RTK D1	0,30585	0,14568	1,90953
RTK D2	0,21863	0,10201	1,87472
RTK H1	0,22841	0,1027	1,81696
RTK H2	0,18008	0,07694	1,74598

Příloha 7 – Výsledky měření termických analýz

Tabulka P.7.1: Naměřené hodnoty teploty dekompozice metodou STA

Vzorky	Teplota dekompozice [°C]
REL D1	386,40
REL D2	385,20
REL H1	383,84
REL H2	384,89
RTK D1	395,19
RTK D2	394,38
RTK H1	393,95
RTK H2	395,37

Tabulka P.7.2: Naměřené hodnoty teploty skelného přechodu metodou DMA

Vzorky	Teplota skelného přechodu [°C]
REL D1	181,10
REL D2	183,17
REL H1	181,99
REL H2	185,44
RTK D2	187,88
RTK H1	188,50
RTK H2	191,57

Tabulka P.7.3: Naměřené hodnoty teploty skelného přechodu a koeficientu teplotní délkové roztažnosti metodou TMA

Vzorky	Teplota skelného přechodu [°C]	Koeficient teplotní délkové roztažnosti [ppm/°C] (48-88 °C)	Koeficient teplotní délkové roztažnosti [ppm/°C] (184-222 °C)
REL D1	147,49	62,35	115,50
REL D2	150,02	64,51	115,10
REL H1	148,53	64,74	113,40
REL H2	150,11	57,37	115,00
RTK D1	162,23	64,38	150,80
RTK D2	160,05	71,74	157,30
RTK H1	158,63	63,03	158,40
RTK H2	159,99	74,11	151,70