

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Diagnostický systém kompozitních materiálů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš JANDERA**  
Osobní číslo: **E13N0009P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostický systém kompozitních materiálů**  
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. Uvedte přehled kompozitních materiálů aplikovatelných v silnoproudé elektrotechnice
2. Stanovte význam jednotlivých složek kompozitů pro jejich finální vlastnosti
3. Určete diagnostický systém pro sledování vlastností kompozitů

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN Praha 2006
2. Mentlík, V., et all: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008


Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

**Abstrakt**

Předmětem diplomové práce „Diagnostický systém kompozitních materiálů“ je vypracování přehledu kompozitních materiálů aplikovatelných v silnoproudé elektrotechnice, stanovení významu jednotlivých složek kompozitů a určení diagnostického systému. Začátek práce je věnován definici kompozitů a jejich dělení podle disperzní fáze, typu matrice a tvaru disperze. Poté je popsán význam jednotlivých složek (matrice, výztuž, plnivo) podle použitého materiálu. Dále je uveden přehled aplikace kompozitů v silnoproudé elektrotechnice. Závěrečná část práce je věnována stanovení diagnostického systému a návrhu optimálního rozložení laboratorních a administrativních pracovišť s využitím metod průmyslového inženýrství.

**Klíčová slova**

kompozitní materiály, vlákna, synergie, matrice, plnivo, diagnostický systém, průmyslové inženýrství, laboratoř

**Abstract**

The diploma thesis „Diagnostic system of Composite Materials“ is focused on an overview of composite materials applicable in power electrical engineering, assessing the significance of each component of composite and the determination of the diagnostic system. The beginning of the thesis is aimed at providing definition of composites and dividing them by dispersed phase, type of matrix and shape of dispersed phase. Then the significance of the each component (matrix, reinforcement, filler) is described by materials used. Next an overview of composites applicable in power electrical engineering is mentioned. The final part of the thesis is focused on determination of the diagnostic system and the design of laboratory and administrative room layouts using methods of industrial engineering.

**Key words**

composite materials, fibers, synergy, matrix, filler, diagnostic system, industrial engineering, laboratory

## **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 28.4.2015

Tomáš Jandera

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Velký dík patří i mým rodičům za trvalou podporu během celého studia.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>14</b>
1.1 DEFINICE A CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	15
1.2 DĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	16
1.2.1 Dělení dle disperzní fáze .....	16
1.2.2 Dělení dle typu matrice .....	17
1.2.3 Dělení dle tvaru disperze .....	17
1.3 SYNERGICKÝ EFEKT .....	19
<b>2 VÝZNAM JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK KOMPOZITŮ .....</b>	<b>20</b>
2.1 MATRICE .....	20
2.1.1 Kovová matrice (Metal Matrix Composites) .....	20
2.1.2 Keramická matrice (Ceramic Matrix Composites) .....	22
2.1.3 Polymerní matrice (Polymer Matrix Composites) .....	23
2.1.4 Uhlíková matrice (Carbon Matrix Composites) .....	31
2.2 VÝZTUŽ .....	32
2.2.1 Částicová výztuž .....	32
2.2.2 Vlákenná výztuž .....	34
2.3 PLNIVA .....	43
2.3.1 Slída a slídové výrobky .....	44
2.3.2 Uhlík - saze .....	44
2.4 NANOKOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....	45
2.4.1 Nanoobjekty .....	45
2.4.2 Nanokompozity .....	46
<b>3 KOMPOZITY V SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE .....</b>	<b>48</b>
3.1 DVOUSLOŽKOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....	48
3.1.1 Kartit .....	48
3.1.2 Textit .....	49
3.1.3 Sklotextit .....	50
3.1.4 Tvrzené dřevo .....	50
3.2 TŘÍSLOŽKOVÉ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....	51
3.2.1 VPI - Vakuově tlaková impregnace .....	51
3.2.2 Resin-rich .....	52
3.3 VENKOVNÍ VEDENÍ .....	53
3.3.1 ACCR lana .....	53
3.3.2 ACCC lana .....	53
3.4 KOMPOZITNÍ IZOLÁTORY .....	54



<b>4</b>	<b>DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM.....</b>	<b>55</b>
4.1	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI .....	56
4.2	TEPELNÉ VLASTNOSTI.....	57
4.2.1	Měrná tepelná vodivost.....	57
4.2.2	Tepelná roztažnost .....	57
4.2.3	Teplotní třídy.....	58
4.3	MECHANICKÉ VLASTNOSTI A ZKOUŠKY .....	59
4.3.1	Pevnost v tahu.....	60
4.3.2	Pevnost v ohybu .....	62
4.3.3	Rázová houževnatost.....	63
4.3.4	Tvrdost .....	64
4.4	ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI A ZKOUŠKY .....	65
4.4.1	Polarizace .....	65
4.4.2	Absorpční a resorpční charakteristiky.....	67
4.4.3	Dielektrické ztráty.....	72
4.4.4	Elektrická pevnost.....	75
4.4.5	Částečné výboje .....	76
4.5	STRUKTURÁLNÍ VLASTNOSTI A ZKOUŠKY .....	80
4.5.1	Diferenční termická analýza (DTA).....	81
4.5.2	Termomechanická analýza (TMA).....	82
4.5.3	Dynamická mechanická analýza (DMA) .....	82
4.5.4	Termogravimetrická analýza (TGA).....	84
4.5.5	Infračervená spektroskopie (IR) .....	84
<b>5</b>	<b>LABORATOŘE .....</b>	<b>87</b>
5.1	VŠEOBECNÉ POŽADAVKY .....	87
5.2	APLIKACE METOD PRŮMYSLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ (PI) .....	89
5.2.1	Základní pojmy PI.....	90
5.2.2	Metody PI.....	92
5.3	PROSTOROVÉ ROZVRŽENÍ PRACOVÍŠŤ .....	99
5.3.1	Přípravna vzorků .....	103
5.3.2	Skladovací místnost.....	104
5.3.3	Mechanická zkušebna .....	105
5.3.4	Laboratoř elektrických vlastností .....	106
5.3.5	Laboratoř strukturálních analýz.....	107
5.3.6	Laboratoř pro měření vlastností olejů .....	108
5.3.7	Administrativní prostory.....	109
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>111</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>113</b>

## Seznam symbolů a zkratek

CMC.....	Carbon Matrix Composites
CMC.....	Ceramic Matrix Composites
CMNC.....	Ceramic Matrix Nanocomposites
$C_0$ [F].....	geometrická kapacita kondenzátoru
$E$ [GPa] .....	modul pružnosti v tahu
$E$ [GPa] .....	Youngův model pružnosti
EIS .....	elektroizolační materiál
EIM .....	elektroizolační materiál
$E_p$ [kV/mm].....	elektrická pevnost
EP-R.....	epoxidové pryskyřice
FT.....	Fourierova transformace
$h$ [mm].....	tloušťka materiálu/vzorku
$I$ [A].....	proud
$L$ [mm] .....	rozpětí podpěr
$i_a(t)$ [A].....	absorpční proud
$i_d(t)$ [A].....	dobíjecí proud
$i_v(t)$ [A].....	vodivostní proud
$i_0(t)$ [A].....	nabíjecí proud
$l_c$ .....	kritická délka
$\vec{M}$ [C·m] .....	dipólový moment
MA-R.....	metakrylátové pryskyřice
$m_d$ [kg] .....	hmotnost disperze
$m_h$ [g/cm <sup>3</sup> ] .....	měrná hmotnost
$m_k$ [kg] .....	hmotnost kompozitu
$m_m$ [kg].....	hmotnost matrice
MMC.....	Metal Matrix Composites
MMNC.....	Metal Matrix Nanocomposites
MTM.....	Methods-Time Measurement (metoda předem stanovených časů)
$\vec{P}$ .....	vektor polarizace
PA .....	polyamid
PAI.....	polyamidoimid
PAM.....	polyakrylonitril

PBI .....	polybenzimidazol
PBT .....	polybutylén
PC.....	polykarbonát
PDCA.....	cyklus Plan Do Check Act
PES.....	polyester
PEEK .....	polyaryletherketon
PFA-R .....	fenakrylátové pryskyřice
PI.....	polyimid
PI.....	průmyslové inženýrství
$p_{i1}$ [-] .....	polarizační index v jedné minutě
$p_{i10}$ [-].....	polarizační index v desáté minutě
PMC .....	Polymer Matrix Composites
PMNC .....	Polymer Matrix Nanocomposites
POK .....	polyketon
POM.....	polyoxymetylén
PP .....	polypropylen
PPA .....	polyftalamidy
PPO .....	polyfenyl
PPS.....	polyfenylensulfid
PS.....	polystyren
PVC.....	polyvinylchlorid
$P_z$ [W] .....	ztrátový výkon
$P_{z_{SS}}$ [W].....	ztrátový výkon ve stejnosměrném elektrickém poli
$P_{z_{stř}}$ [W].....	ztrátový výkon ve střídavém elektrickém poli
$q$ [pC].....	zdánlivý náboj impulzu částečného výboje
$R_N$ [ $\Omega$ ] .....	odporová normála
$s$ [mm].....	průhyb
$t_i$ [s] .....	čas výskytu částečného výboje
TPI .....	polyamid
TPM .....	Total Productive Maintenance (totálně produktivní údržba)
$t_v$ [s].....	doba odpojení napětí
UP-R .....	nenасыčené polyesterové pryskyřice
$V_d$ [m <sup>3</sup> ].....	objem disperze

$V_k$ [m <sup>3</sup> ]	..... objem kompozitu
$V_m$ [m <sup>3</sup> ]	..... objem matrice
VSM.....	Value Stream Mapping
$Q_d$ [C]	..... náboj způsobený deformační polarizací
$Q_r$ [C]	..... náboj způsobený relaxační polarizací
$Q_0$ [C]	..... počáteční náboj
$R$ [Ω]	..... izolační odpor
RTE.....	relativní index teplotní odolnosti
$T_g$ [°C]	..... teplota skelného přechodu
$V$ [m <sup>3</sup> ]	..... objem
VE-R .....	vinylesterové pryskyřice
VEU-R .....	vinylesteruretanové pryskyřice
$U_K$ [V]	..... kompenzační napětí
$U_P$ [kV]	..... průrazné napětí
VPI.....	Vacuum Pressure Impregnation (vakuově-tlaková impregnace)
$\alpha$ [F·m <sup>2</sup> ]	..... polarizovatelnost
$\rho$ [Ω·m]	..... rezistivita
$\sigma$ [Pa]	..... napětí v tahu
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	..... hustota
$\varepsilon_f$ [-]	..... deformace ohybem
$\varepsilon_r$ [-]	..... relativní permitivita
$\varepsilon_n$ [-]	..... poměrné zúžení
$\varphi_i$ [°]	..... fázový úhel výskytu impulzu částečného výboje

## Úvod

Předložená práce se zabývá kompozitními materiály a diagnostickým systémem, který slouží pro stanovení jejich vlastností. Právě kompozitní materiály poskytují jedinečnou možnost využívat vlastností, kterých lze jen stěží u běžných materiálů dosáhnout. Pod pojmem kompozit si lze představit materiál, který je složený ze dvou nebo více jasně oddělitelných fází, které se liší v makroskopickém hledisku tvarem nebo složením. A zároveň mají odlišné mechanické, elektrické, teplotní aj. vlastnosti. Právě součinnost jednotlivých složek dává materiálu jeho specifické vlastnosti. V kompozitu dochází k využití pozitivních vlastností jeho složek tak, že výsledný materiál má lepší vlastnosti než jednotlivé složky dohromady. V takovém případě se jedná o synergický efekt, který je pro kompozity charakteristický. Zpravidla je snaha získávat kompozity s co možná nejsilnější synergickým efektem, hlavně u vlastností, které jsou nejvíce požadovány pro určité použití. Vhodnou přípravou a správnou volbou složek lze tedy vytvořit nový progresivní materiál.

Kompozity jsou tedy heterogenní materiály, které jsou složeny z matrice, výztuže a plniva. Matrice zajišťuje spojení a ochranu výztuže, proto musí odolávat okolnímu prostředí. Dalším úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, přenos a zavedení sil. Na výrobu matrice lze použít polymerní, keramické, uhlíkové nebo kovové materiály. Další složkou je výztuž, která je rozlišována na dva základní tvary: částice a vlákna. Výztuž zlepšuje především mechanické vlastnosti. Lze použít kovová, keramická, polymerní, skleněná, přírodní, uhlíková nebo grafitová vlákna a různé druhy částic. Poslední složkou je plnivo, které se do kompozitu často přidává kvůli snížení ceny. Pokud je použito tzv. funkční plnivo, zlepšuje vlastnosti kompozitu. Pro elektroizolační účely je nejvýznamnější slída v různých formách. Pomocí plniva lze zlepšit nejen elektroizolační vlastnosti, ale i mnoho dalších, jako jsou odolnost vůči elektrickému oblouku, odolnost vůči plazivým proudům, relativní permitivita, zlepšení elektrické vodivosti aj.

V oblasti silnoproudé elektrotechniky nacházejí kompozitní materiály uplatnění zejména jako elektroizolační materiály v elektrických strojích, konstrukční prvky, izolátory či jako součást speciálních lan venkovního vedení.

Aby se mohly spolehlivě určit vlastnosti kompozitních materiálů, je důležité, aby byl stanoven soubor diagnostických metod. Diagnostika je soubor metod a prostředků, který slouží k zjišťování technického stavu objektu. Pro určení jednotlivých elektrických,

teplotních, strukturálních, mechanických a jiných vlastností je možné použít různé metody. Z elektrických vlastností jsou určující zejména dielektrické ztráty, elektrická pevnost, projevy částečných výbojů a absorpční a resorpční charakteristiky, z kterých lze získat polarizační index, rezistivitu nebo izolační odpor. Z mechanických vlastností jsou sledovány například pevnosti v tahu, ohybu, rázová houževnatost, tvrdost nebo schopnost materiálu odolávat chvění. Strukturálními analýzami se sledují děje, které probíhají v diagnostikovaném materiálu. Pomocí těchto metod lze určit stupeň zestárnutí materiálu, teplotu tepelného rozkladu, teplotu skelného přechodu, teplotu tání, tepelně-oxidační stabilitu vzorků, entalpii a mnoho dalších vlastností. Strukturální metody patří dnes mezi hojně využívané i v elektrotechnologii.

Cílem této práce je určit diagnostický systém vhodný pro sledování vlastností kompozitních materiálů. Závěrečná část práce je věnována návrhu optimálního prostorového rozložení jednotlivých laboratoří, ve kterých se využívají zmíněné diagnostické metody. Při návrhu prostorového uspořádání jsou brány v potaz metody průmyslového inženýrství, aby skutečně došlo k optimálnímu uspořádání v prostoru a nedocházelo ke vzniku forem nadbytečného plýtvání.

# 1 Kompozitní materiály

Materiály prodělaly od počátku dějin lidstva evoluci, během které na základě zkušeností i znalostí byly zlepšovány jejich vlastnosti. Vývojem se zjistilo, že výroba homogenních materiálů s dokonalými vlastnostmi by byla velmi neekonomická, protože většina vlastností by zůstala nevyužitá. Začaly se tedy používat kompozitní materiály, které jsou složeny ze dvou a více fází s rozdílnými vlastnostmi. Dříve se kompozity aplikovaly pouze v progresivních technických a vojenských oblastech, avšak po II. světové válce došlo k masivnějšímu rozšíření kompozitních materiálů i v komerční průmyslové sféře po celém světě. V současné době se tyto materiály využívají například v leteckém, automobilovém a stavebním průmyslu, ale i v elektrotechnickém průmyslu, kde jsou používány zejména jako konstrukční a elektroizolační materiály. Aplikace těchto materiálů se bude i nadále rozšiřovat, protože kompozitní materiály v oblasti elektrotechniky spojují důležité mechanické, elektrické a ostatní nepostradatelné vlastnosti. [1, 2, 3]



Obr. 1: Kompozitní výrobky (fotografii poskytla společnost ISOMA s.r.o.)

## 1.1 Definice a charakteristika kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze charakterizovat jako heterogenní materiály složené ze dvou nebo více jasně oddělitelných fází (nosná složka, plnivo a pojivo). Matrice je spojitá fáze a jejím úkolem je sloučit sekundární fázi v kompaktní útvar, zprostředkovat přenos síly na dispergovanou fázi, oddělit vzájemně jednotlivé částice nebo vlákna dispergované fáze, a tak zabránit spojitému šíření trhliny. Také chrání výztuž před nepříznivými vlivy okolního prostředí. Sekundární fáze má nejčastěji úlohu vyztužující a slouží k vytváření nových materiálů s lepšími vlastnostmi. Jednotlivé složky kompozitů mají odlišné vlastnosti, ale kompozitní materiály jako celek jsou charakteristické synergickým efektem, tj. výsledné vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by byly sečtené vlastnosti jednotlivých složek. Tyto materiály jsou ekonomicky i energeticky výhodnější než homogenní, protože jsou navrhovány přímo pro specifické použití, čímž dochází k maximálnímu využití hmoty. Ve snaze o to, aby synergický efekt byl co nejsilnější, hlavně u požadovaných vlastností. [4, 5, 8]

Existují i materiály, které nelze charakterizovat jako kompozity i přes to, že jsou složeny z více složek. Například běžné kovy, které obsahují nečistoty, slitinové prvky nebo plasty, ve kterých se nacházejí zbytky materiálů usnadňující výrobní procesy (např. malá množství plniv, apretur, pohlcovačů UV atd.). Většinou je množství těchto příměsí tak malé, že nedochází k ovlivňování výsledných vlastností celé materiálové směsi. Proto, aby se mohl heterogenní materiál zařadit mezi kompozity, musí být splněny tyto podmínky:

- objemový podíl jedné ze složek (výztuže) musí být větší než 5 %,
- fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti matrice a výztuže jsou značně odlišné,
- kompozitní materiál je připravován mísením složek. [2, 9]



## 1.2 Dělení kompozitů

Kompozitní materiály lze dělit podle různých kritérií:

- podle disperzní fáze,
- podle typu matrice,
- podle tvaru disperze.

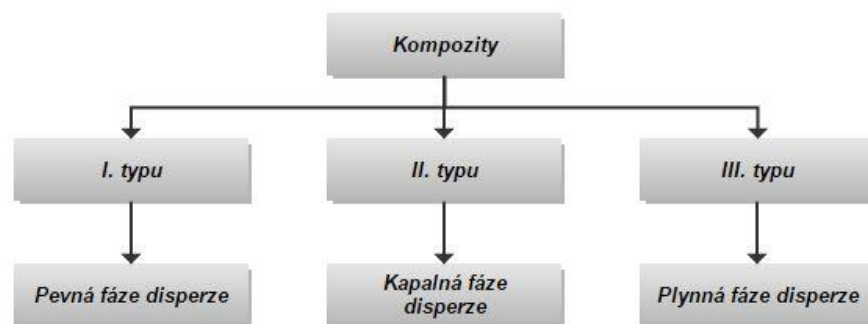
Dalším kritériem pro dělení kompozitů je velikost výztuže:

- makrokompozity (velikost řádově mm až cm)
- mikrokompozity (řády  $\mu\text{m}$ )
- nanokompozity (řády nm). [5]

### 1.2.1 Dělení dle disperzní fáze

- kompozity I. typu
- kompozity II. typu
- kompozity III. typu

Kompozity I. typu jsou nejrozšířenější, se kterými se lze v technice setkat. U tohoto typu není možné již měnit objem výztuže, protože prostor, který zaujímají, je úplně vyplněn. U kompozitů II. typu a III. typu tuhá fáze nevyplňuje celý prostor určený materiálem. U II. (přechodového) typu se objevuje kapalná disperze, která se přidává, je-li třeba redukovat matici za účelem změny poměru objemu dvou tuhých fází v tělese. Vznikne tak třífázový systém s uzavřenými nebo otevřenými póry vyplněnými například olejem. Jako příklad II. typu lze zmínit spékaný kov s disperzí oleje nebo z přírodních materiálů, například dřevo jako systém trubic s mizou. U III. typu je i plynná disperze. Dochází zde k postupnému spojování jednotlivých uzavřených porů do spojitých kanálek. Typickým příkladem třetího typu jsou pěnoplasty, pěnové keramiky nebo kovové pěny. [2, 5, 12]



Obr. 2: Dělení kompozitů podle typu disperzní fáze

### 1.2.2 Dělení dle typu matrice

Jak už bylo uvedeno, matrice v kompozitu zajišťuje spojení výztuže v jeden celek, čímž se vytvoří výsledný tvar. Jedná se tedy o spojitou složku. Rozdělení podle typu matrice patří mezi základní dělení kompozitů. Nejčastěji se vyskytují:

- kompozitní materiály s plastovou maticí (Polymer Matrix Composites – PMC),
- kompozitní materiály s kovovou maticí (Metal Matrix Composites – MMC),
- kompozitní materiály s keramickou maticí (Ceramic Matrix Composites – CMC),
- kompozitní materiály s uhlíkovou maticí (Carbon Matrix Composites – CMC).

U kompozitů s polymerní (plastovou) maticí se používají na výrobu reaktoplasty (např. PES, epoxid), termoplasty (např. PP, PA, PC) nebo elastomery (např. styren-butadien). Výztuž u těchto matic je nejčastěji vláknového charakteru z materiálu, jako je sklo, uhlík nebo aramid. Kovové matrice se vyrábějí z lehkých (Al, Mg nebo Ti) slitin, ze železných, měděných slitin nebo také ze slitin kobaltu. Výztuži kovových matic může být například karbid křemíku nebo wolframové vlákno. Karbidy, nitridy nebo oxidy křemíku či zirkonia slouží zase k výrobě keramických matic. Nejnovější matrice jsou vyráběny z uhlíkových materiálů v různém stavu strukturního uspořádání. Detailněji se používanými materiály zabývá kapitola č. 2. [5, 8, 11]

### 1.2.3 Dělení dle tvaru disperze

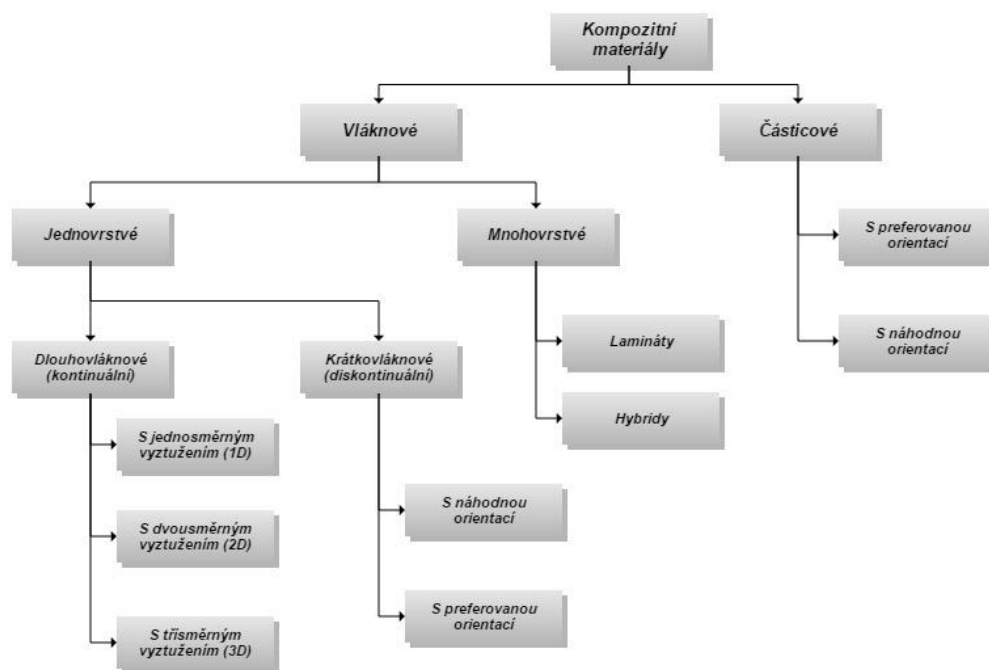
- částicové kompozity
- vláknové kompozity

Obecně rozdělujeme kompozity dle tvaru disperze na částicové a na vláknové. Vláknové lze dělit na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé jsou tvořeny jednou nebo více samostatnými vrstvami, které mají stejnou orientaci a vlastnosti. V praxi jsou ale častěji používány vícevrstvé kompozity. Ty se skládají z tenkých, různě orientovaných jednosměrových vláknových kompozitů. Vláknové kompozitní materiály lze ještě dále rozdělit podle délky vlákna na krátkovláknové a dlouhovláknové. [2]

Krátká vlákna jsou menší, než je jejich kritická délka, což je řádově stonásobek jejich tloušťky. Poměr délky  $L$  a průměru  $D$  je menší než 100. V případě lomu se tato vlákna vytáhnou. V maticí jsou vlákna dispergována buď náhodně, nebo orientovaně. Ale většinou jsou orientovaná nahodile. Krátkovláknové kompozity s orientovanými vlákny vznikají spojením krátkých vláken ve slabě vázanou rohož, která se následně

zaimpregnuje pryskyřicí. Dlouhvláknové kompozity jsou vyztuženy dlouhými vlákny s délkou desítek až stovek milimetrů s náhodnou orientací nebo s přednostní v ploše nebo prostoru. Poměr délky  $L$  a průměru  $D$  je větší než 100. Na rozdíl od krátkých vláken se při lomu přetrhnou. Jejich uspořádání může být jednoosé, dvouosé (v rovině) nebo trojosé (v prostoru). Jednoosé kompozity se vyrábějí rovnoběžným ukládáním vláken a jejich prosycením pryskyřicí, která udrží vyztužující vlákna v požadované poloze. Kompozity s dvousměrným vyztužením obsahují vzájemně kolmá vlákna v jedné vrstvě. Takovým příkladem může být například kompozit s tkaninou nebo rohoží. Lze se setkat i s vícesměrným (např. trojsměrné – úplety) vyztužením. [1, 2]

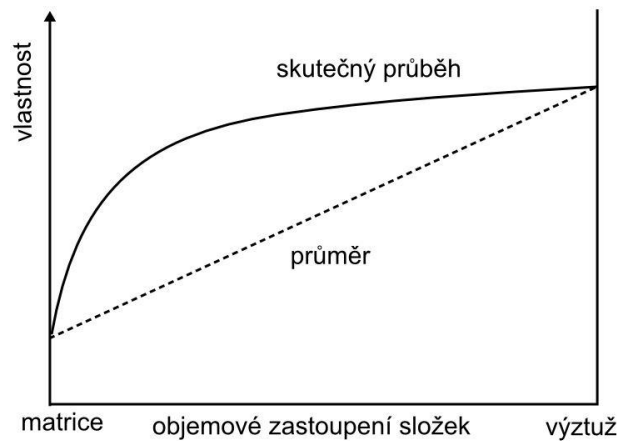
Disperze ve tvaru částic je buď s preferovanou (např. uhlíkové dvourozměrné destičky), nebo s náhodnou orientací. Částice mohou být ve tvaru koule, krychle, kvádrů nebo jiného tvaru. Zvláštní skupinou jsou hybridní kompozitní materiály, protože obsahují jednak vláknovou výtuz, ale zároveň i částicovou. Ta modifikuje vlastnosti matrice. Sendvičové materiály se skládají z jádra, které je velmi lehké, a dvou povrchových vrstev. Lehké jádro určuje i malou hmotnost výsledného materiálu, na druhou stranu kvůli dvěma potahům získává kompozit velkou tuhost v ohybu. Lamináty se skládají z několika vrstev jednorozměrných kompozitů, které jsou tvořeny maticemi a vláknovou výtuzí. Pokud je třeba určit, zda se jedná o laminát nebo hybridní laminát, rozhodujícím faktorem je, zda jsou jednotlivé vrstvy vyrobeny ze stejného materiálu. Pokud ano, jedná se o laminát, v opačném případě je kompozit hybridním laminátem. [5, 7, 8, 12]



Obr. 3: Dělení kompozitů dle tvaru disperze

### 1.3 Synergický efekt

Synergickým efektem se rozumí výsledné složení pozitivních vlastností, které je lepší, než by byl poměrný součet. Tento spolupracující účinek lze vyjádřit matematickým vztahem  $1 + 1 = 3$ . Schematicky je to znázorněné na následujícím obrázku.



Obr. 4: Synergický efekt (překresleno podle: [5])

Obecně je snaha vybrat vždy takový materiál, aby synergie byla co nejsilnější, hlavně u vlastností, které jsou požadovány nejvíce. V oblasti elektrotechniky je snaha o získání co možná nejlepších elektrických a mechanických vlastností s ohledem na použití finálního výrobku. [5]

## 2 Význam jednotlivých složek kompozitů

Kompozity jsou charakterizovány jako heterogenní materiál, který je složený ze dvou nebo více jasně oddělitelných fází. Tato kapitola je zaměřena právě na popis jednotlivých složek, jejich vlastností a význam pro finální vlastnosti kompozitů. Při výrobě kompozitního materiálu musí být jednotlivé složky vybrány s ohledem na požadované finální mechanické, fyzikální, elektrické, chemické vlastnosti a na okolní podmínky.

### 2.1 Matrice

Matrice zajišťuje spojení výztuže v jeden celek. Často je v přímém kontaktu s okolím a je důležité, aby odolávala agresivnímu okolnímu prostředí. Musí mít požadované elektrické, chemické a mechanické vlastnosti. Hlavním úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil a ochrana výztuže. V první kapitole bylo zmíněno, že se kompozity dělí podle druhu matrice na kompozity s polymerní matricí (PMC), kompozity s kovovou matricí (MMC), kompozity s keramickou matricí (CMC) a kompozity s uhlíkovou matricí (CMC).

#### 2.1.1 Kovová matrice (Metal Matrix Composites)

Kovové matrice mají oproti častěji používaným polymerním matricím některé výhody. Například elektrickou vodivost, teplotní vodivost, nehořlavost, smykovou pevnost, tvárnost, odolnost proti obrusu, dále poskytují možnost spojování, tvarování, mají vyšší tepelnou odolnost, odolnost proti vlhkému prostředí a proti erozi. Důležitý je objem zpevňovadel, protože se vzrůstajícím objemem stoupá pevnost a zároveň klesá tažnost a houževnatost. Největší nevýhodou kovových matic jsou výrazně vyšší výrobní náklady. Nejvíce se vyskytují matrice na bázi lehkých slitin. Zejména se pak lze setkat se slitinami hliníku (nejrozšířenější), hořčíku, titanu, niklu (pro vysoké teploty), mědi a stříbra. Měď a stříbro jsou využívány převážně v elektrotechnické oblasti. [1, 31]

Kovové matrice se obvykle vyztužují anorganickými vlákny nebo částicemi. Mezi zástupce vláknové výztuže řadíme bor B, karbid C, oxid hlinitý  $Al_2O_3$ , karbid křemíku SiC, z částicových výztuží mají největší význam karbid křemíku SiC a oxid hlinitý  $Al_2O_3$ . Pokud je matrice vyztužena částicemi, zvyšuje se zejména tvrdost, otěruvzdornost, pevnost a odolnost proti tečení při vyšších teplotách. Vláknová výztuž se vyskytuje mnohem častěji než částicová. Cílem vyztužení vlákny je zvýšení pevnosti, tuhosti, únavové životnosti, odolnosti proti tečení a odolnosti proti abrazi. Borová vlákna

se používají zejména pro výztuž matric ze slitin hliníku typu Al-Mg-Si nebo Al-Cu-Mg. Původně se tyto kompozity začaly rozvíjet už v 60. letech 20. století, kdy byly určeny na výrobu součástí pro raketoplány. Později si však našly uplatnění i v jiných odvětvích. Výhodou kompozitů z borových vláken je vysoká mez pevnosti v tahu. I když pevnost původní slitiny hliníku je vyšší než u kompozitu, používá se kompozitní materiál, protože při zvyšující se teplotě klesá pevnost původní slitiny rychleji než u kompozitu. Při výrobě mohou vznikat problémy, jelikož výztuž reaguje s roztaveným hliníkem. Proto se někdy opatřují ochranným povlakem SiC. Za zvýšených teplot oxidují. Dalším materiálem používaným pro výztuž kompozitů s kovovou maticí je karbid křemičitý (SiC). Nejčastěji se uplatňuje jako výztuž hliníkových nebo titanových matric. Výhodou titanových slitin je jejich aplikovatelnost v agresivním prostředí a odolnost vůči vysokým teplotám. Limitujícím faktorem je cena zpevňujících vláken, drahá výroba, hůře realizovatelná recyklace a komplikované druhotné zpracování. V praxi se s těmito materiály lze setkat u velmi tepelně a mechanicky namáhaných částí spalovacích a leteckých motorů. Technologie výroby je pak volena podle délky vláken. Vlákná SiC jsou charakteristická výbornými pevnostními vlastnostmi, dosahují délek až několik mm s průměrem v řádech  $\mu\text{m}$ . Ve struktuře se vyskytuje málo defektů, což vede k extrémní pevnosti těchto vláken. Vlákná z SiC jsou odolnější vůči oxidaci, reakcím s roztavenými kovy a teplotně stabilnější než borová vlákna. Vlastnosti uhlíkových vláken závisí na technologii výroby. Teplota žíhání ovlivňuje modul pružnosti vláken, čím je vyšší, tím se modul zvyšuje, ale zároveň se snižuje pevnost vláken. Optimální teplota žíhání byla stanovena na 1500 °C, kdy je dosaženo maximální pevnosti. Uhlíková výztuž patří k nejperspektivnějším materiálům pro výztuže kompozitů. Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi a nízkou hmotností. Nevýhodou je jejich špatná smáčivost roztavenými kovy, proto se na ně nanáší ochranné povlaky z SiC. Uhlíková a vlákna oxidu hlinitého se používají jako výztuž hliníkových a hořčíkových matric. Dále jsou známy výztuže z karbidu wolframu WC, karbidu hliníku  $\text{Al}_4\text{C}_3$ , boridu titanu  $\text{TiB}_2$ , oxidu zirkoničitého  $\text{ZrO}_2$  nebo yttritého  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . [9, 31]

Příkladem použití MMC jsou mnohovláknové supervodiče. Supervodivou částí je intermetalická sloučenina  $\text{Nb}_3\text{S}$  nebo  $\text{V}_3\text{Ga}$ . Tento kompozitní materiál je vyroben difuzní řízenou reakcí mezi niobovými vlákny a bronzovou maticí. Tyto kompozity jsou používány na vinutí supervodivých magnetů. [9]

### 2.1.2 Keramická matrice (Ceramic Matrix Composites)

Na výrobu keramických matic se používají oxidy, nitridy nebo karbidy různých prvků, nejčastěji hliníku, křemíku a hořčíku např. mulit,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ , sklo, aluminiumfosfát i grafit. Účelem výroby keramických kompozitů je zvýšení houževnatosti, otěruvzdornosti v extrémních podmínkách, teplotní odolnosti a obrobitelnosti. Vyznačují se velkou pevností při vysokých teplotách, malou hustotou a odolností vůči oxidaci. Vláknová výztuž je v tomto případě vyráběna z molybdenu, tungstenu, koolumbia, oceli, karbidu křemíku, uhlíku a safírových whiskerů. Následkem vyztužení keramiky vlákny je vždy výrazné zvýšení houževnatosti (řádově 1000krát). Nejperspektivnější výztuží je uhlík, ale kvůli vysokým teplotám přípravy je nutné ho opatřit povlakem křemíku. Vzhledem k vysokému modulu je volba vyztužujících vláken obtížná, ne všechna jsou totiž vhodná. Je nutné aplikovat taková, která mají vyšší modul. Jsou-li použita kontinuální vlákna, při zatěžování mohou vznikat mikrotrhliny v celém průřezu matrice. K porušování vláken dochází postupně, k totálnímu lomu tedy nedojde okamžitě. Lomová deformace vláken by měla být vždy větší než u keramické matrice (u polymerních a kovových kompozitů je to naopak). S rostoucím objemem výztuže se pevnost může zvětšovat i zmenšovat podle rozdílnosti teplotních vlastností vláken a matrice. Avšak použijí-li se k výztuži SiC whiskery (monokrystaly), dojde ke zlepšení lomové houževnatosti, ale pevnost se téměř nezmění. Pokud vlákna mají větší teplotní vodivost než matrice, zlepšují odolnost vůči teplotnímu šoku. Vlivem teplotní kontrakce po výrobě může dojít k oddělení vláken od matrice. [1, 5, 8]

Kompozity se skleněnou matricí se řadí ke kompozitům s keramickou matricí. Vyznačují se podobnými vlastnostmi, proto i použití je obdobné. Do roztavené skloviny lze přidat částice s vyšším bodem tání, čímž se získá částicový kompozit. Např. kompozit s matricí Pyrex s 30 % disperze ve formě částic yttria nebo  $\text{ZrO}_2$ , či destiček  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se používá v palivových člancích na přímou přeměnu tepelné energie na elektrickou. Kompozity s grafitovými vlákny jsou v rovině vláken elektricky vodivé a mají i vysokou tepelnou vodivost. Dalším příkladem kompozitu se skleněnou matricí je Superkanthal, který se skládá z čistého křemenného skla a disperzí 80 % částic  $\text{MoSi}_2$ . Vyznačuje se velkou elektrickou vodivostí a odolností vůči tepelným šokům. Je to vhodný odporový materiál pro vysokoteplotní použití, protože je stálý až do 1400 °C. [5]

### 2.1.3 Polymerní matrice (Polymer Matrix Composites)

První patent na vláknové kompozity s polymerní matricí byl vydán už v roce 1916, proto patří mezi syntetické kompozity s nejdelší tradicí. Kompozitní materiály s polymerní matricí jsou dnes nejrozšířenější v elektrotechnické oblasti, jsou totiž využívány hlavně na izolační systémy. Jejich velkou výhodou oproti kompozitům s kovovou matricí je odolnost vůči korozi, nižší měrná hmotnost při zachování vysoké měrné pevnosti a schopnost tlumení kmitů. Nevýhodami jsou nižší pracovní teploty, vysoké koeficienty tepelné roztažnosti, nízká odolnost vůči radiaci a vlhkosti. Ale správnou volbou výztuže nebo matrice je možné ovlivnit i tyto vlastnosti, epoxid je například odolný vůči radiaci a polymery vyztužené uhlíkovými vlákny jsou charakteristické nízkým teplotním koeficientem roztažnosti. Polymerní matrice lze dělit na elastomery, reaktoplasty a termoplasty. Původně se však pro kompozity používaly pouze vyztužené nenasycené polyesterové nebo epoxidové pryskyřice, ale i dnes patří mezi nejrozšířenější. [9, 32]

#### 2.1.3.1 Elastomery

Elastomery tvoří samostatnou skupinu z pohledu mechanických vlastností. Jedná se o látky, které lze použitím poměrně malých sil silně protáhnout, aniž by se přetrhly. Po ukončení mechanického působení na elastomer přechází do původního stavu. Nejznámějším zástupcem elastomerů je přírodní kaučuk, který lze získat z kaučukového mléka. Dalšími nejběžnějšími kaučuky kromě přírodních jsou butadienstyrenový, butadienový, ethylenpropylenový a butylkaučuk. Elastomery jsou velmi homogenní materiály, proto u nich lze použít i částicovou výztuž o velmi malých rozměrech (řádově nm), která je disperzně zpevní. Kaučuky se nejčastěji vyztužují černými sazemi, křemičitanem vápenatým, křemičitanem hlinitým nebo oxidem křemičitým (15 – 20 % obj.). Často se kombinuje i několik druhů částicové disperze. Částicovým plnivem se zvýší pevnost až 10 x, aniž by došlo k zásadnímu snížení průtažnosti materiálu. Vložením plniva se ovlivňují nejen mechanické vlastnosti, ale i teplotní a elektrická vodivost, stálost či vzhled. Pro zvýšení molekulové hmotnosti a tedy možnosti vyztužení, se přidává do styren-butadienového kaučuku 30 až 37 hm. dílů oleje. Surový kaučuk se následně upravuje na polotovary, které se vulkanizují. Vulkanizací se zvyšuje odolnost proti vysokým a nízkým teplotám, mechanická pevnost a odolnost proti rozpouštědlům (benzen, xylen, benzín, chloroform atd.). Vulkanizace je proces, při kterém dochází ke strukturním změnám vlivem působení vulkanizačního činidla (síra, peroxidy, selen, telur atd.) nebo



energie. Plastická kaučuková směs je přeměňována na elastickou pryž. V přírodním kaučuku se vyskytuje 3,5 % nekaučukovitých látek, které jsou schopny urychlit vulkanizační proces. Podle množství síry je pak možné dělit pryže na měkké (2 – 10 % síry) a tvrdé (20 – 40 % síry). Příkladem nejčastěji se vyskytujícího syntetického kaučuku je butadien-styrenový kaučuk (SBR). Je známý pod obchodním názvem Kralex a používá se pro výrobu pneumatiky. Kompozitní elastomery se používají na výrobu pneumatik, dopravníkových pásů, technických pryží nebo různých izolací. [1, 5, 32, 34]

Tab. 1 Vlastnosti vybraných elastomerů (převzato z: [34])

materiál	$\vartheta_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\epsilon_r$	$\text{tg } \delta$	$\rho_v [\Omega \cdot \text{m}]$	$E_p [\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}]$
přírodní pryž	75	2,7 - 5,0	0,005 – 0,02	$10^{13} - 10^{15}$	17 – 25
butadienstyrenový kaučuk	75	2,8 – 4,7	0,05 – 0,35	$10^{12} - 10^{14}$	17 – 25
butadiennitrilový kaučuk	120	3,9 - 10	0,3 – 0,5	$10^7 - 10^9$	15 – 20
chloroprenový kaučuk	90 – 100	7,5 - 14	< 0,6	$10^9 - 10^{10}$	7 – 11
fluorokarbonový kaučuk	200	10 - 18	0,3 – 0,4	$10^{11}$	15 – 25

### 2.1.3.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou známé také pod staršími názvy: termosety, duroplasty, duromery. Jedná se o polymerní látky, které chemickou reakcí (vytvrzením) přecházejí z lineárního do síťovaného stavu. Vytvrzovací teplota by neměla být nižší než 10 – 20 °C pod maximální teplotou skelného přechodu  $T_g$ . Termosety ztrácejí termoplastický charakter zahřátím nebo po přidání katalyzátoru (vytvrzovací prostředek), přecházejí tedy do nerozpustného a netavitelného stavu. V síťovaném stavu není další tváření již možné, dalším zahřátím by došlo k roztavení hmoty. Tyto materiály jsou nejrozšířenější v elektrotechnice a ve stavebnictví. Přidáním částicové nebo vláknové výztuže lze ovlivnit řadu vlastností. Tři čtvrtiny všech polymerních matric jsou právě reaktoplasty. Zástupci reaktoplastických matric jsou například: epoxidy (EP), polyestery (UP) nebo vinylestery (VE). Dnes k nejpoužívanějším reaktoplastovým kompozitům patří tzv. pyrrony, jsou teplotně odolné do 550 °C, hodnota pevnosti v tahu se pohybuje okolo 76 MPa a Youngův modul je až 5 GPa. [1, 32]

Reaktoplasty se snadněji zpracovávají, smáčejí a prosycují, protože jejich viskozita při teplotě zpracování je sto až tisícinásobně menší než u termoplastů. Energetické nároky jsou proto na prosycení vláken nižší, protože technologické procesy mohou probíhat při nižších teplotách. Podle [35] tvoří reaktivní pryskyřice skupinu reaktoplastů nejčastěji používanou při výrobě kompozitů. Jedná se o kapalné nebo tavitelné pryskyřice,

které se pomocí tvrdidel vytvrzují polyadici nebo polymerací. Tvrdidla jsou sloučeniny, které katalyticky vyvolají polymerizaci nebo ovlivňují vytvrzování během polyadice. Součástí směsí tvrdidel jsou urychlovače, katalyzátory nebo iniciátory. Nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic jsou:

- nenasycené polyesterové pryskyřice,
- vinylesterové nebo fenakrylátové pryskyřice,
- epoxidové pryskyřice,
- fenolické pryskyřice,
- metakrylátové pryskyřice,
- izokyanátové pryskyřice.

K výztuži reaktoplastických matric se zpravidla používají větší částice o velikostech v řádech mikrometrů nebo vlákna. Vyztužením se zvýší tuhost kompozitu, zlepší se elektroizolační vlastnosti, sníží se hořlavost, zvýší se pevnost nebo se například utlumí růst trhlin při mechanickém namáhání. Vhodnou částicovou výztuží jsou kuličky skla nebo křemenného písku. Skleněné kuličky zlepšují ohybovou i tahovou pevnost. Dále se reaktoplastické matrice vyztužují nepravidelně rozdělenými krátkými vlákny. Délka těchto vláken dosahuje 6 až 75 mm. Reaktoplasty vyztužené vlákny patří k nejrozšířenějším konstrukčním kompozitům. Vlákna mohou být uspořádána orientovaně nebo neorientovaně. Optimální množství vláken v reaktoplastu je 60 – 75 %, při vyšším objemovém množství je v kompozitu velké množství pórů. Zpravidla se používají spojitá nebo dlouhá vlákna. Vyztužuje se skleněnými (90 % reaktoplastových kompozitů), uhlíkovými, borovými, keramickými, kovovými, aramidovými nebo hybridními vlákny. Někdy se používají i přírodní vlákna v kombinaci se skleněnými kvůli snížení ceny výrobku. Pro výrobu se používají také předimpregnovaná vlákna tzv. prepregy, tkaniny a rohože prosycené pryskyřicí. [1, 32, 35]

Nenasycené polyesterové pryskyřice se objevily již ve čtyřicátých letech 20. století a patří mezi nejpoužívanější na výrobu kompozitů. Až 70 % výroby těchto pryskyřic je využito na výrobu kompozitních materiálů. Dnes jsou například známy pod obchodními názvy: Palatal, Palapreg, Atlac, Polylite, Viapal, Hetron aj. UP-R mohou být orthoftalové, izoftalové, tereftalové, chlorftalové a fumarové. Jednotlivé pryskyřice se liší pracovní teplotou, chemickou odolností, hořlavostí a i mechanickými vlastnostmi. Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R) je možné vytvrzovat za normální nebo zvýšené teploty, aniž by docházelo ke vzniku těkavých vedlejších produktů. Při vytvrzení se uvolní reakční

teplo a tím dojde k objemovému smrštění o 5 až 9 %, čímž se zvýší měrná hmotnost. Vyznačují se nízkou viskozitou, dobrým smáčením vláken, vysokou rychlostí vytvrzování a nízkou cenou. Čím vyšší je obsah dvojných vazeb ve struktuře výchozích surovin, tím je nenasyčená polyesterová pryskyřice reaktivnější. Se stoupající reaktivitou se zvyšuje i procento smrštění polymeru. Vysoce reaktivní pryskyřice mají pak vysokou teplotu skelného přechodu a dobrou tuhost. Viskozita je závislá na množství styrenu, které se pohybuje v rozmezí 30 – 50 %. Pro snadnější prosycování vláken se může zvýšit obsah styrenu do určité míry v pryskyřici. Nadměrné zvýšení styrenu způsobí přílišné zkřehnutí. Někdy se lze setkat s plnivý, která se přidávají pro zvýšení viskozity, snížení ceny, snížení hořlavosti, snížení smrštivosti, ovlivnění zatékavosti nebo zpracovatelnosti. Mezi důležitá plniva patří křída, kaolin a hydroxid hlinitý. Aditiva mohou také zlepšit vlastnosti nenasyčených polyesterových pryskyřic. Volbou pryskyřic s dlouhým řetězcem nenasyčeného polyesteru získáme chemicky odolnější matici. Problémem těchto pryskyřic je uvolňování styrenu při zpracování. [35]

Epoxidové pryskyřice jsou známy pod obchodními názvy: Araldite, Epocote, D.E.R., CHS Epoxy aj. V elektrotechnice jsou nejčastěji použity na výrobu zalévaných izolačních systému elektrických strojů nebo na desky plošných spojů. Jsou za normálních teplotních podmínek bezbarvé, neomezeně skladovatelné, kapalné až pevné. Jedná se o pryskyřičné látky, jejichž řetězce obsahují více než jednu epoxidovou skupinu. Vyznačují se výbornými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Jsou zhruba třikrát až čtyřikrát dražší než nenasyčené polyesterové pryskyřice. A pro svou poměrně vysokou viskozitu a pomalé vytvrzování jsou hůře zpracovatelné. Objemové smrštění je poměrně nízké, nabývá hodnot 2 – 3,5 %. Nízká smrštivost a dobrá adheze jsou základem dobrých mechanických vlastností epoxidových polotovarů, zejména při dynamickém namáhání. Velmi dobře odolávají zásadám i zředěným roztokům anorganických i organických kyselin. Chemická odolnost stoupá s molekulovou hmotností a stupněm zesíťování. Na chemickou odolnost má vliv i druh použitého tvrdidla. Pokud se použije na vytvrzení anhydrid dikarboxylových kyselin, sníží se navlhavost pryskyřice. Tvrdidla na bázi aromatických látek zase zvyšují teplotní odolnost. Vhodnou volbou pryskyřice a tvrdidla je možné připravit pryskyřice i pro speciální aplikace. Mezi nejdůležitější druhy epoxidových pryskyřic patří bisfenol A a novolakové pryskyřice. Cykloalifatické epoxidy jsou vhodné pro venkovní aplikace, protože dobře odolávají UV záření. V oblasti vyztužených kompozitů se používají epoxidové pryskyřice jako matrice

pro vysoce kvalitní materiály v elektrotechnice kvůli svým dobrým izolačním vlastnostem (např. pro metodu VPI), pro aplikaci v leteckém průmyslu, kosmonautice nebo na výrobu sportovních potřeb. Jsou vhodné i jako matrice pro vysokopevnostní vlákna (např. uhlíková). V elektrotechnice se používají zejména v konstrukci měničů a při výrobě izolátorů a suchých transformátorů. [32, 35]

Fenolické pryskyřice byly první čistě syntetické pryskyřice, které se začaly všestranně používat. Dnes je ale jejich podíl na celkové výrobě klasických vyztužených kompozitů nízký. Mohou se vyskytovat pod obchodními názvy: Ebolit, Askofen, Bakelite nebo Rütaphen. Lze je klasifikovat na dva základní typy: novolaky a rezoly. Vyrábí se kondenzací fenolů a 30 – 50% vodných roztoků aldehydů. Bez tvrdidla mají termoplastické vlastnosti. K vytvrzování fenolických pryskyřic může dojít ve třech stádiích: A – resol, B – resitol, C – resit. Možnost výroby prepregů vychází ze stavu B, kdy je započato příčné síťování a pryskyřice má termoplastický charakter. Ve stavu C má pryskyřice již reaktoplastický charakter. Ve směsích pro prepregy bývají použity urychlovače (např. močovina). Fenolické pryskyřice jsou vysoce tepelně a chemicky odolné a tvarově stálé, vyznačují se také vhodným chováním při požáru a při zachování vysoké zbytkové pevnosti, proto se aplikují v dopravních prostředcích. Dále se používají na výrobu desek plošných spojů. [1, 32, 35]

Vinylesterové pryskyřice VE-R se vyrábějí stejně jako epoxidová pryskyřice na bázi bisfenolu A a na bázi epoxidového novolaku. Třetím typem VE-R jsou kvalitní vinylesteruretany. Jedná se o nenasycené estery epoxidových pryskyřic. Obsahují reaktivní rozpouštědlo (styren). Vinylesterové pryskyřice na bázi bisfenolu A jsou charakteristické vysokou houževnatostí, odolností vůči alkalickému prostředí a vysokým teplotám, ale jsou také méně stálé za tepla. Vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají nižší viskozitu a vyšší stupeň zesíťení. Hybridní vinylesteruretanové pryskyřice spojují dobré mechanické vlastnosti s vysokou odolností vůči vysokým teplotám a s vysokou chemickou odolností. Uretanové skupiny v řetězci VEU-R zajišťují dobrou vazbu se skleněnými vlákny. Při srovnání s klasickými vinylesterovými pryskyřicemi jsou křehčí a více hydrofilní. Klasické VE-R mají oproti nenasyceným polyesterovým pryskyřicím vyšší chemickou odolnost a houževnatost. Hodnota tažnosti je až o 6 % vyšší. Při porovnání s epoxidovými pryskyřicemi je jejich viskozita nižší a řiditelná, což usnadňuje výrobu a zpracování. Nevýhodou je opět zatížení životního prostředí styrenem. VE-R se používají v oblastech s vysokými nároky na korozní namáhání, např. pro velkorozměrové trouby pro odvod

čistého plynu v odsiřovacích zařízeních, v chladicích věžích, v komínech a potrubích nebo v tepelných regenerátorech. [35]

Další skupinou reaktoplastických pryskyřic jsou polyimidy PI. Používají se zejména v oblastech s vysokými teplotními, elektrickými a mechanickými nároky. Vyznačují se nízkou tepelnou a elektrickou vodivostí a odolností vůči záření. Vyztužují se dlouhými vlákny SiC, skleněnou tkaninou nebo čedičovými vlákny. Používají se na konstrukční prvky (kluzné součástky, ozubené kola, těsnící součástky kondenzátorů). Polyimid známý pod obchodním názvem Kapton vzniká bipolykondenzační reakcí aromatického dianhydridu s aromatickým diaminem. Je schopen si udržet své elektrické a mechanické vlastnosti v širokém rozsahu teplot (-120 °C až 350 °C). Nejčastěji se používá v kombinaci se skleněnou tkaninou nebo rekonstruovanou slídou jako izolační systém u transformátorů nebo točivých strojů. Jeho aplikací lze snížit hmotnost elektrických strojů až o 5 %. Dodává se ve formě folií. Relativní permitivita  $\epsilon_r$  dosahuje hodnot 3 až 3,5, ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$   $3 \cdot 10^{-3}$  a rezistivita  $\rho_v$  je  $1,5 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ . Elektrická pevnost  $E_p$  Kaptonu je 7,7 kV/mm pro materiál o tloušťce 1 mm. Pokud je vystaven působení tepla, netaje a nehoří. Speciálním druhem Kaptonu je Kapton CR, který je charakteristický schopností odolávat povrchovým částečným výbojům. [3, 36]

### 2.1.3.3 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery, které na rozdíl od reaktoplastů jsou za normálních podmínek v pevném skupenství. Zvýšením teploty dochází k přechodu ze stavu pevného do stavu plastického, tato změna je vratná. Termoplastické matrice se obvykle vyztužují částicemi a vlákny. Vzhledem k ceně se výztuž vlákny provádí pouze tehdy, pokud dochází k výraznému zlepšení mechanických vlastností, snížení ceny v porovnání s nevyztuženými termoplasty anebo pokud nelze zlepšit mechanické vlastnosti jiným způsobem. Od množství výztuže se odvíjejí finální vlastnosti kompozitu. Obvykle je objem výztuže mezi 15 a 50 hm. %. Pod 15 hm. % se neprojevují téměř žádné vyztužující vlivy a nad 50 hm. % se vlákna obtížně rovnoměrně smáčejí. Smáčení vláken termoplastem je obtížnější kvůli vyšší viskozitě. Vysoká viskozita je často upravována zvýšením teploty, s rostoucí teplotou se viskozita snižuje. Pomocí rozpouštědel lze také snížit viskozitu, ale pro mnoho termoplastů nejsou tato rozpouštědla k dispozici. Jako příklad materiálů, které se používají na výrobu termoplastických matic, lze uvést například polyamid, polyetylen, polypropylen, polykarbonát nebo některé špičkové termoplasty (TPI, PAI, PEEK, PPS aj.). Nejčastěji se vyztužují skleněnými vlákny

nebo skleněnými kuličkami, avšak použití termoplastických kompozitů je stále méně časté než reaktoplastických. [5, 32]

Krátká vlákna (do cca 0,2 mm) jsou používána především pro vyztužení a zesílení matrice při vstřikování. Zpracování krátkých vláken do plastů se u běžných materiálů PS, PVC a PE příliš často neprovádí vzhledem k ceně zpracování. Vyztužují se především konstrukční materiály PA 6, PA 66, PBT, PC, POM nebo PPO. V poslední době se rozšiřuje použití PP, který vyniká svými tepelnými vlastnostmi a snadným plněním. Dlouhá vlákna (až do 25 mm) se dávkuje z plastifikačního extrudéru přímo do lisovací formy. Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny se vyznačují dobrou odolností proti poškození, houževnatostí a nižšími surovinovými náklady na výrobu. Z nekonečně dlouhých vláken ve formě rohoží, tkanin nebo jednosměrných pásů se vyrábějí polotovary pro další zpracování. Vysokopevnostní termoplastové kompozity jsou příkladem použití vyztužení pomocí dlouhých vláken (80 %). Pokud jsou výztuží částice, používají se zpravidla větší o průměru alespoň 10 mikrometrů. Dojde tak ke snížení smrštění plastů a zároveň ke zvýšení tuhosti, která je ve všech směrech stejná. Někdy se do matrice přidává i více druhů plniv najednou, pak se využívá charakteristických vlastností jednotlivých plniv při zachování vlastností termoplastů. Přidáním kovových prášků se získává elektrická vodivost polymerů. Například přidání bronzového prášku do polyamidu umožňuje pozlacení polymeru. Stříbrný prášek zase dokáže zvýšit vodivost až na  $10^6 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  při 85 hm. % množství. Nevýhodou je ale skoková změna vodivosti při malé změně objemu plniva. Skleněné kuličky se používají v dnes hojně rozšířeném ABS plastu. Pomocí nich se zvýší tahová pevnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení, usnadní se tvarování a zkvalitní se povrch. [1, 32, 35]

Polyetylen je po PVC druhý nejpoužívanější termoplast. Vyrábí se ve čtyřech modifikacích: nízkotlaký, vysokotlaký, pěnový a zesítěný. Polyetylen je za normálních podmínek bílý až průhledný. Slouží k výrobě kluzných vodičích elementů, filtrů, ložisek nebo např. k výrobě lisovacích forem. Vyniká svou výbornou odolností vůči nízkým teplotám, ke křehnutí dochází totiž až při  $-120 \text{ }^\circ\text{C}$ , a je stálý až do teplot okolo  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se zvyšující se teplotou zároveň klesá chemická odolnost. Jeho elektrické vlastnosti se nemění vlivem vlhkosti, proto je vhodný na výrobu izolací žil a pláštěů kabelů. [35, 37]

Polypropylen je použitelný pro vyšší teploty než polyetylen, protože jeho teplota tání je  $176 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vzhledem k vysokému stupni krystalinity je neprůhledný, i když má podobnou strukturu jako PE. Lze také poukázat na nižší odolnost vůči mrazu, oxidaci a povětrnosti,

ale dosahuje větší pevnosti, tvrdosti a odolnosti vůči oděru. Zároveň dosahuje větší chemické odolnosti i při vyšších teplotách. Polypropylen je využíván na výrobu mechanicky i chemicky odolných vláken, na součástky strojů a přístrojů, na izolaci kabelů. Výhodou polypropylenových matric plněných částicemi je nízká cena při zachování výborných vlastností. Nejrozšířenějšími plnivy jsou uhlíčitán vápenatý, hydroxid hořečnatý nebo se vyztužují skleněnými vlákny. [1, 35]

Polykarbonáty jsou polyestery kyseliny uhličitě a dihydroxysloučenin. Spojují řadu vlastností, které souhrnně nebyly zjištěny u jiných termoplastů. Jsou charakteristické výbornými mechanickými a dielektrickými vlastnostmi, které jsou konstantní v širokém rozmezí teplot (-70 °C až 140 °C). Svou houževnatost si drží až do velmi nízkých teplot. Vyznačují se malou nasákavostí, povětrnostní odolností a transparentností. Snadno se i zpracovávají. Jedná se o polymery zdravotně nezávadné, bez chuti a zápachu. Mají dobré elektroizolační vlastnosti a odolávají UV záření, dlouhodobému působení vody, páry, amoniaku, alkoholů a jiných látek. [35]

Polytetrafluoretylen je považován za polymer s nejlepšími izolačními vlastnostmi. Je znám spíše pod názvem Teflon nebo Ftoroplast. Vyniká velmi dobrou odolností vůči chemikáliím, je lepší než většina plastů, dokonce i než některé drahé kovy. Vzhledem k jeho bodu tavení je použitelný až do teplot 250 °C. Je nehořlavý a nenasákavý. Vzhledem k jeho obtížnosti zpracování, se používá jen pro zvláštní a náročné účely. Nevýhodou je také malá odolnost vůči výbojům a ionizačnímu záření. Jako náhrada za tento polymer se někdy používá polyfenylenoxid, který má podobné elektrické vlastnosti, ale je mnohem lépe zpracovatelný. Je charakteristický výbornými mechanickými (hlavně kluzné) a elektrickými vlastnostmi, tepelnou odolností a odolností vůči vlhkosti a chemickým vlivům. [37]

PVC neboli polyvinylchlorid je nejrozšířenější polymer a patří mezi nejstarší syntetické makromolekulární izolanty. V elektrotechnice se používá jako náhrada za pryž nebo na izolace kabelů a vodičů. Není vhodný pro vysokofrekvenční aplikace. [37]

Tab. 2: Srovnání termoplastů a reaktoplastů (převzato z: [35])

	<b>Termoplasty</b>	<b>Reaktoplasty</b>
<b>Matrice</b>	Polymerovaná, vysokoviskozní tavenina, špatně se spojuje lepením	Nevytvrzená, nízkoviskozní, dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem
<b>Cena matrice</b>	Nízká, ale i vysoká	Nízká
<b>Předimpregnace</b>	Obtížné smáčení a proscování	Snadné
<b>Cena předimpregnace</b>	Vysoká	Nízká
<b>Skladování</b>	Neomezeně skladovatelné	Omezená skladovatelnost (v chladu), reakce pomalu pokračuje
<b>Polotovar</b>	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GMT), pásy	Lisovací hmoty SMC (prepregy)
<b>Přímé zpracování</b>	Granulát (krátká vlákna), přímo zpracovatelný, dlouhovláknitý polotovar (D-LFT)	Výztuž a reaktivní pryskyřice
<b>Teplota při zpracování</b>	Teplota taveniny	Teplota okolí
<b>Tvarování</b>	Vhodné pro velké série	Nevhodné
<b>Mechanické chování</b>	Houževnaté	Dynamicky zatížitelné, křehký lom
<b>Chování za tepla</b>	Výrazné změknutí při T <sub>g</sub>	Méně závislé na teplotě
<b>Stárnutí</b>	Málo odolné až odolné	Velmi odolné proti stárnutí
<b>Možnost opravy</b>	Omezená	Dobrá
<b>Plocha povrchu</b>	Přiměřená, svařitelná	Dobrá, tvrdá, lze lepit a natírat

#### 2.1.4 Uhlíková matrice (Carbon Matrix Composites)

Matrici tvoří uhlík v různém stavu strukturní uspořádanosti. Výztuži jsou uhlíková vlákna. Uhlíkové matrice jsou vhodné pro použití v extrémních podmínkách, protože si dokážou zachovat své vlastnosti až do teplot 2500 °C. Kompozit uhlík – uhlík se vyznačuje nízkou hmotností, žáruvzdorností, tepelnou odolností, dobrými mechanickými vlastnostmi a chemickou odolností. Uhlíková matrice je obdobně křehká jako keramická. Vykazují malý teplotní součinitel roztažnosti. Nevýhodou kompozitů s uhlíkovou maticí je odolnost při vysokých teplotách v oxidační atmosféře. Tento problém lze odstranit pomocí povlaků ze vzácných kovů, karbidu křemíku nebo impregnací pomocí různých sloučenin. Dále se tyto kompozity používají jako nosné



konstrukce nosičů zařízení a zrcadel u družic, pro výrobu forem pro slinutí kovů, keramiky a karbidu wolframu, pro konstrukce reaktorů a pecí. Je také nutné zmínit výborné otěrové a třecí vlastnosti. Koeficient tření se s teplotou nemění, a proto se hodí na výrobu ložisek a jejich pouzder, která pracují za vysokých teplot. Své uplatnění nacházejí především v kosmonautice, kde slouží jako tepelná izolace raketoplánů. [8, 38]

## 2.2 Výztuž

- částicová výztuž
- vláknová výztuž

Má-li se jednat o kompozitní materiál, je nutné, aby podíl výztuže byl větší než 5 %. Pro vyztužování matric lze použít široké spektrum vláken a částic o různých rozměrech. Podle velikosti výztuže lze rozdělit kompozity na: mikrokompozitní, nanokompozitní a makrokompozitní materiály. Mikrokompozity jsou v současnosti nejvíce používané v oblasti průmyslu a příčné rozměry vláken a výztuže dosahují maximálně hodnot  $10^0$  až  $10^2 \mu\text{m}$ . Obvykle jsou vyztuženy anorganickými částicemi a vlákny. S makrokompozity se lze setkat převážně ve stavebnictví. Velikost příčných rozměrů se v tomto případě pohybuje v rozmezí  $10^0$  až  $10^2 \text{mm}$ . V poslední době jsou velmi rozšiřující se skupinou nanokompozity, kde se délka částice nebo průměr vlákna určuje v jednotkách nm. [16]

Pro zajištění vzájemné soudržnosti fází, vláken nebo částic s ostatními fázemi, se povrch sekundární fáze upravuje apretací. Špatná přilnavost výztuže k matrici vede ke ztrátě vyztužujícího efektu vláken a následně se snáze poškodí kompozitní materiál. Dochází k nanesení chemické látky na povrch vláken nebo částic. Nejčastější látky, které se používají při apretaci, jsou silany a organické sloučeniny titanu. Apretační látky mohou obsahovat jednak anorganické látky, ale i organické. [39]

### 2.2.1 Částicová výztuž

Částicové kompozity jsou plněné nevláknými útvary malých rozměrů. Částice mohou být ve tvaru koule, krychle, kvádrů nebo jiného tvaru. Rozměry částic pak mají významný vliv na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Vzhledem ke svým malým rozměrům nejsou částice příliš účinné při zlepšování odolnosti vůči lomu, ale přispívají ke zlepšení tuhosti kompozitů. Podílejí se i na přenosu mechanického namáhání, ale v mnohem menším měřítku než vlákna. Částice jsou účinné ke zlepšení tepelné a elektrické vodivosti, obrobitelnosti, k zvýšení odolnosti vůči opotřebením,

k redukci tření nebo k redukci smrštění. Často se přidáním částicového plniva jen snižují náklady na výrobu finálního kompozitního materiálu. Na částice se používá mnoho materiálů, např. skleněné kuličky, částice kovů, karbidy, oxidy nebo nitridy. [2]

Podle velikosti dělíme částice na:

- písek – 2 až 0,25 mm,
- jemný písek – 0,25 až 0,05 mm,
- hrubý prach – 0,05 až 0,01 mm,
- jemný prach –  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  mm,
- disperze –  $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  mm,
- nanočástice – pod  $10^{-5}$  mm. [5]

Volba vhodného materiálu částic tedy závisí na požadovaných vlastnostech výsledného kompozitu. Kombinace jednotlivých materiálů částic a matric byla popsána v předchozí části této kapitoly, zde jsou zmíněny jen některé příklady. Například částice olova v kombinaci s měděnými slitinami a oceli slouží ke zlepšení obrobitelnosti materiálu. Olovo také zlepšuje kluzné vlastnosti ložisek z měděných slitin. Částice křehkých kovů (W, Cr nebo Mo) zlepšují chování kompozitů při zvýšené teplotě. Kompozity s částicemi těchto kovů v kombinaci se stříbrnými nebo měděnými matricemi se používají na výrobu elektrických kontaktů. Dále částice wolframu, chromu a titanu se používají při výrobě tzv. cermentů. Tyto materiály se používají na nástroje pro obrábění, ochranná pouzdra termočlánků nebo na vývody pecí a kotlů. Anorganickými plnivými se zlepšují různé vlastnosti plastů. Elastomery se často plní černými sazemí nebo křemennou moučkou pro zlepšení pevnosti a snížení brusu. Přidáním kovového prášku se zase změní elektrické a tepelné vlastnosti, ale zároveň se sníží součinitel roztažnosti. Kombinace slídových vloček a sklovitých matric se často používá v elektrotechnice. [2]

Pokud je rozhodující váha kompozitu, lze použít duté částice, např. z korundu nebo skla. Zároveň ale dojde k mírnému poklesu tuhosti a pevnosti. Nejčastěji se tento typ částic aplikuje do polymerních matric. Průměr částic se pohybuje od několika desítek až po stovky mikrometrů. Je nutné, aby kuličky neobsahovaly otvory ve stěně, částice by se v materiálu chovala jako mikropór. [5]

### 2.2.2 Vlákenná výztuž

Hlavním úkolem vyztužujících vláken je absorbování vnějších sil. Vlákna jsou tedy nositelem pevnosti a tuhosti v kompozitu. Obvykle mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost než matrice. Na rozhraní výztuže a nosné složky dochází ke vzniku smykových sil, které umožňují přenos působícího napětí na matrici do vláken. Smykové napětí roste s délkou vlákna. Matrice tedy přenáší vnější působení sil na nosnou složku a zároveň se ale deformuje více než samotná vlákna. [1]

V současné době je pro vyztužování matric k dispozici široké spektrum materiálů, které lze použít na výrobu vláken. Podle materiálu lze vlákna rozdělit na:

- přírodní vlákna,
- skleněná vlákna (až 80 % výroby kompozitů),
- uhlíková vlákna,
- aramidová a silonová vlákna,
- keramická vlákna,
- kovová vlákna,
- whiskery.

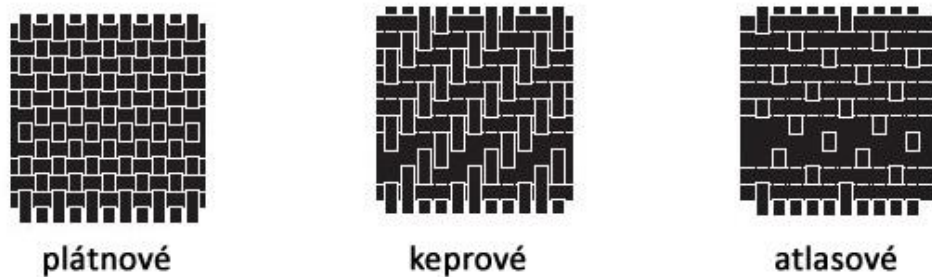
Výsledné vlastnosti kompozitních materiálů jsou určeny nejen materiálem, ale i délkou vláken, orientací vláken, tvarem a strukturou. Z toho vyplývá, že vlákna lze dělit kromě použitého materiálu, ale i podle struktury (amorfni, monokrystalická, polykrystalická, multifázová a organická), podle maximální teploty, podle počtu vrstev (jednovrstvé, vícevrstvé) nebo podle směru orientace vláken (jednosměrné, mnohosměrné). Průřez vláken je obvykle kruhového tvaru a podle jeho velikosti dělíme vlákna na:

- nanovlákna – do 100 nanometrů,
- mikrovlákna – 0,1 až 1 mikrometrů,
- střední vlákna – 1 až 10 mikrometrů,
- hrubá vlákna – nad 10 mikrometrů.

Podle počtu vrstev lze pak vlákenné struktury dělit na jednovrstvé a mnohovrstvé. Do jednovrstvých patří například tkaniny, textilie a prepregy a do mnohovrstvých řadíme lamináty a sendviče. [1, 5]

Vlákna jsou sdružována do pramenů a z nich se následně vyrábí polotovary, které se dále zpracovávají na kompozitní komponenty. Mezi nejpoužívanější polotovary patří například selané prameny, rovingy, různé druhy tkanin, rohože a prepregy. Tkaniny jsou složeny ze vzájemně křížících se a propletených vláken. Jedná se o plošnou a dobře

zpracovatelnou formu výztuže. Na následujícím obrázku jsou znázorněny tři druhy provedení skleněných tkanin.

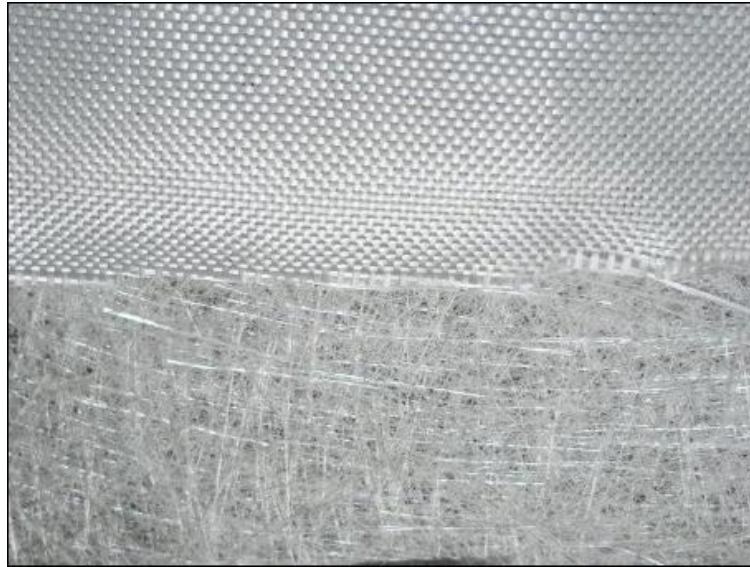


Obr. 5: Provedení skleněných tkanin (převzato z: [54])

Rovingy jsou svazky nekonečných vláken s nulovým nebo minimálním počtem zákrutů. Počet elementárních vláken je určen jemností rovingu. Běžně se dodávají v tloušťce 1k, 3k, 6k, 12k a 24k. 1k je označení pro 1000 jemnějších svazků nekonečných vláken (tzv. filamentů). Rovingy se obvykle vyrábějí z vysoko pevnostních vláken ze skla, aramidu, uhlíku nebo čediče. Pokud jsou spředená vlákna rozdílných materiálů, například vlákna s vysokou pevností s termoplastickými vlákny, jedná se o tzv. hybridní rovingy. Vyznačují se vysokou pevností a tuhostí v podélném směru a jsou využívány pro kompozitní konstrukční díly, které jsou zatěžovány převážně v jednom směru. V praxi se pomocí rovingů vyztužují listy rotorů, lana s vysokým dynamickým zatížením nebo hnací řemeny. Dalším polotovarem je vyztužující rohož. Rohože jsou buď z nasekaných rovingů z krátkých a středně dlouhých vláken, nebo z kontinuálních vláken či existují tzv. povrchové rohože. Rohože ze sekaných pramenců se vyrábějí z 25 nebo 55 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně uložených v rovině. Vlákna jsou následně uložena do jednotlivých vrstev. Polotovar je lehce naimpregnovaný pryskyřicí a slisovaný do výsledného tvaru rohože. Rohože z kontinuálních vláken jsou složeny z nekonečných dlouhých vláken, která jsou uložena bez přesně určené orientace ve smyčkách do vrstev a následně jsou naimpregnována. Povrchové rohože slouží jako ochranné vrstvy a zvyšují odolnost vůči okolním podmínkám (např. odolnost proti korozi nebo chemickým látkám). Prepreg je zkrácený tvar z anglických slov preimpregnated fibers (předimpregnovaná vlákna). Jedná se o kompozitní plošný útvar z uspořádaných vláken, na která je nanášena pryskyřice v B-stavu. Tento stav pryskyřice nastává tehdy, když sice již vzniklo zesílení molekul, ale síť má stále velmi malou hustotu. Pryskyřice připomíná lepidlo. Podle použitého pojiva mají prepregy rozdílnou životnost při běžné teplotě. Prepregy mohou mít různou geometrii:

- jednosměrné prepregy (nejvíce používané v technice),
- vícevrstvé prepregy (jednosměrně vyztužené vrstvy s úhly  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ),
- tkaninové a rohožové prepregy.

Hlavní výhodou prepregů je vysoký podíl vláknové výztuže, stejnosměrnost a hladkost hotových dílů. Mezi nevýhody lze zařadit vyšší cenu, vznik velkého množství odpadu při zpracování, nutnost skladování při nižších teplotách, aby nedocházelo k vytvrzování pryskyřice. Zvláštní skupinou polotovarů jsou pak lisovací těsta a premixy. [16, 35, 42, 50]



Obr. 6: Rozdíl mezi tkaninou (nahore) a rohoží (dole) (převzato z: [54])

### 2.2.2.1 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou vyráběna z obnovitelných zdrojů na bázi celulózy. Příkladem takových materiálů je sisal, len, konopí, bavlna, ramie nebo juta. Trendem současnosti je výroba celulózových nanovláken pomocí rozvláknění dřeva. Přírodní vlákna mohou vykazovat velmi dobré vlastnosti, například pavoučí vlákno o průměru 0,02 až 7 mikrometrů může mít mez pevnosti až 1140 MPa a tažnost 31 %. Hlavní výhodou těchto materiálů je odolnost proti stárnutí a nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Nevýhodou je citlivost na působení vlhkosti, omezená délka vlákna a možnost vzniku změn vyvolaných biodegradací. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti se tyto materiály používají pro lehké konstrukce v automobilech. Lze se také setkat s přírodními minerálními vlákny. Jedná se o krátká vlákna chryzotilu (serpentin, bílý azbest), která jsou zvlněná a ohebná. Dnes jsou ale všechna vlákna na bázi azbestu zakázána kvůli prokázaným karcinogenním účinkům. [5, 16, 35]

### 2.2.2.2 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna vynikají hlavně vysokou pevností, odolností vůči vysokým teplotám, nehořlavostí, dobrými elektrickými a chemickými vlastnostmi, čímž je jejich použití předurčeno nejen v oblasti elektrotechniky, ale i v jiných průmyslových odvětvích. Tepelná vodivost a tepelná roztažnost jsou o polovinu nižší než u oceli. Tyto tepelné vlastnosti překonávají tepelné vlastnosti i mnoha jiných materiálů. Ani dlouhodobé trvalé namáhání příliš nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Tuhost kompozitů lze upravovat i tvarem vlákna. Nejčastěji se lze setkat s kruhovým, čtvercovým, obdélníkovým, trojúhelníkovým nebo hexagonálním průřezem. Poslední jmenované druhy umožňují kromě zvýšení pevnosti i lepší možnosti vyplnění prostoru, čímž se zvýší objemový podíl vláken v kompozitu. Výhodou skleněných vláken například oproti uhlíkovým nebo aramidovým je jejich poměr ceny a hmotnosti. [1, 4]

Nejvíce se skleněná vlákna využívají jako výztuž kompozitních materiálů s polymerní matricí. Samotná skleněná vlákna jsou vyráběna z různých druhů sklovin např.: A, C, D, E, L, M, S, R, taveniny křemene a další nové druhy. Nejčastěji se lze ale setkat zejména s E-sklem, C-sklem a S-sklem. Konečné vlastnosti kompozitního materiálu vyztuženého skleněnými vlákny jsou závislé na druhu, obsahu a orientaci skleněných vláken nebo výrobků z nich. Nejvíce skleněných vláken se dnes vyrábí z E-skla (dle [35] až 90 %). Jedná se o bezalkalickou vápenato-hlinito-křemičitou sklovinu s výbornými elektroizolačními vlastnostmi, mezi které patří nevodivost, velký povrchový odpor, malá relativní permitivita. Obsah alkálií se pohybuje pod hranicí dvou procent, čímž je zajištěna korozní odolnost. Korozní odolnost vláken je velmi důležitou vlastností kompozitních materiálů, protože pokud je sklo vystaveno korozi vody, ztrácí svou hmotnost a tím dochází k narušení skla. Bod měknutí E-skla je vyšší než 625 °C. V elektrotechnice jsou velmi využívány ve spojení s epoxidovou pryskyřicí. A-sklo je využíváno ve stavebnictví a na výrobu vláken se příliš nepoužívá. Vlákna z C-skla jsou odolná vůči kyselinám, což je zapříčiněno vysokým obsahem alkalických prvků. Někdy je také nazýváno jako tzv. chemické sklo. Vyznačují se nižší teplotou měknutí a jejich mechanické vlastnosti se s teplotou rychle zhoršují. Vlákna z D-skla jsou určena pro dielektrická zařízení, protože jsou charakteristické malými hodnotami relativní permitivity a malým ztrátovým činitelem. Původně bylo vyvinuto speciálně pro radary. Vlákna z L-skla obsahují oxid olova, to zabraňuje průchodu rentgenových paprsků, a proto je vhodné využívat tato vlákna na výrobu laboratorních přístrojů. Své uplatnění nacházejí také

ve vojenství a medicíně. M, S, R skla se vyznačují zvýšenou pevností a modulem. Vlákna z taveného křemene mají nízkou relativní permitivitu, nízký ztrátový činitel při vysokých frekvencích, malý součinitel teplotní roztažnosti. Jsou charakteristická nulovou absorpcí vlhkosti a dobrou prostupností pro UV paprsky světelného záření., odolností vůči měknutí při zvýšených teplotách, nízkou hustotou a vysokou pevností. Tato vlákna jsou specifická zvyšujícím se modulem pružnosti se zvyšující se teplotou. Skleněná vlákna se dále zpracovávají do různých polotovarů (rovingy, tkaniny), které jsou následně využívány pro konečné výrobky. Jednotlivá vlákna se vyskytují samostatně pouze zřídka. Používají se k vyztužení termoplastů, reaktoplastů, lehčených plastů a k dalšímu textilnímu zpracování. [1, 16, 35]

Tab. 3: Vlastnosti vybraných typů skel používaných na výrobu vláken [1, 16]

Typ skla	C	D	E	S	Tavený křemen
Průměr vláken [ $\mu\text{m}$ ]	9 - 13	7 - 15	5 - 16	9 - 13	9 - 14
Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	2,49	2,14	2,54	2,49	2,19
Youngův modul [GPa]	69	55	73	88 - 91	62
Pevnost v tahu [GPa]	až 3	2,6	0,66 - 1,3	0,43 - 0,46	5
Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	1	0,8	1	1	1,4
Relativní permitivita (při 100 Hz) [-]	6,7	3,61	6,43	4,57	3,78
Ztrátový činitel (při 100 Hz) [-]	$15\cdot 10^2$	$3\cdot 10^3$	$4,2\cdot 10^3$	$3,3\cdot 10^3$	$5\cdot 10^4$

### 2.2.2.3 Uhlíková a grafitová vlákna

Za uhlíková vlákna jsou považována vlákna, která vznikají při teplotě 800 až 1600 °C. Grafitová vlákna vznikají při teplotách nad 2200 °C. Dalším kritériem pro vymezení, zdali se jedná o uhlíkové či grafitové vlákno, je obsah uhlíku. Do 92 % obsahu se jedná o uhlíkové vlákno, s větším procentem se pak jedná o grafitové vlákno. V uhlíkových vláknech je obsažen uhlík různých modifikací. Ten se obvykle může vyskytovat ve třech formách: diamant, grafit a amorfní forma. Vlákna jsou složena z více než 90 % z uhlíku, 7 % dusíku, 1 % kyslíku a 0,3 % z vodíku. Uhlíková vlákna jsou charakteristická extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale nízkou tažností. Specifický je záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$ , to znamená, že při ohřevu se vlákno zkracuje. Ve směru kolmém je ale koeficient teplotní roztažnosti  $\alpha$  kladný. To umožňuje vhodnou kombinací vrstev vyrábět lamináty s různým tepelně deformačním chováním. V podélném směru se uhlíková vlákna vyznačují malým elektrickým odporem. [1, 16, 35, 50]

Uhlíková vlákna jsou vyráběna mnoha způsoby. Mezi nejdůležitější je řazena oxidace a karbonizace organických vláken nebo pyrolýza dehtových a asfaltových smol. Výchozí

surovinou pro výrobu uhlíkových vláken je celulóza, polyakrylonitril (PAN) a smola. Vlákná z celulózy mají méně dokonalou strukturu. Používají se jako izolační materiál pro vysoké teploty. PAN je dnes považován za standardní materiál s nejlepšími vlastnostmi pro výrobu uhlíkových vláken. Vlákná ze smoly mají dobré tepelné a elektrické vlastnosti, ale jejich pevnost v tahu je podstatně nižší než u ostatních vláken. Výroba z organických vláken je rozdělena na tři kroky:

- nízkoteplotní oxidace, stabilizace na vzduchu při teplotě 200 až 400 °C (1 – 2 hod),
- karbonizace v inertní atmosféře při teplotě 1000 °C (30 – 60 sec),
- grafitizace v inertní atmosféře při teplotě přes 2200 °C (15 – 20 sec).

Během karbonizace dochází k odštěpení téměř všech prvků až na uhlík. Grafitizací se zase zlepšují mechanické vlastnosti. Při vysokých teplotách je pak tvorba grafitové struktury ukončena, i když vzdálenost vrstev ve vláknech je vždy větší než u vrstev čistého grafitu. Během výroby je vlákno pod tahovým namáháním, a tak dochází k orientaci malých grafitových krystalků vytvářených za vysokých teplot. S ohledem na výrobní postupy, použitou teplotu a napětí vlákna během výroby lze získat vlákna s různou tuhostí a pevností. Vzhledem k orientaci krystalků vůči ose vlákna je možné vyrábět vlákna buď s vysokou pevností, nebo s vysokou tuhostí. Pak lze uhlíková vlákna dělit následovně:

- UHM – velmi vysoký modul pružnosti ( $E > 400$  GPa,  $R > 1,7$  GPa),
- HM – vysoký modul pružnosti ( $E = 300 - 400$  GPa,  $R > 1,7$  GPa),
- UHS – velmi vysoká pevnost ( $E = 200 - 250$  GPa,  $R > 3,1$  GPa),
- HS – vysoká pevnost ( $E = 200 - 250$  GPa,  $R > 2 - 3,1$ ). [1, 16, 35]

Se zvyšujícím se zatížením stoupá u uhlíkových vláken oproti syntetickým vláknům hodnota modulu. Výhodou je ale i vysoká pevnost, malá objemová hmotnost, vysoká chemická odolnost a odolnost vůči vysokým teplotám. Při těchto teplotách se ani nemění vlastnosti uhlíkových vláken. Nevýhodou je špatná odolnost vůči oxidaci při teplotách nad 500 °C a náchylnost na poškození během zpracování. Soudržnost s většinou matric je malá, pokud nedochází k předchozí úpravě, kterou je například slabá oxidace povrchu nebo pokrytí vhodnou povrchovou vrstvou. Upravují se apretací směsí na bázi epoxidové pryskyřice, která slouží jako ochrana při zpracování a zároveň zlepšuje vazbu mezi matricí a vlákny. Je nutné dodržet správné skladovací postupy, jinak dochází k vytvrzení povrchové vrstvy a vlákna pak ztrácejí ohebnost. Uhlíková vlákna jsou sice hořlavá, ale rychlost hoření je poměrně pomalá. Tato vlákna jsou nenahraditelná tam, kde je požadována vysoká pevnost a tuhost vztážená na měrnou hmotnost. [1, 35]



### 2.2.2.4 Polymerní vlákna

Polymerní syntetická vlákna se v minulosti vyznačovala nízkým modulem pružnosti, postupně ale byla vyvinuta vlákna z materiálů, jako je například kevlar, která dosahují vysokého modulu i pevnosti. Výhodou polymerních vláken je malá hustota. Nejčastěji se používají vlákna na bázi aramidů a silonů. Aramidová vlákna jsou synteticky vyráběná organická vlákna z aromatických polyamidů. Typickým moderním příkladem aramidů je Kevlar, který byl patentován v roce 1971 společností DuPont. Vyrábí se ve dvou variantách: Kevlar 49 (vyšší modul pružnosti) a Kevlar 29 (tlumící schopnosti). Kevlar je odolný vůči abrazi, houževnatý a schopný se plasticky deformovat při působení kolmé síly na osu vlákna. Všechna vlákna se opatřují povrchovou úpravou, která zlepší adhezi. Nevýhodou polymerních vláken je zvýšená citlivost na vysoké teploty, ale aramidy jsou obvykle stabilní až do teplot 150 °C, se ztrátou pevnosti 30 % při 250 °C a s rozkladem až při teplotě 425 °C. Stejně jako uhlíková vlákna mají záporný teplotní součinitel délkové roztažnosti ve směru vláken. Vlákna ztrácejí své vlastnosti vlivem UV záření za přítomnosti kyslíku. Na rozdíl od skleněných a uhlíkových vláken jsou aramidová vlákna citlivá na tlakové namáhání a vlhkost. Ostatní vlákna aramidová a amidová nedosahují vlastností Kevlaru. Patří mezi ně např. vlákna Arimid, Polyoxazid, Oxalon, Kermel, Kynol nebo Kaisol. Kynol a Kaisol vynikají v krátkodobé odolnosti vůči vysokým teplotám až nad 1000 °C. Všeobecný trend ve vývoji polymerních vláken spočívá ve snaze spojit výhody termoplastů a reaktoplastů. Například krátká polyetherimidová vlákna vznikají zvlákněním termoplastu. Jedná se o nehořlavá vlákna s vysokou teplotní odolností. Dále jsou vlákna vyráběna z PBI, PI, POK, PPS, PET, PE a dalších. Obecně jsou polymerní vlákna uplatňována například pro konstrukční kompozity, na oděvy proti ohni, na protibalistickou ochranu a na výrobu lan a tkanin. [1, 5, 16, 35, 50]

Tab. 4: Porovnání polymerních vláken se skleněnými a s ocelí (převzato z: [5])

Vlákno	Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	Pevnost [GPa]	Youngův modul [GPa]	Prodloužení při lomu [%]
Nylon	1,14	1	5,62	18
Kevlar	1,44	2,8	63,3	4
Kevlar 49	1,45	2,8	134	2,4
E-sklo	2,54	3,4	72	3
Ocel	7,8	2	205	2

### 2.2.2.5 Keramická vlákna

Keramická vlákna jsou charakteristická vysokou pevností, odolností vůči vysokým teplotám a nezávadností pro životní prostředí. Na rozdíl od uhlíku, skla a aramidu vydrží větší tlak. Používají se nejčastěji pro výtzuž keramických a kovových matric. Jsou vhodná jako výtzuž pro kompozity určené pro vysokoteplotní použití. Keramická vlákna jsou vyráběna povlakováním chemickými výpary, pyrolýzou polymerů nebo metodou sol-gel. Keramická vlákna lze dělit na: oxidická a neoxidická. Mezi oxidickou keramikou řadíme vlákna na bázi  $Al_2O_3$ . Oxid hlinitý se vyskytuje v několika formách  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  a  $\eta$ . Nejstabilnější formou je  $\alpha-Al_2O_3$ . Vynikají vysokou pevností v tlaku a trvale odolávají teplotám do 1000 °C. Nevýhodou těchto vláken je křehkost, která je způsobena silnou vazbou rozhraní vlákna s matricí. Neoxidická keramická vlákna jsou převážně vlákna z nitridů a karbidů. Vlákna z karbidu křemíku (karborundová vlákna) se vyrábějí pyrolýzou polymerů nesoucích Si. Je možné použít pro vyztužování keramických, kovových a polymerních matric. Nitridy bóru jsou odolné vůči vysokým teplotám, mají vysoký elektrický odpor (až  $10^{14} \Omega \cdot cm$ ), vysokou teplotní vodivost a oxidační stabilitu. Dále jsou vyráběna vlákna z kombinací prvků: Si- $BO_2$ , Cr-Ca, Al-Co, Si-B-C-N nebo  $Si_3N_4$ . Tyto vláknenné materiály mají podobné vlastnosti, někdy i lepší než klasická keramická vlákna. [1, 5]

Tab. 5: Vlastnosti základních typů keramických vláken (převzato z: [5])

Vlákno	Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	Pevnost [GPa]	Youngův modul [GPa]	Prodloužení při lomu [%]
Křemen	2,19	5,8	72,5	11
Karborundum	2,55	2,8	240	-
Korund	3,9	1,4	385	-
Spinel	3,2	2,5	240	-

### 2.2.2.6 Kovová vlákna

Pomocí kovových vláken lze vyztužovat polymerní, keramickou a kovovou matrici. Lze je připravovat velkým množstvím metod, například mechanickými, elektrotechnickými, depozicí par nebo kombinací více metod. Obecně kovová vlákna patří k těm nejlevnějším, výjimku ale tvoří některé kovové prvky, jejichž cena je ale velmi vysoká. Samotnou skupinou jsou amorfni kovy. Ty vykazují vysoký modul pružnosti. Hodnoty pevnosti těchto materiálů se pohybují až okolo hranice 8 GPa. Mechanické vlastnosti jsou závislé na výrobním procesu, pokud během přípravy vzniknou „bublínky“, vlastnosti se zhoršují. V mnoha literaturách se uvádí, že amorfni kovy jsou materiály

budoucnosti. Jsou unikátní svými mechanickými vlastnostmi. Dnes jsou mezi kovová vlákna řazena i hybridní organokovová vlákna, např. Si-Ti-C-O. Dále se vyrábějí kovokeramická vlákna z oxidů kovů, např. Al-B-Si, Zr-Si nebo Al-Cr-Si. Zajímavou skupinou jsou borová vlákna, jsou velmi lehká, zároveň ale tuhá a pevná. Bor je nevhodný na výrobu vláken tažením, proto se využívá chemická depozice z par  $\text{BCl}_3$  na velmi jemné wolframové dráty. Povrch je chráněn karborundem. Vlákna jsou extrémně tuhá a pevná, ale velmi rychle dochází ke zhoršování vlastností při teplotě nad  $450\text{ }^\circ\text{C}$ . [1, 5]

Tab. 6: Vlastnosti vybraných kovových vláken (převzato z: [5])

Vlákno	Bor	Wolfram	Beryllium	Ocel	Ti slitiny	Al
Pevnost [GPa]	2,8	4,2	1,4	1,5	0,55 - 2,2	0,6
Youngův modul [GPa]	385	414	240	210	118	73
Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	2,63	19,3	1,83	7,8	4,51	2,66

### 2.2.2.7 Whiskery

Whiskery jsou vláknité monokrystaly, které značně převyšují vlastnostmi ostatní tuhé látky. Vynikají extrémní pevností, která je způsobená minimálním počtem mřížkových poruch. Jejich průřez je hexagonální, čtvercový nebo rovnoběžníkový. Whiskery jsou vyráběny kondenzací přesycených par nebo pyrolýzou. Mohou být kovové, keramické nebo uhlíkové. Existují i přírodní whiskery některých keramik. Jejich vlastnosti závisí hlavně na průměru, dokonalosti povrchu a na podmínkách růstu. Tlusté whiskery jsou nepevné, protože ve struktuře obsahují řadu dislokací, zatímco tenké whiskery do  $1\text{ }\mu\text{m}$  mají jen jednu šroubovou dislokaci uprostřed. Tato dislokace je pevná a není schopná skluzu při běžných velikostech zatížení. Pokud je poměr průměru k délce malý ale nad  $1/20$ , jedná se o krystalové destičky. Ty mají vysokou pevnost, která dosahuje až 10 GPa. Mezi whiskery se někdy zařazují tzv. mikrovlákna na bázi fosfátů. Mají vysokou pevnost, modul pružnosti a teplotu tání  $750\text{ }^\circ\text{C}$ . Whiskery lze použít i u kompozitů vyztužených s dlouhými vlákny, zvyšují mezilaminární pevnost u laminátů. Uplatnění nachází například u vysokoteplotních spalovacích turbín. [1, 5, 16]

Tab. 7: Vlastnosti vybraných whiskerů (převzato z: [5])

Složení whiskeru	Pevnost v tahu [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]
Korund	15	470	3,96
SiC	21	270	3,17
$\text{Si}_3\text{N}_4$	14	380	3,18
C	19	7	2,26

## 2.3 Plniva

Plniva se někdy přidávají do kompozitních materiálů pouze za účelem snížení ceny výsledného materiálu, pokud jsou ale použita plniva pro změnu fyzikálních vlastností, hovoří se o tzv. funkčních plnivech. Přidáním plniv při výrobě kompozitních materiálů se zlepšují výsledné elektroizolační, tepelné, mechanické aj. parametry. Plniva se vkládají do pojiva podle typu a účelu v různých hmotnostních objemech. V elektrotechnice se používají přírodní i synteticky vyrobené látky. Pro elektroizolační účely je nejvýznamnější slída ve formě slídového papíru, ale i tavený křemen, sklo, písek, Kapton nebo porcelán. Relativní permitivitu izolantu lze zlepšit křemičitanem zirkoničitým, oxidem titaničitým nebo síranem barnatým. Odolnost vůči elektrickému oblouku a plazivým proudům lze zvýšit plnivy typu: bauxit, magnezit nebo trihydrát oxidu hlinitého. Pro některé aplikace v elektrotechnice jsou vyžadovány kompozity se zvýšenou elektrickou vodivostí. V takovém případě se přidávají elektricky vodivá plniva, např. saze, kovové částice aj. Dále se do kompozitů přidávají aditiva, pigmenty a vnitřní separátory. Aditiva upravují po přidání malého množství látky smáčení vláken. Příkladem aditiv jsou UV absorbéry. Pigmenty jsou využívány k barvení zejména polymerů. Částice barviv jsou charakteristické velmi malými rozměry v řádech mikrometrů a určitou tvrdostí. Nejčastěji jsou využívána anorganická barviva, např. kobalt, oxid chromitý, saze, oxid železitý, sulfid zinečnatý aj. Vnitřní separátory umožňují snazší vyjímání kompozitních materiálů z forem, případně jsou separátory využity jako oddělovací vrstvy. Mnoho forem plniv bylo již v této práci popsáno v kapitole matrice a výztuž, proto se v této kapitole zaměřím pouze na slídu a saze. [3, 43, 44]

Tab. 8: Příklady používaných pigmentů (převzato z: [35])

Barva	Název	Velikost částice [μm]	Hustota [g · cm <sup>-3</sup> ]	Tvrdost podle Mohse
Modrá	Kobalt	0,2 – 0,3	4,4	5,5
Zelená	Oxid chromitý	0,3	5,2	9
Červená	Oxid železitý	0,2 – 1,	5,2	5 - 6
Černá	Saze	0,01 – 0,2	1,8 – 1,9	1 – 2
	Oxid železitý	0,6	5,2	5 – 6
Bílá	Oxid titaničitý	0,2 – 0,4	Anatas: 3,9	5,5 - 6
			Rutil: 4,2	6 – 7,5
	Sulfid zinečnatý	0,33 – 0,35	4,0	3

### 2.3.1 Slída a slídové výrobky

Slída patří mezi hlavní druhy plniva, která se používají v elektroizolačních materiálech. Jedná se o přírodní krystalický materiál s vrstevnatou strukturou. V elektroizolační technice rozlišujeme dva druhy: muskovit (draselná slída) a flogopit (hořečnatá slída). Slída v těchto materiálech vytváří dielektrickou bariéru, tudíž je charakteristická výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Převážná většina slídy se zpracovává na slídový papír. Ten vzniká rozmělněním slídy na malé jemné částičky a následně se zpracovává na papírenských strojích. Remika se používá právě v kompozitech, protože vzhledem ke svému charakteru není použitelná jako samostatný izolační prvek. Remika se zpracovává do různých forem: fólie, pásy nebo papíry, které se pak vkládají do pojiva. Slída se zpracovává dvěma způsoby: Bardetovým a Heymannovým. Podle toho pak rozlišujeme dva druhy slídového papíru, které se používají při izolaci metodami VPI a resin-rich. Bardetovým způsobem se připravuje tzv. kalcinovaný slídový papír. Slída je v tomto případě rozmělněna chemicky a následně zpracována na papírenském stroji na papír. Získají se částičky s rozměry v rozmezí 0,04 až 0,8 mm. Tato forma papíru má lepší mechanické vlastnosti, je hutná a méně nasákavá. Druhým typem papíru je tzv. nekalcinovaný slídový papír, který se vyrábí Heymannovým mechanickým způsobem. Někdy je známý spíše pod obchodními názvy: Remika, Samica, Cogemica, Calmica. Během tohoto výrobního procesu, jsou zachovány veškeré vlastnosti slídy, protože nejsou užity chemikálie. Rozdíl mezi papíry s ohledem na použité technologie je v elektroizolačních vlastnostech a porezitě vyrobeného papíru ze slídy. Kalcinovaný papír vykazuje lepší elektroizolační vlastnosti, nekalcinovaný zase vyšší porezitu. Tyto vlastnosti předurčují jednotlivé papíry pro specifické použití. [3, 34]

Izolační materiály na bázi slídy lze rozdělit na mikanity a remikanity. V mikanitech je použita slída ve formě slídových lístků a v remikanitech ve formě slídového papíru. Tyto materiály jsou využívány ve tříslžkových kompozitních materiálech, kdy podkladovou nosnou složkou je papírová nebo skleněná tkanina a pojivem je pryskyřice. Zejména se pak lze s těmito izolačními plnivými setkat v izolačních systémech elektrických strojů. [3]

### 2.3.2 Uhlík - saze

Uhlík je jeden z nejčastěji se vyskytujících prvků na Zemi v různých formách: diamant, grafit a saze. Někdy je využíván grafit pro zlepšení mechanických vlastností, ale pro oblast plniv je nejdůležitější právě forma beztvareho uhlíku (sazi). Jedná se o uhlíkový prášek, který nachází využití nejen v elektrotechnice. Pravděpodobně nejznámější

je jejich použití pro vyztužování elastomerů během výroby pneumatik. Přidáním sazí do pojiva se zlepšují mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti, dochází ke zvýšení odolnosti vůči abrazi nebo se používají jako černá barviva nebo stabilizátory. Speciálně se pak přidávají do reaktoplastických a termoplastických matric pro zlepšení elektrické vodivosti. Pro elektrotechniku jsou důležité některé specifické vlastnosti, jako je odolnost vůči oxidaci na povrchu, vysoký bod tavení, chemická stálost, velká elektrická a tepelná vodivost, stálost při změnách teplot atd. V posledních letech se rozšířilo použití uhlíkových nanotrubiček, které umožňují zvýšit vodivost při malé koncentraci plniva. [34, 46]

## 2.4 Nanokompozitní materiály

Nanokompozitní materiály se začaly rozšiřovat až v posledních desetiletích, jedná se o materiály v pevné fázi, složené ze dvou nebo více složek, z nichž alespoň jedna dosahuje velikostí jednotek až desítek nanometrů. Tyto rozměry odpovídají atomové a molekulární úrovni. Obor nanotechnologií je považován za revoluční, protože vzhledem k použitým novým technologiím a materiálům nabízí řešení mnoha současných technických problémů. Nanokompozity se běžně vyskytují i v přírodě v kostech nebo ve schránkách korýšů. V technice se nanokompozity využívají již od 70. let 20. století, v této době se ale označení „nanokompozity“ ještě nepoužívalo. Dnes své uplatnění nacházejí nejen v elektrotechnice, ale i v ostatních průmyslových odvětvích. [46, 47]

### 2.4.1 Nanoobjekty

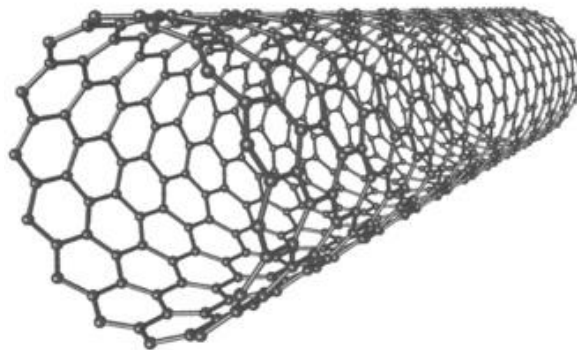
Podle normy ČSN CEN ISO/TS 27687 se nanoobjekty dělí dle počtu souřadnic, ve kterých daná struktura splňuje interval rozměrů 1 – 100 nm. Nanoobjekty podle tohoto kritéria lze dělit na:

- 0 dimenzionální nanoobjekty,
- 1 dimenzionální nanoobjekty,
- 2 dimenzionální nanoobjekty.

Do 0 dimenzionálních objektů, těch které dosahují nanorozměrů ve všech třech souřadných osách. Do této skupiny řadíme především nanočástice nanokrystalů a nanomateriálů typu: porézní nanomateriály a nanopěny, kvantové tečky, objemové nanomateriály a nanostroje složené z makromolekul, vrstvy, povlaky a objemy z nanokrystalů. Jedno dimenzionální nanoobjekty dosahují nanorozměrů ve dvou souřadných osách. Mezi tyto nanoobjekty řadíme nanovlákná typu: nanovlákná, nanopásky, nanotyče, nanotrubičky, nanodráty, pilíře a kvantové dráty. Dvojdímenzionální objekty vykazují nanorozměry pouze v jedné

souřadné ose. Jedná se o nanodesky, tenké vrstvy, deskovité nanokrystaly, kvantové jámy, nanostěny a rovinné makromolekuly. [46]

Nanoobjekty lze připravovat způsobem Top-down a Bottom-up. Metodou Top-down se nanoobjekty vytvoří zmenšením struktury existujícího materiálu, druhou metodou Bottom-up se vytvářejí nanoobjekty z malých objektů – atomů a molekul. Tato výroba nanoobjektů je starší než první způsob výroby. Výhodou metody Top-down je vyšší kapacita výroby, velmi dobrá reprodukovatelnost a široké spektrum použitelnosti. Naopak mezi nevýhody patří velký rozptyl velikosti a čistoty vyráběných částic v řádu stovek nanometrů. Metoda Bottom-up je vhodnější pro výrobu „na míru“ s menšími rozměry. První metoda je někdy označována jako fyzikální a druhá jako chemická. [46, 50]



Obr. 7: Uhlíková nanotrubička o délce menší než  $30 \mu\text{m}$  a průměru  $1 - 2 \text{ nm}$  (upraveno z: [48])

## 2.4.2 Nanokompozity

Použitím nanokompozitů se stejně jako u běžných kompozitů zlepšují mechanické, elektrické, tepelné, chemické aj. vlastnosti. Ovlivňovány jsou vlastnosti materiálu matrice přidáváním nanoplňiv. Vzhledem k vysokému poměru velikosti aktivního povrchu k objemu nanočástic lze dosáhnout požadovaných vlastností menším hmotnostním podílem nanočástic, než by tomu bylo u běžných kompozitů. Některých vlastností, kterých dosahujeme přidáním nanočástic, lze u běžných kompozitů jen velmi komplikovaně dosáhnout. Z hlediska použitého materiálu na matrice rozlišujeme nanokompozity na:

- nanokompozity s kovovou maticí (MMNC),
- nanokompozity s keramickou maticí (CMNC),
- nanokompozity s polymerní maticí (PMNC).

Nanokompozity s kovovou maticí nejčastěji ze slitin titanu, mědi, železa, hliníku a hořčíku jsou vyztužovány nanoobjekty, které zvyšují modul pružnosti a pevnost, odolnost vůči otěru a korozi. Samotná kovová matrice má vysokou pevnost, tuhost

a elektrickou vodivost, ale přidáním nanoplňiv dojde ke zlepšení těchto vlastností. Nejčastějším vyztužovacím materiálem kovových matic jsou keramické nanočástice, whiskery nebo vlákna z boridů, karbidů, nitridů, oxidů, křemičitanů a jejich směsí. Ne vždy se ale plniva vměšují do matrice, nově jsou používány technologie, kdy zpevňující částice vznikají přímo chemickými reakcemi jednotlivých složek v kovové matrici. Takový materiál má lepší vlastnosti, než ten, který vznikne klasickým mísením. V elektrotechnice se využívají taveniny titanu nebo hliníku s grafitovým práškem. [46]

Nanokompozity s keramickou matricí se upravují nanoplňivy zejména pro zlepšení křehkosti, elektrické nevodivosti, nepoddajnosti aj. Příměsí obvykle bývají jiné keramické nebo kovové materiály. Lze se setkat s nanokompozity typu:  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ ,  $\text{TiN}/\text{MoS}_2$ ,  $\text{Fe}/\text{Cu}/\text{Nb}/\text{Si}/\text{B}$ ,  $\text{Fe}/\text{Co}$  atd. [47]

Nanokompozity s polymerní matricí patří do nejstarších a nejdůležitějších materiálů. Výhodami, které umožnily široké rozšíření, jsou nízká hustota, elektroizolační vlastnosti, náročnost výroby, barvitelnost, nízká tepelná vodivost aj. Použití polymerní matrice s sebou ale přináší i řadu nevýhod: nízká mechanická pevnost, vysoká tepelná roztažnost, stárnutí hořlavost aj. Použitím plniva s rozměry nanometrů lze upravit výsledné vlastnosti nanokompozitu více než běžnými plnivy. Kvůli malým rozměrům plniv je snazší rovnoměrně rozptýlit v matrici, čímž se získají požadované vlastnosti při menším podílu plniva (1 – 10 %). Původně se do polymerních matic přidávaly přírodní jílové polysilikátové materiály, postupně se začaly aplikovat i uhlíkové materiály (např. nanotuby, nanodiamant, uhlíková vlákna,  $\text{SiC}$ ), různé oxidy (např.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ), prostorově složitě křemičitanové polymerní makromolekuly, polovodičové materiály (např.  $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{CdSe}$ ) a kovy (např.  $\text{Au}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Pd}$ ,  $\text{Cu}$ ). [46]



### 3 Kompozity v silnoproudé elektrotechnice

V silnoproudé elektrotechnice se lze setkat s dvousložkovými a s třísložkovými kompozitními materiály používanými v elektroizolačních systémech (EIS) elektrických strojů, na výrobu izolátorů, krytů elektrických zařízení či konstrukčních prvků. Jsou v této oblasti hojně využívány zejména kvůli kombinaci svých výborných elektrických, mechanických a tepelných vlastností, o kterých jsem se zmínil v předchozích kapitolách. Tyto kompozitní materiály jsou složeny z nosných složek (např. papír, bavlněné a skleněné tkaniny), pojiv (např. pryskyřice) a plniv (např. slída). [3]

#### 3.1 Dvousložkové kompozitní materiály

- tvrzené papíry (Kartit)
- textilní tkaniny (Textit)
- skelné tkaniny (Sklo-textit)

##### 3.1.1 Kartit

Tvrzený papír slouží především na výrobu mechanických a elektroizolačních prvků pro použití v olejové lázni, ale i v suchém prostředí. Tvrzený papír je známý pod obchodním názvem Kartit. Tento materiál se prodává ve formě desek, trubek, tyčí a přířezů. Jedná se o celulózový papír v roli výztuže v kombinaci s pojivem, který je vyroben z fenolformaldehydové živice. K impregnaci jsou ale někdy použity i epoxidové pryskyřice, avšak impregnace fenolovou pryskyřicí je častější kvůli ceně a ucházejícím elektrickým vlastnostem. Celulózový papír, který se používá na výrobu Kartitu, obsahuje okolo 40 – 50 % pryskyřice. Kartit se vytvrzuje rezoly, což je produkt polykondenzace fenolu s molárním přebytkem aldehydu v alkalickém prostředí. Rezoly nemají dobré elektrické vlastnosti v nevytvrzeném stavu, protože obsahují malé množství vody, která se uvolnila při polykondenzaci. Dobré elektrické vlastnosti získají až ve vytvrzeném stavu. Lze se setkat s Kartity v několika provedeních – K, E, KE, EV, T, S a SD. Jednotlivé vlastnosti a použití různých druhů jsou popsány v *tab. 9*. Pro opracování je používána celá řada technologií, nejčastěji se jedná o řezání, soustružení, frézování nebo vrtání. Pokud by byl použit vodní paprsek k dělení a k tvarovému řezání, hrozí vzhledem k vysokému tlaku oddělení jednotlivých vrstev. Desky a trubky mohou být slepovány dvousložkovým epoxidovým lepidlem, je však důležité zamezit nadměrnému namáhání tohoto spoje. Kartit se používá při stavbě transformátorů ve formě izolačních

mezistěn, konstrukčních prvků, krytů a vložek. Dále se s ním lze setkat u elektrických rozvaděčů ve formě izolačních táhel a dílců. [3, 20, 21]

Tab. 9: Typy a vlastnosti tvrzeného papíru (kartitu)

Typ	Vlastnosti	Použití
K	vysoká mechanická pevnost, vysoká nasákavost, dobrá razitelnost	konstrukční prvky elektrotechnických zařízení
E	vysoká elektrická pevnost, malá nasákavost	olejové transformátory, aplikace VN
KE	dobré elektrické vlastnosti	široké spektrum použití v elektrotechnice
EV	vysoká elektrická pevnost, malá nasákavost	aplikace VN
T	snížená nasákavost	Tropické podmínky
S	malá mechanická pevnost, dobré elektroizolační vlastnosti	Sdělovací technika
SD	malá mechanická pevnost, dobré elektroizolační vlastnosti	Sdělovací technika

### 3.1.2 Textit

Textit je dvousložkový kompozit vyztužený textilní tkaninou, který vyniká dobrými mechanickými a kluznými vlastnostmi. Elektrické vlastnosti jsou velmi dobré, ale v porovnání s kartity jsou na tom hůře. Mezi další vlastnosti, které můžeme zmínit ve spojení s tímto kompozitem, patří dobrá opracovatelnost, houževnatost, odolnost vůči vodě, olejům, benzinům a některým slabým kyselinám. Velmi dobře tlumí nárazy. Tyto kompozity se řadí do teplotní třídy 120 (E). Kompozit je složen z bavlněné výztuže a pryskyřičného pojiva. Nejčastěji se jako pojivo aplikuje fenolformaldehydová a epoxidová pryskyřice (obsah 45 – 55 %). Textit se využívá na výrobu konstrukčních prvků, jako jsou například izolační desky, kostry elektrických zařízení nebo skříňové části rozvoden. [3, 11]

Textity jsou rozděleny do kategorií H, J, SJUR, SK, E, HV a JV. Tyto druhy se liší v tloušťce tkaniny a v použité pryskyřici. Textit H se využívá vzhledem k jeho dobrým kluzným vlastnostem na ložiskové obložení válcových strojů a na ozubená kola. Na výrobu textitu J se na rozdíl od textitu H nepoužívá hrubá bavlněná tkanina, ale jemná, čímž se zlepšují mechanické vlastnosti. Textit SUJR je určen na výrobu ozubených kol pro jemné měřicí a registrační přístroje, protože se vyrábí z obzvláště jemné tkaniny. Textit SK je ze speciální tkaniny, která disponuje zvýšenou pevností v jednom směru, je vhodný

na výrobu táhel v elektrotechnice. Textit E má nejlepší elektrické vlastnosti, proto je nejpoužívanější v elektrotechnice. Textity HV a JV mají podobné vlastnosti a využívají se pro méně mechanicky náročné aplikace. Běžně se dodává formě desek a tyčí, které se mohou opracovávat běžnými technologickými postupy (např. řezáním, soustružením, frézováním a vrtáním). Na rozdíl od kartitů jsou dělitelné vodním paprskem. Ke slepování lze použít epoxidové dvousložkové lepidlo. Opět ale tento spoj nesmí být příliš namáhán. [3, 21, 22]

### 3.1.3 Sklotextit

Kompozit vytvrzený skelnou tkaninou nazýváme Sklotextit. Tyto materiály jsou složeny z nosného materiálu, který je v tomto případě skleněná tkanina a z pojiva (epoxidová, silikonová pryskyřice, PE, PI – obsah 30- 40 %). Podle druhu použitého pojiva se dělí sklotextity na: RA (fenolická pryskyřice), U (epoxidové pryskyřice), RU (modifikovaná epoxidová pryskyřice), SI (silikonová pryskyřice), M (melaninová pryskyřice). Tento kompozit vyniká výbornými elektrickými (vysoká dielektrická pevnost, nízký ztrátový činitel) a mechanickými vlastnostmi. Zejména lze zdůraznit velkou klimatickou odolnost, proto se používá pro elektrické zařízení, která pracují v prostředí s vysokými teplotami a s velkou vlhkostí (tropické podmínky). Dále se sklotextit využívá na stavbu konstrukčních částí elektrických přístrojů, skříňových částí rozvodů, transformátorů, rozvaděčů a elektrických strojů. Sklotextit lze opracovávat stejně jako textit tedy klasickými technologickými postupy i vodním paprskem. [3, 21, 23]

### 3.1.4 Tvrzené dřevo

Dalším materiálem používaným především na konstrukční části je tvrzené bukové dřevo neboli umělé dřevo. Tento kompozit spojuje přednosti přírodního materiálu a syntetických pryskyřic. Vyrábí se skládáním dýhových vrstev orientovaných v různých směrech let napuštěním pryskyřicí a následným vytvrzením. Mezi významné vlastnosti patří nízká hmotnost, vysoká nasákavost oleje, dobré elektroizolační vlastnosti, teplotní odolnost a odolnost proti opotřebení. Podle intenzity slisování (měrné hmotnosti při stlačení vrstev) jsou známy typy: L – lehké (mh. cca 0,8 – 1,0 g/cm<sup>3</sup>), M – střední (mh. cca 1,1 – 1,25 g/cm<sup>3</sup>) a H - těžké (mh. cca 1,3 – 1,4 g/cm<sup>3</sup>). Tvrzené dřevo se používá na výrobu mechanicky namáhaných částí el. strojů, zejména pak transformátorů, kvůli jeho vysoké schopnosti nasákavosti oleje. [3, 24]

### 3.2 Tříslučkové kompozitní materiály

Tříslučkový kompozit je složen z nosné složky, pojiva a plniva. Plnivo v tomto případě má funkci dielektrické bariéry. V oblasti silnoproudé elektrotechniky se tyto kompozity využívají nejvíce jako elektroizolace točivých strojů. Tento izolační systém točivých strojů se vyrábí technikou VPI (Vacuum Pressure Impregnation) nebo Resin-Rich. Oba dva systémy využívají právě tříslučkový kompozitní systém.

#### 3.2.1 VPI - Vakuově tlaková impregnace

VPI je vakuově tlaková impregnace a používá se hlavně k izolaci točivých strojů, kde je vyžadováno, aby vinutí bylo dokonale zaizolováno. Základním materiálem je savý izolační materiál - slídová páska, která se naimpregnuje. Nejčastěji se lze setkat se skleněnou tkaninou, PE rounem nebo fólií, PI fólií. Množství pojiva se pohybuje okolo 7 %. Je důležité, aby i při větších počtech vrstev (10 a více) docházelo k proimpregnování. Impregnantem jsou bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice. Pro použití běžné kombinace epoxidové pryskyřice s kapalným anhydridem se používá urychlovač, pomocí něhož se zkracuje doba a teplota vytvrzování. Při použití této technologie je potřeba drahého a technicky náročného zařízení, které se skládá z kotle s ohřívacím a chladicím zařízením a ze zásobníků na impregnant. Samotný proces začíná předehřátím na teplotu okolo 250 °C a vysušením. Následně je předmět umístěn do vakuového kotle, kde je snížen tlak a následně dojde ode dna k zaplavení pryskyřicí. Doba, na jak dlouho je předmět ponořen, se pohybuje okolo 20 – 60 min a záleží především na rozměrech předmětu. Poté se odstraní vakuum a zavede se přetlak zhruba na dobu 30 – 60 min. Závěrečnou fázi procesu lze rozdělit na dvě části: sušení a vytvrzování. Sušení probíhá za mírného podtlaku, během něhož dojde k vypřechání těkavých složek. Naopak k vytvrzení dochází za normálního tlaku pomocí proudění teplého vzduchu. Avšak u této metody neexistuje možnost opravy kompaktního celku (na rozdíl od Resin-rich), jediná možnost oprav je, jen pokud jsou impregnované celky rozděleny na jednotlivé části. Ty pak lze vyměnit nebo opravit. Výhodou VPI je snížení rozměrů vinutí a ušetření použitého materiálu až o 6 %. [3, 25, 26]

### 3.2.2 Resin-rich

Resin-rich je technologie bohatá na pryskyřici. Obsah pojiva se pohybuje okolo 30 – 40 %. Tento systém využívá tříslložkový kompozitní systém. Matrice je ze skleněných stáčených vláken nebo i rovnaných do roviny. V případě vláken rovnaných do roviny dochází k velké úspoře materiálu a místa, zároveň se o 7 % sníží dielektrické ztráty a zvýší se elektrická pevnost. Plnivem v tomto případě je kalcinovaný slídový papír. Pojivem je reaktoplastická bezrospouštědlová novolaká nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Takto vytvořený tříslložkový kompozit se dodává v předtvrzeném stavu (tzv. B stav), případně se může proložit separační fólií, aby nedocházelo ke slepení jednotlivých částí. Tloušťka tohoto vyrobeného materiálu se pohybuje v rozmezí 0,15 – 0,20 mm. Celý proces začíná navinutím, které je buď kontinuální, nebo diskontinuální. U kontinuálního navíjení se páska navíjí s třetinovým, polovičním nebo dvoutřetinovým překrýváním po celé délce tyče i v čelech. U diskontinuálního navíjení se čela ovíjejí páskou zvlášť a rovná část vinutí je tvořena folií. Po ovíjení následuje vytvrzování. To probíhá v lisech při zvýšené teplotě a tlaku, je však důležité, aby před samotným vytvrzováním byla odstraněna veškerá vlhkost a aby nedocházelo ke slepování izolace. Nejdříve se forma předeřeje a stlačí, následně dochází ke gelaci pryskyřice při teplotě 100 °C. Při tomto ději se spojí všechny složky izolace. Aby se zabránilo slepení izolace a formy, používá se separační folie. Forma umožňuje stlačení na požadované rozměry. Potom, co se forma dotáhne, zvýší se teplota na 160 – 170 °C a dojde ke konečnému vytvrzení zhruba po 60 minutách. Doba závisí na použité pryskyřici a tloušťce izolační trubky. Během vytvrzování se provádí odplynování otevřením formy, případně předformováním nižším tlakem. Další fází je ochlazení, které musí být pozvolné, aby nedocházelo ke vzniku nehomogenit. Vrchní vrstva izolace se na závěr ovine polovodivými páskami s polovičním překryvem a výstupy z drážek se také opatří odstupňovanými polovodivými vrstvami. Ty mohou být součástí izolace už při vytvrzování nebo nanесeny až dodatečně. Tímto postupem lze eliminovat vznik výbojové činnosti. Výhodou technologie resin-rich je možnost výměny či oprav dle potřeby. Nevýhodou u resin-rich může být výskyt nehomogenit a potřeba přesných forem. [3, 27]

### 3.3 Venkovní vedení

Klasická vedení jsou dnes nahrazována kompozitními zejména pro zvýšení přenosové kapacity. Nová venkovní vedení disponují vyšší pevností, a proto nedochází k takovému prověšení pod zatížením jako u běžného vedení. Velkou výhodou je možnost instalace na stávající stožáry pomocí komponentů, které jsou dnes běžně vyráběny a dodávány.

#### 3.3.1 ACCR lana

Zkratka ACCR vychází z anglických slov Aluminum Conductor Composite Reinforced. Společnost 3M vyvíjela tento produkt několik let a vlastní na něj přibližně 27 patentů. ACCR lana v současné době nahrazují klasická AlFe lana, protože dovolují zvýšení přenosové kapacity a teplotního zatížení na stávajícím vedení. Zároveň použitím těchto lan se zvyšuje prevence před výpadkem sítě (tzv. Black Out). Výměnou ACCR lan za standardní AlFe se sníží mechanické zatížení vedení. Jádrem je vyrobeno z mikrovláken svinutých do pramenů z oxidu hliníku. V jednom prameni může být svinuto až 20 000 mikrovláken. Vnější plášť je vyroben z kompozitního materiálu formovaného do sektorového nebo kruhového průřezu z hliníku a zirkonu. Přítomnost zirkonu zvyšuje odolnost a stabilitu při vysokých teplotách během provozu. Výhodou těchto lan vzhledem k použitému hliníku na jádro i plášť je, že nekorodují. Odpadá tak nutnost mazání jádra lana. Použitím kompozitního materiálu se značně snižuje hmotnost a délková teplotní roztažnost. Při srovnání klasických lan a ACCR lan je hmotnost až poloviční. Při tom pevnost jádra je srovnatelná. Používají se pro napěťové soustavy od 22 kV do 400 kV. Tato lana lze instalovat na stávající stožáry, které není nutné nějak upravovat. V současné době jsou dodávány i komponenty, které zaručují bezproblémovou instalaci na již existující stožáry a napojení na stávající vedení. [40, 41]

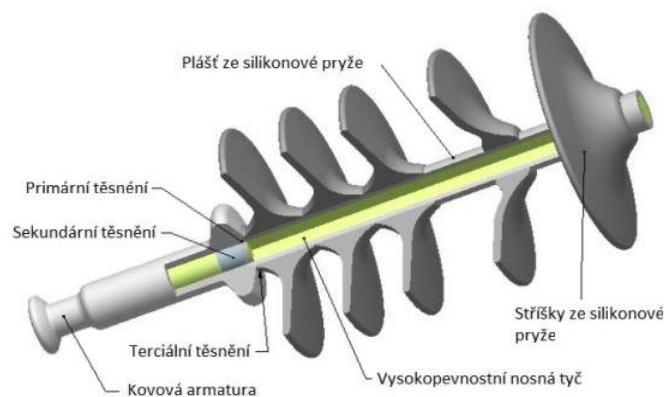
#### 3.3.2 ACCC lana

Zkratka ACCC vychází z anglických slov Aluminum Conductor Composite Core. ACCC lana jsou také složena z kompozitních materiálů a vykazují dokonce lepší vlastnosti než ACCR lana. Jádro je vyrobeno z pryskyřičné matrice, která je vyztužena až sto tisíci uhlíkovými a skleněnými vlákny. Jádro je obmotáno borovými vlákny pro zlepšení odolnosti vůči korozi. Tato lana vykazují výborný poměr pevnosti k hmotnosti a nízký koeficient tepelné roztažnosti, což snižuje prověšení lana pod vysokým tepelným zatížením. Tato lana jsou prezentována tak, že při maximálním zatížení dokážou pracovat na mnohem nižších teplotách oproti běžným lanům. Tím dochází k úspoře nákladů

na provoz. Samotné jádro je pak omotáno hliníkovými vlákny, která přenáší elektrický proud. Nejčastěji jsou tato vlákna lichoběžníkového průřezu, tím se docílí zlepšení vodivosti a snížení elektrického odporu pro daný průměr vodiče. Pracovní teplota vodiče může dosahovat až 180 °C, krátkodobě pak až 200 °C. Podobně jako ACCR se tato lana instalují již na existující stožáry a lze je napojovat i na stávající vedení. [42]

### 3.4 Kompozitní izolátory

První kompozitní izolátory se objevily již před více než 30 lety, ale až v posledním desetiletí došlo k jejich masivnějšímu rozšíření po celém světě. Tyto izolátory nabízejí oproti klasickým keramickým izolátorům nižší hmotnost o cca 10 %, což umožňuje snazší montáž a dopravu na místo určení, zvýšení odolnosti proti mechanickým rázům, snížení ceny a zlepšení izolačních vlastností. Kompozitní izolátor lze rozložit na několik částí: nosný prvek, silikonový plášť, těsnění, silikonové stříšky a kovovou armaturu. Nosným prvkem je tyč, která je vyrobena ze skleněných vláken spojených reaktoplastickou pryskyřicí. Tato tyč se vyrábí pultruzí, což je metoda tažení za tepla. Pomocí extrudéru je pak na nosnou tyč vytlačováním nanesen silikonový plášť. Aby nevznikla spára mezi tyčí a pláštěm, používá se pro spojení těchto dvou částí chemické navázání. Na konci tyče jsou natlačené kovové armatury. A na tělo tyče jsou navulkanizovány stříšky ze silikonové pryže. Utěsněním armatur se zvýší životnost izolátoru, protože spojem neproniká vlhkost, která by způsobovala degradaci materiálu. Tyto izolátory lze používat až do 1100 kV střídavého napětí a do 800 kV stejnosměrného napětí. Vyrábějí se v délkách až do 11 metrů. Nejčastěji se můžeme setkat s tahovými a podpěrnými kompozitními izolátory. Používají se například u venkovních přístrojových transformátorů, spínacích zařízení, svodičů přepětí nebo jako transformátorové průchodky, kabelové koncovky atd. [29, 30]



Obr. 8: Hlavní části závěsného izolátoru vyráběného společností DRIBO, spol. s. r. o. [29]

## 4 Diagnostický systém

V současnosti se nároky na vyvíjející se kompozitní materiály neustále zvyšují, jsou vystavovány nepříznivým vlivům okolního prostředí, extrémnímu mechanickému i elektrickému namáhání. Je proto potřeba vždy včas diagnostikovat jejich aktuální stav a zabránit tak poškození celého systému. Slovo diagnostika pochází z řeckého „diagnosis“ a v překladu znamená „poznávání“. V současné době existuje řada diagnostických metod a zařízení pro stanovení zjišťovaných parametrů materiálů. Nejprve je ale nutné si určit, co je diagnostický systém, diagnostický prostředek a objekt. Diagnostický systém je soubor diagnostických prostředků a metod, který slouží ke zkoumání diagnostikovaných objektů. Aby se zajistila správná funkce diagnostického systému, je důležité určit: instrumentální vybavení, model diagnostikovaného objektu, přístup k řešení diagnostického problému, postup, znalostní a zkušenostní potenciál, aspekt destruktivnosti nebo nedestruktivnosti. Pod pojmem diagnostický prostředek se rozumí soubor technických zařízení, pracovních postupů a jejich vyhodnocení. Diagnostický objekt je systém funkčních prvků a podsystémů. Tato kapitola je zaměřena na tzv. technickou a elektrotechnologickou diagnostiku, pomocí nichž se zjišťuje technický stav objektu. Pro posouzení stavu slouží nositel informace, který je určen diagnostickou veličinou. [14, 49]

Vlastnosti kompozitních materiálů jsou dány vlastnostmi jejich jednotlivých materiálových složek, objemovým podílem těchto složek a geometrií vyztužení vzhledem k systému. Geometrie vyztužení je popsána tvarem, velikostí a distribucí velikosti. Pro oblast elektrotechniky je důležité, aby byly spojeny hlavně elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti, což umožňuje použití jednak v silnoproudé, ale i v slaboproudé elektrotechnice. Cílem této kapitoly je popsat důležité zkoumané vlastnosti kompozitních materiálů a metody, kterými se zjišťují. [7]

Diagnostika silnoproudých zařízení je rozlišována na fenomenologické a strukturální metody. Při fenomenologickém přístupu se zjišťuje chování zkoušeného objektu na přiložené vstupní diagnostické signály. Strukturální přístup je zaměřen na popis dějů, které probíhají v diagnostikovaném objektu. Dále je vždy nutné rozhodnout o destruktivnosti a nedestruktivnosti prováděných zkoušek. [14]



## 4.1 Fyzikální vlastnosti

Od kompozitních materiálů je vyžadováno, aby obsahovaly nehomogenity ve větším měřítku než je atomární, ale stále musí být v makroměřítku považovány za homogenní materiál. Z pohledu homogenity se lze setkat se dvěma problémy. U nanokompozitů se rozměry nehomogenit pohybují okolo atomárních rozměrů, proto pak u těchto kompozitů nejsou plně použitelné rovnice klasické fyziky, ale musí se počítat i s efekty spojenými s atomovou fyzikou. Druhý problém nastává tehdy, je-li počet nehomogenit velmi malý a nelze materiál považovat za homogenní v makroměřítku. Tyto materiály jsou známy pod označením „kompozitní struktury“. Kompozity jsou vnitřně nehomogenní, ale z makroskopického hlediska je můžeme označit za homogenní. [5]

Kompozity jsou charakteristické svými anizotropními vlastnostmi. Naproti tomu klasické technické materiály jsou téměř vždy izotropní, výjimečně vykazují malou anizotropii. Z pohledu symetrie vlastností dělíme materiály na:

- izotropní – vlastnosti stejné ve všech směrech,
- anizotropní – vlastnosti v každém směru jiné,
- pseudoizotropní – vlastnosti stejné ve směru tří kolmých základních os a symetrické podle tří rovin těchto os,
- ortotropní – vlastnosti symetrické podle tří vzájemně kolmých rovin,
- příčně izotropní – izotropní vlastnosti v určité rovině. [5]

Hustota vyjadřuje hmotnost vztahenou k objemu zkoumaného tělesa. U kompozitních materiálů se vždy uplatňuje směšovací pravidlo, pomocí kterého lze určit procenta disperze v kompozitu. Hmotnost kompozitu se určí jako:

$$m_k = m_m + m_d \quad (4.1)$$

kde  $m_k$  je hmotnost kompozitu [kg],

$m_m$  je hmotnost matrice [kg],

$m_d$  je hmotnost disperze [kg].

Potom lze snadno získat hustotu kompozitního materiálu ze vztahu:

$$\rho_k = \rho_m \cdot V_m + \rho_d \cdot V_d \quad (4.2)$$

kde  $V_m, V_d$  je objem matrice a disperze [ $m^3$ ],

$\rho_m, \rho_d$  je hustota matrice a disperze [ $kg/m^3$ ]. Výsledná hustota může být ovlivněna i přítomností pórů, pak je nutné přičíst i hustotu těchto pórovitých útvarů.

## 4.2 Tepelné vlastnosti

Teplota je důležitý faktor pro provoz elektrických zařízení, zejména pak pro izolační systémy. Je vždy nutné, aby se zařízení zařadila do správné teplotní třídy, jinak by mohlo docházet k nadměrnému ohřevu a tím i k degradaci elektrických izolací. Dnes se zařazují tyto materiály do teplotních tříd podle normy ČSN EN 60085 (Elektrická izolace – Teplotní klasifikace). Touto normou jsou zavedeny dva pojmy: elektroizolační materiál (EIM) a elektroizolační systém (EIS). Elektroizolační materiál se vyznačuje nízkou elektrickou vodivostí a slouží k oddělení vodivých částí s různým elektrickým potenciálem. Elektroizolační systém je struktura složená z jednoho nebo více elektroizolačních materiálů. Teplotní třídou je pak vyjádřena maximální teplota, pro kterou je elektroizolační materiál a systém vyhovující. Teplota se uvádí ve stupních Celsia. U kompozitů je teplotní třída průnikem teplot jednotlivých složek. Dále se lze setkat s relativním indexem teplotní odolnosti (RTE), kterým je určena teplota ve stupních Celsia, kdy materiál během určité doby životnosti vykazuje přijatelné vlastnosti v porovnání se známým standardním materiálem. Nejen teplotní třídy charakterizují materiál z hlediska teplotní odolnosti, dalšími významnými parametry jsou: koeficient tepelné roztažnosti a měrná tepelná vodivost.

### 4.2.1 Měrná tepelná vodivost

Při provozu elektrického zařízení vzniká tepelná energie, tu je potřeba odvést pryč, jinak by mohlo dojít k nenávratnému poškození zařízení. U kompozitních materiálů přebírá matrice úlohu odvodu tepla z materiálu pryč a vhodnou volbou plniv lze zvýšit měrnou tepelnou vodivost až trojnásobně. Pro tento účel se využívají kovová plniva, jejichž schopnost odvádět teplo je několikanásobně vyšší, než je u samotných matic. Měrná tepelná vodivost epoxidové pryskyřice se pohybuje v rozmezí  $0,1 - 0,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . [43]

### 4.2.2 Tepelná roztažnost

Při tomto ději dochází ke změně rozměrů vlivem působení teplot. Tento tepelný jev je rozlišován na objemový a délkový, ale nejčastěji se jedná o délkovou roztažnost. Při délkové roztažnosti se zahřáté těleso roztáhne v daném směru o určitou délku. Je důležité znát koeficient tepelné roztažnosti, protože pokud by se výrazně lišil koeficient výtzuže a matrice, docházelo by k nežádoucímu mechanickému pnutí, které narušuje celek kompozitu. Vhodnou volbou plniva lze upravit tepelnou roztažnost matrice. Například

křemennou moučkou lze snížit teplotní roztažnost, ale zároveň dojde ke snížení tepelné vodivosti. Proto je vždy nutné zvážit vhodnou volbu pro danou aplikaci. [43]

### 4.2.3 Teplotní třídy

Tepelná odolnost je jeden z faktorů pro klasifikaci elektroizolačních materiálů. Ze zkušeností z praxe byly vytvořeny tepelné třídy, do kterých se řadí jednotlivé materiály podle maximální použitelné teploty izolantu. V praxi se používají urychlené zkoušky, při kterých se sledují určité vlastnosti, které slouží ke stanovení hodnoty zestárnutí materiálu. Tím se obdrží podklady pro získání životnostních přímek materiálů, pomocí nichž lze určit teplotní odolnost materiálu a tím určit i teplotní třídy. Lze také porovnávat zjišťovaný materiál s porovnávacím vzorkem. Těmito metodami se napodobují provozní podmínky. Rozdělení do jednotlivých tříd je vidět v následující tabulce.

Tab. 10: Teplotní klasifikace izolantů (převzato z: [3])

Relativní index teplotní odolnosti RTE	Teplotní třída	Předchozí označení
< 90	70	
> 90 – 105	90	Y
> 105 – 120	105	A
> 120 – 130	120	E
> 130 – 155	130	B
> 155 – 180	155	F
> 180 – 200	180	H
> 200 – 220	200	
> 220 – 250	220	
> 250	250	

### Rozdělení materiálů do teplotních tříd

Do nejnižší teplotní třídy 70 řadíme organické materiály (papír, dřevo, bavlna, hedvábí), které se ale v elektrických zařízeních používají jen velmi zřídka. Pokud jsou tyto organické materiály naimpregnovány např. šelakem, asfaltem nebo oleji patří do teplotní třídy 90 (Y). V teplotní třídě 105 (A) jsou jednak organické materiály, které jsou naimpregnovány nebo lakovány, tak i syntetické látky na bázi celulózy. Bavlněná tkanina s fenolickou pryskyřicí se používá jako konstrukční materiál ve výrobě elektrických strojů, dalšími příklady z praxe jsou PET folie s kaučukem, lepenky, PE tkaniny s lakem nebo pásy, které se používají pro izolaci elektrických zařízení. Materiály teplotní třídy

120 (E) jsou organické látky (celulóзовý papír, tvrzená tkanina a papír, buničina) impregnované fenolformaldehydovou nebo fenolickou pryskyřicí. Tyto materiály jsou vhodné pro konstrukční aplikace. Materiály teplotní třídy 130 (B) jsou obvykle používány k izolačním a konstrukčním účelům. Většinou se jedná o anorganické materiály (skleněná vlákna, asbest, sulfátový papír) v kombinaci s epoxidy a fenolickými pryskyřicemi. Ve skupině materiálů teplotní třídy 155 (F) jsou kompozitní materiály na bázi skleněné tkaniny s epoxidovými, modifikovanými polyesterovými pojivy. Tento systém materiálů se používá k výrobě konstrukčních prvků elektrických zařízení. Případně epoxidová pryskyřice na bázi bifenolu je využita u vakuového impregnování točivých strojů – VPI. Do teplotní třídy 180 (H) jsou řazeny pojiva silikonové pryskyřice a modifikované epoxidové pryskyřice. Dále sem patří materiály ze slídy (slídový papír – Remika, Samica, Calmica, Cogemica...) a aramidy (Nomex<sup>®</sup>). Kompozity jsou využívány v tomto případě nejčastěji pro mezizávitové izolace, izolace konců vinutí cívek vysokonapěťových motorů a izolace vinutí motorů. Materiály teplotních tříd 200 a 220 jsou skla, aramidové papíry a asbest, ty jsou lakovány a použity na izolace závitů cívek, navíc u třídy 220 na přepážky a sekce transformátorů a vývodů motorů. Do nejvyšší teplotní třídy 250 se zařazují polyimidy (Kapton<sup>®</sup>), aramidy (Nomex<sup>®</sup>), ale také se zde používají materiály třídy 220, u kterých jsou nová pojiva (např. silikonová). Tato kapitola byla zpracována na základě použité literatury [3].

### 4.3 Mechanické vlastnosti a zkoušky

Mechanické a termomechanické vlastnosti jsou důležité převážně pro konstrukční prvky v elektrotechnice, ale nejen pro ně. Mezi sledované vlastnosti patří například: pevnost v tahu, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku, houževnatost, maximální teplota, hustota a modul pružnosti v ohybu. Kompozity mají menší hustotu než kovy a jejich slitiny, velkou měrnou pevnost  $\sigma$  vztaženou k hustotě a velký modul pružnosti E, který je také vztažený k hustotě. Pevnostní chování je závislé na tvaru, koncentraci (objemová část vyztužující fáze) a orientaci (izotropie systému).

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů jsou určeny především druhem vyztuže. Použití kompozitního materiálu z konstrukčního hlediska je doporučeno pouze tehdy, je-li splněna podmínka větší pevnosti celku kompozitu než samotné pevnosti matrice. Pokud jsou kompozity vyztuženy vlákny, závisí jejich pevnost na délce těchto vláken. Jestliže by nastala situace, že vlákna jsou kratší než je kritická délka  $l_c$ , úroveň

napětí, které působí na kompozit, je menší než lomové napětí vlákna, a proto se vlákna nikdy nezlomí. Kritická délka  $l_c$  vychází z rovnováhy působící tahové síly ve střední části vlákna, vyvozené smykovým napětím a síly potřebné na jeho porušení. Pevnost kompozitů s krátkými vlákny dosahuje pouze 60 – 70 % pevnosti srovnatelných kompozitů s dlouhými vlákny. Pokud se ale použijí krátká vlákna jako výztuž, vždy dochází k zlepšení únavové pevnosti. Nejlepšího zlepšení mechanických vlastností se dosáhne dlouhými spojitými vlákny. Dlouhovláknové jednosměrně uspořádané kompozity mají vysokou pevnost ve směru vláken, ale velmi malou pevnost v kolmém směru na vlákna, což je způsobeno vlastnostmi matrice. Aby se získaly rovnoměrnější vlastnosti, je nutné vyztužit kompozit i v druhém směru, tak vzniknou tzv. dvouosově uspořádané dlouhovláknové kompozity. Výhodou vláknových kompozitů je jejich poměr vysoké pevnosti k hmotnosti a možnost výroby materiálu s požadovanými mechanickými vlastnostmi v určených směrech. Částicová výztuž se podílí na přenosu namáhání mnohem méně než vláknová. Úkolem částic v kompozitech je zlepšit mechanické vlastnosti materiálu. Mezi zlepšované vlastnosti patří například: elektrická a tepelná vodivost, snížení koeficientu tření nebo zvýšení odolnosti. Tahové a ohybové pevnostní vlastnosti jsou testovány na zkušebních strojích. Lze také provádět zkoušky chvěním, kterými se ověřuje mechanická pevnost konstrukce, odolnost materiálu vůči únavě a funkce výrobku během působení chvění. [7, 9, 14]

#### 4.3.1 Pevnost v tahu

Mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  je vyjádřena jako maximální napětí v tahu, které působí na těleso během zkoušky. Norma ČSN EN ISO 527-1 až 5 stanovuje standard pro vyšetřování tahových vlastností. Tato norma upravuje i tvar a rozměry zkoušenců. Měření vzorků se provádí mikrometrem nebo obdobným zařízením s přesností lepší než 0,02 mm. Před samotným měřením je nutné vzorky kondicionovat podle příslušné normy, případně je možné vzorky uložit na dobu větší než 24 hod při standardních podmínkách ( $3 \pm 2$  °C,  $50 \pm 5$  °C relativní vlhkosti). Vždy je nutné použít minimálně pět vzorků. Tahové zkoušky se provádějí na univerzálních zkušebních strojích, které jsou využívány nejen pro tahové zkoušky, ale i pro tlakové a ohybové. Po upnutí vzorku do čelistí zkušebního zařízení se nastaví rychlost zkoušení tak, aby odpovídala normě. Pomocí této metody lze určit tahové napětí, poměrné prodloužení, jmenovité poměrné prodloužení, modul pružnosti v tahu a Poissonův poměr. Poissonův poměr je poměrné zúžení  $\varepsilon_n$  k poměrnému prodloužení  $\varepsilon$  ve směru protahování.

Napětí v tahu lze dopočítat podle vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.3)$$

kde  $\sigma$  je hodnota napětí v tahu [MPa],

$F$  je hodnota působící síly [N],

$A$  je hodnota průřezu zkušební tělesa před začátkem zkoušky [mm<sup>2</sup>].

Dále určujeme poměrné prodloužení  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.4)$$

kde  $\Delta l$  je prodloužení materiálu [mm],

$l_0$  je původní délka materiálu [mm].

Zároveň je určován modul pružnosti v tahu  $E_t$ . Modul pružnosti, někdy nazýván Youngův modul pružnosti, je materiálová konstanta, která vypovídá o pevnosti a možnosti deformace daného materiálu. Čím vyšší je hodnota modulu, tím vyšší napětí je potřeba k dosažení stejné deformace. Je závislý na druhu materiálu a teplotě a nejčastěji je vyjadřován v GPa. Pro výpočet se používá vzorec:

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} [GPa] \quad (4.5)$$

kde  $E$  je youngův modul pružnosti [GPa],

$\sigma$  je mechanické napětí v tahu [MPa],

$\epsilon$  je poměrné prodloužení napětím [-]. [3, 17, 19]



Obr. 9: Univerzální zkušební stroje TESTOMETRIC (převzato z: [56])

### 4.3.2 Pevnost v ohybu

Norma ČSN EN ISO 178 se zabývá ohybovými zkouškami. Během této zkoušky je zkušební těleso umístěno do čelistí, trn působí na těleso mezi těmito body, dokud nedojde k deformaci vzorku na předem definovanou hodnotu. Pokud by došlo ke zlomení vzorku jinde než v prostřední třetině, je nutné zopakovat měření s minimálně pěti novými vzorky. Měření probíhá na stejných zařízeních a za stejných podmínek jako zkouška pevnosti v tahu. Síla, která působí na těleso, je zaznamenávána během celé zkoušky. Pomocí této zkoušky jsou stanoveny: pevnost v ohybu, průhyb, deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu. Modul pružnosti se určí obdobně jako modul pružnosti v tahu. Napětí v ohybu se vypočte následovně:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (4.6)$$

kde  $\sigma_f$  je napětí v ohybu [MPa]

F je působící síla [N]

L je rozpětí [mm]

b je šířka zkušebního tělesa [mm]

h je tloušťka zkušebního tělesa [mm].

Deformace ohybu je pak vyjádřena vztahem:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (4.7)$$

kde  $\varepsilon_f$  je příslušná deformace ohybem [-],

s je průhyb [mm],

h je tloušťka vzorku [mm],

L rozpětí podpěr na měřícím zařízení [mm].

Průhyb s je vzdálenost, o kterou se vychýlí horní nebo spodní plocha zkoušenice mezi rozpěrami ze své původní polohy. Rozměry těles jsou určeny příslušnou normou, která stanovuje i poměry délky a tloušťky zkoušeného materiálu v případě, kdy nemohly být dodrženy předepsané rozměry. [3]

Tab. 11: Materiálové charakteristiky (HS=vysokopevnostní, HM=vysokomodulová vlákna) [7]

Materiálové charakteristiky	Vlákna				Matrice	
	Sklo		Uhlík		Kevlar	Epoxid
	Typ E	Typ R	HM	HS		
Hustota $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2600	2550	1950	1750	1450	1200
Modul pružnosti E [GPa]	73	86	380	260	135	3,45
Pevnost v tahu R [MPa]	3400	4400	2200	2500	3500	70

### 4.3.3 Rázová houževnatost

Houževnatost je schopnost materiálu odolávat vzniku a šíření trhlin. Jedná se o energii, kterou je kompozit schopný lokálně absorbovat před tím, než dojde k porušení materiálu. Při rychlém zatěžování rázy je materiál náchylnější na porušení než při pomalém zatěžování, kdy je materiál schopný absorbovat více energie. Nebezpečným mezním stavem je situace, kdy napětí, která jsou menší, než je  $R_e$  daného materiálu, způsobí rozvoj křehkého lomu vysokou rychlostí.

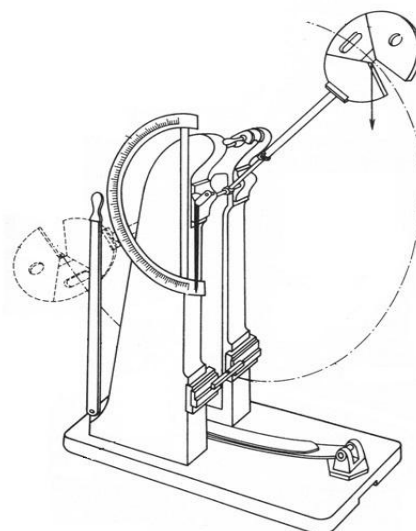
Vývojem materiálů ale stoupají požadavky, které jsou kladeny na kompozitní materiály. Je snaha o dosažení velké rázové odolnosti v kombinaci s vysokou tuhostí. Popsat houževnatost je tedy velmi složité, protože je ovlivňována mnoha faktory (např. přidáním plniva do matrice). Pro rázové zkoušky houževnatosti se využívá Charpyho kladivo. Pomocí tohoto zařízení se určuje rázová energie, která je potřeba k přeražení testovaného vzorku materiálu. Naměřená energie je rozdílem počáteční energie a energie po přeražení vzorku. Kladivo je osazováno výměnnými ocelovými břity kvůli možnosti testování různých materiálů. Podle toho zda zkoušené těleso obsahuje na jedné straně vrub, je rozlišována rázová houževnatost s vrubem a bez vrubu. Samotná zkouška probíhá při normou stanovených podmínkách. Rázová houževnatost je tedy energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa a vypočte se následovně:

$$a_c = \frac{W}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (4.8)$$

kde  $W$  je energie spotřebovaná při přeražení zkušebního objektu [J],

$h$  je tloušťka zkušebního objektu [mm],

$b$  je šířka zkušebního tělesa [mm]. [3, 9]



Obr. 10: Charpyho kladivo [57]



#### 4.3.4 Tvrdost

Tvrdost společně s pevností a houževnatostí patří mezi základní mechanické vlastnosti materiálů. Nejedná se o fyzikálně definovatelnou vlastnost, ale o průmět celé řady vlastností materiálu, zejména povrchu. Tvrdost je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa (intendoru definovaného tvaru – jehlan, krychle, sférický, tvar rohu krychle). Tvrdost je vyjádřena jako bezrozměrné číslo poměru zkušebního zatížení  $L$  a plochy vytvořeného vtisku  $A$ .

$$H = \frac{L}{A} \quad (4.9)$$

kde  $L$  je zatížení [kg],

$A$  je plocha vytvořeného vtisku [mm<sup>2</sup>]. [51]

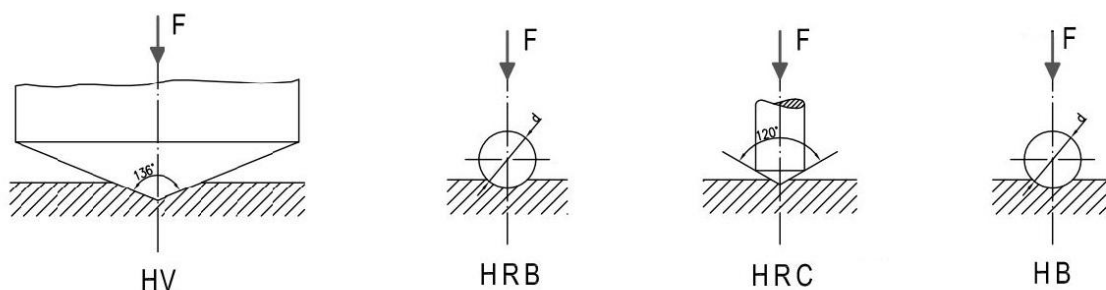
Metody podle způsobu porušení povrchu, kterými se zjišťuje tvrdost materiálu, jsou děleny na staticko-plastické, dynamicko-plastické a dynamicko-elastické. Jak už bylo naznačeno dělením, tvrdost závisí na mnoha faktorech: elasticitě a plastičnosti zkoušeného materiálu, velikosti a typu zatěžovací síly, vlastnostech materiálu (velikost zrna, teplota, množství příměsí, vnitřní pnutí aj.). Lze také nadefinovat pojmy mikrotvrdost a nanotvrdost. U mikrotvrdosti je maximální zatížení zhruba do 200 g a u nanotvrdosti jsou použita extrémně nízká zatížení, kdy vznikají vtisky menší než 1 μm, které již nelze měřit pomocí optického mikroskopu. Pro vyhodnocování nanotvrdosti jsou využívány nanoindentory, které jsou schopny provádět měření při zatížení v rozsahu desetin gramu až desítek gramů, zatímco hloubka vtisku je menší než 0,2 μm. Z naměřených hodnot tvrdosti lze také vyhodnotit elastické  $W_{elast}$  a plastické  $W_{plast}$  deformace, zatímco celková mechanická práce vnikacího procesu byla  $W_{total}$ . [51, 52]

Tab. 12: Rozsahy použití podle normy IIT (Instrumented Indentation Testing) (převzato z: [51])

Rozsah makro	Rozsah mikro	Rozsah nano
$2 \text{ N} \leq F \leq 30 \text{ kN}$	$2 \text{ N} > F; h > 0,2 \text{ } \mu\text{m}$	$h < 0.2 \text{ } \mu\text{m}$

Mezi dynamické zkoušky se řadí například zkouška Poldi kladívkem nebo Baumannovým kladívkem. Pro zjištění tvrdosti lze také využít Shoreho skleroskop a Durosokop. Při posledních dvou zmiňovaných zkouškách se testovaný materiál spouští z výšky  $h$  a měří se v případě Shoreho skleroskopu výška  $h$ , do které zkušební materiál odskočí. V případě zkoušky Durosokopem se sleduje úhel odskočení. Statické „vnikací“ zkoušky patří mezi nejčastěji používané vzhledem k jejich přesnosti, jednoduchosti a reprodukovatelnosti. Do této skupiny zkoušek patří zkoušky podle Brinella (HB -

kulička), Vickerse (HV - jehlan) a Rockwella (HRA - kužel, HRB - kulička, HRC - kužel). Podstatou Brinellovy zkoušky je vtlačování kuličkového intendoru o předem stanoveném průměru do plochy zkoušeného materiálu, tato zkouška odpovídá normě ČSN 42 0371. Po odlehčení se výpočtem určuje tvrdost jako poměr zkušebnímu zatížení k ploše vtisku vytlačené kuličkou. Rockwellova zkouška využívá diamantový kuželový intendor s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a zaoblením o poloměru 0,2 mm. Touto metodou se převážně testuje tvrdost kalených, zušlechťovaných ocelí. Další typ zkoušky je podle Vickerse, během této metody se využívá vtlačování vnikacího tělíska o tvaru čtyřbokého pravidelného jehlanu s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Výhodou Vickersovy zkoušky tvrdosti je možnost měření velmi tenkých a velmi tvrdých vrstev při malé stopě vtisku. [53]



Obr. 11: Tvar intendoru podle Vickerse (HV), Rockwella (HRB, HRC) a Brinella (HB)

#### 4.4 Elektrické vlastnosti a zkoušky

Vzhledem k tomu, že v elektrotechnice kompozity nacházejí své uplatnění především jako elektroizolační materiály, je tato kapitola zaměřena na soubor metod, které charakterizují zejména elektroizolační vlastnosti. Z elektrických vlastností je sledován například průběh absorpčního a resorpčního proudu, z nichž lze vyhodnotit izolační odpor, polarizační indexy a další parametry. Z napěťových zkoušek lze určit ztrátový činitel, relativní permitivitu a elektrickou pevnost. Často jsou tyto materiály vystavovány vlivu okolního prostředí, proto lze řadu zkoušek provádět za zhoršených podmínek (zvýšené teploty, vlhkost, vliv chemikálií nebo UV záření aj.).

##### 4.4.1 Polarizace

Nejprve je nutné zmínit jev zvaný polarizace. Polarizace dielektrika popisuje chování látky po vložení do elektrického pole. Jelikož jsou dielektrika schopna vytvářet vlastní vnitřní elektrické pole, jsou polarizační děje závislé na stavbě a struktuře látky. Sledovat průběh polarizačních jevů lze z makroskopického i z mikroskopického hlediska.

Z makroskopického hlediska jsou sledovány vnější projevy polarizačních dějů. V tomto případě je zkoumán vznik dipólového momentu celého dielektrika. Výsledkem polarizace je tedy vznik vázaného elektrického náboje na povrchu dielektrika po vložení do elektrického pole. Tím získá dielektrikum dipólový moment a lze stanovit vektor polarizace  $\vec{P}$ . Ten se vypočte podle následujícího vztahu:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (4.10)$$

kde  $\Delta \vec{M}$  je dipólový moment objemového elementu  $\Delta V$  [ $C \cdot m$ ],

$\Delta V$  je objemový element [ $m^3$ ].

Nejdůležitější veličinou, která určuje chování dielektrik z makroskopického hlediska ve vnějším elektrickém poli, je relativní permitivita  $\epsilon_r$ . Ta určuje vliv prostředí na intenzitu namáhání dielektrika v elektrickém poli, které na něj působí. Relativní permitivita je dána vztahem:

$$\epsilon_r = 1 + \kappa \quad (4.11)$$

kde  $\kappa$  je dielektrická susceptibilita (koeficient polarizace). Ta pro vakuum i vzduch nabývá hodnot 0 a pro ostatní látky je větší než 0. [3]

Z mikroskopického hlediska se sledují polarizační jevy probíhajícími uvnitř dielektrika. Polarizace je zde popisována jako pružné posunutí nosičů vázaného elektrického náboje ve směru elektrického pole, dochází k natočení dipólových momentů v tomto směru. Veličinou, která charakterizuje polarizační jevy z pohledu mikroskopického je polarizovatelnost  $\alpha$ . K polarizaci může dojít i bez vlivu vnějšího elektrického pole, v těchto případech ke zpolarizování dochází neelektrickým namáháním. Takovým příkladem jsou piezoelektrika, kdy k polarizaci dochází mechanickým namáháním. Pokud polarizaci vyvolalo vnější elektrické pole, dělí se podle druhu nosičů elektrického náboje. Pokud polarizace byla vyvolána posunutím silně vázaných nosičů, jedná se o deformační polarizaci. V tomto případě jsou nosičem elektrického náboje elektrony, ionty nebo stálé dipóly. Tyto silně vázané nosiče náboje mohou být posunuty z jejich rovnovážné polohy vlivem vnějšího elektrického pole pouze o velmi malou vzdálenost, ale i tak dochází k ovlivnění relativní permitivity. Tato polarizace je bezetrátová a není závislá na teplotě, tlaku ani frekvenci, pokud se nejedná o tak velké hodnoty, při kterých dochází k rozrušení látky. Další polarizace je známá jako relaxační (tepelná), u které se vlivem elektrického pole posunují slabě vázané nosiče elektrického

náboje. Důležitou roli v tomto případě hraje tepelný pohyb nosičů elektrického náboje. Kvůli tomuto pohybu je umožněno slabě vázaným nosičům překonávat potenciálové bariéry. Tepelné pohyby jsou chaotické, ale přiložením vnějšího elektrického pole, získá dielektrikum dipólový moment. Důležitou hodnotou je relaxační doba, která je určena jako časová konstanta přechodového jevu polarizace. Na rozdíl od deformačních jsou tyto polarizace ztrátové. Polarizace způsobené pohybem volných nosičů náboje jsou známy jako migrační nebo polarizace vznikající prostorovým nábojem. Podmínkami pro vznik polarizace jsou v tomto případě přítomnost volných nosičů elektrického náboje a přítomnost nehomogenit v dielektriku. Prostorový náboj ovlivňuje vodivostní jevy v materiálu a jeho elektrickou pevnost. [3]

#### 4.4.2 Absorpční a resorpční charakteristiky

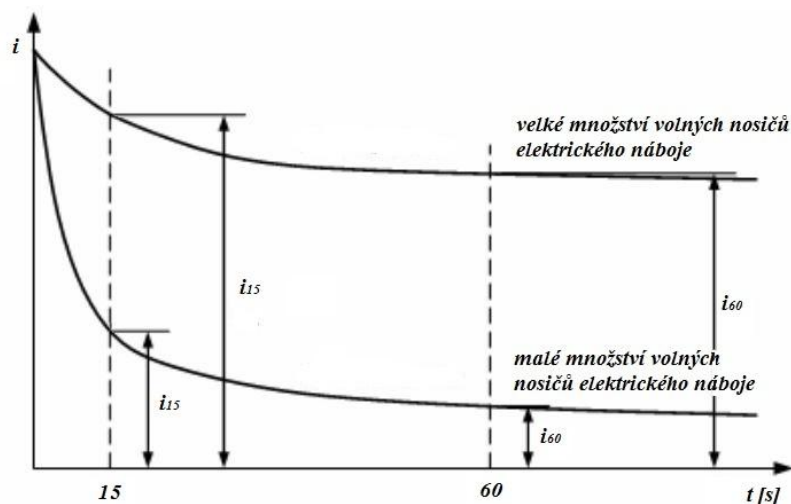
Dielektrická absorpce je jev, který popisuje nestacionární děje, které probíhají v dielektriku po vložení do stejnosměrného elektrického pole. Toto dielektrikum se nabíjí a vybíjí postupně, není tedy schopno reagovat skokově na změnu napětí. Zpoždění je způsobené dielektrickou relaxací, která je vyvolaná pomalými polarizacemi, které v dielektriku probíhají. Po připojení stejnosměrného napětí dojde nejprve k nárůstu geometrické kapacity kondenzátoru  $C_0$ , naroste tedy počáteční náboj  $Q_0$ . Vlivem rychlých deformačních polarizací následně dojde k nárůstu náboje  $Q_d$ . Potom dojde k již pomalejšímu nárůstu náboje  $Q_r(t)$  vlivem relaxačních polarizací. Po stabilizaci všech polarizací, které probíhají v dielektriku, začne jím protékat jen vodivostní proud  $i_v(t)$ . Při vybíjení probíhá výše popsáný děj obráceně. Změna velikosti náboje se ve vnějším obvodu projevuje změnou proudu v čase. Tento proud lze rozdělit na dvě složky: nabíjecí proud  $i_0$  a dobíjecí proud  $i_d$ . Nabíjecí proud je úměrný nabití geometrické kapacity  $C_0$  a deformačním polarizacím. Dobíjecí proud  $i_d$  lze rozdělit na absorpční proud  $i_a(t)$  a na vodivostní proud  $i_v(t)$ . Platí tedy:

$$i_d(t) = i_a(t) + i_v(t) \quad (4.12)$$

Absorpční proud je roven součtu polarizačních proudů relaxačních polarizací v dielektriku. Tento proud vzniká polarizací silně vázaných nosičů náboje ve stejnosměrném elektrickém poli, nahromaděním volných nosičů náboje na rozhraní nehomogenit a vznikem prostorového náboje v blízkosti elektrod. Rychlost, jakou absorpční proud klesá s časem směrem k nule, je určena strukturou a stavem dielektrika. Vztah mezi časově proměnným nábojem  $Q_r(t)$  a  $i_a(t)$  je dán podle následující rovnice:

$$Q_r(t) = \int_0^t i_a dt \quad (4.13)$$

V případě kompozitních materiálů, kdy struktura jednotlivých složek není stejná, není průběh absorpčního proudu exponenciální, ale klesá pomaleji. Časová závislost tohoto proudu se využívá pro zjištění stavu izolace. Pro určení stavu, v jakém se izolace nachází, se v praxi využívá absorpčních křivek, které jsou charakteristické pro stav daného dielektrika.

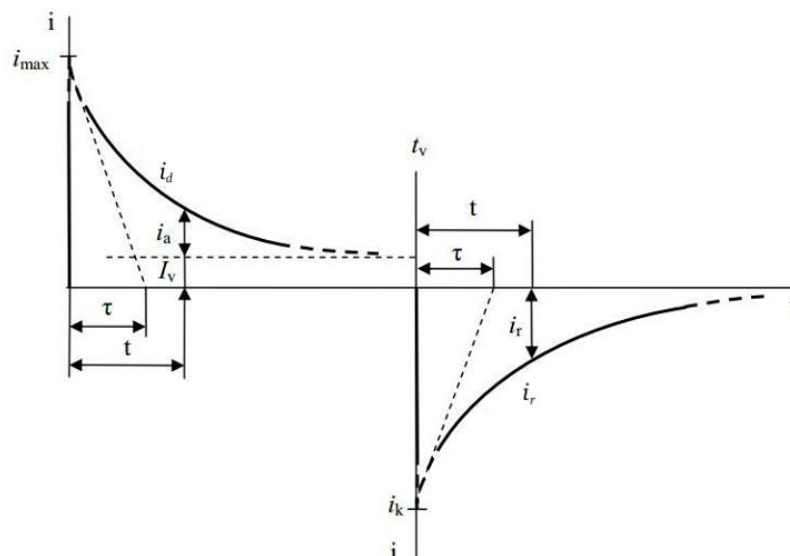


Obr. 12: Průběhy absorpčních charakteristik pro suchý a navlhlý materiál (překresleno z: [3])

Pomocí vodivostního proudu  $i_v(t)$  lze určit stupeň navlhnutí izolace. U suché a neporušené izolace je tento proud velice malý a časově neproměnný. U navlhlé se projevuje iontová vodivost, a proto je nutné brát v potaz časovou proměnlivost proudu  $i_v(t)$ . Při vybíjení (po odpojení zdroje stejnosměrného napětí) se projevuje časově proměnný proud, který se skládá ze dvou složek: vybíjecího proudu  $i_k$  a resorpčního proudu  $i_r(t)$ . I přes to, že dochází k vybíjení stejného náboje  $Q_r$ , který byl získán absorpčním proudem, nelze tyto dva proudy rovnat, protože část náboje byla vyrovnána svodovými cestami uvnitř izolace. Platí tedy:

$$i_a(t_1) \neq -i_r(t_v + t_1) \quad (4.14)$$

Kde  $t_v$  je doba odpojení napětí a vyzkratování elektrod. Časový průběh dielektrické absorpce je znázorněn na následujícím obrázku. [3, 14]



Obr. 13: Časový průběh proudu při nabíjení a vybíjení kondenzátoru (převzato z: [3])

Podle [14] jsou resorpční proudy využívány pro stanovení tzv. redukovaných resorpčních křivek. Při této metodě se matematicky zpracovávají resorpční průběhy do tvaru relativních resorpčních charakteristik. Parametrem, který hodnotí stav izolačního systému, je lineární náhrada resorpční redukované křivky RRR. Samotné vyhodnocení pak závisí na směrnici RRR. Větší směrnice znamená lepší izolační vlastnosti a naopak menší definuje horší elektroizolační vlastnosti.

Z absorpčních a resorpčních charakteristik lze tedy získat parametry, které určují stav izolantů. Mezi nejdůležitější takové parametry řadíme: izolační odpor  $R_i$ , polarizační indexy  $p_{i1}$  a  $p_{i10}$ , rezistivita  $\rho$  (vnitřní a povrchová) nebo například plochy pod absorpčními křivkami.

#### 4.4.2.1 Polarizační index

Parametrem, který určuje stav izolace a vychází z absorpčních charakteristik, je polarizační index  $p_i$ . Výpočet jednodominutového polarizačního indexu se provede jako poměr absorpčního proudu v patnácté a šedesáté sekundě. Vztah pro tento výpočet se provede následovně:

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad (4.15)$$

kde  $R_{60}$  a  $R_{15}$  jsou izolační odpory v 60 a 15 sekundě po přiložení napětí [ $\Omega$ ],

$i_{15}$ ,  $i_{60}$  jsou absorpční proudy odečtené v 15. a 60. sekundě [A],

$i_{\infty}$  je vodivostní ustálený proud [A].

Čas se počítá od doby, kdy bylo přiloženo napětí na zkoumaný vzorek. Desetiminutový

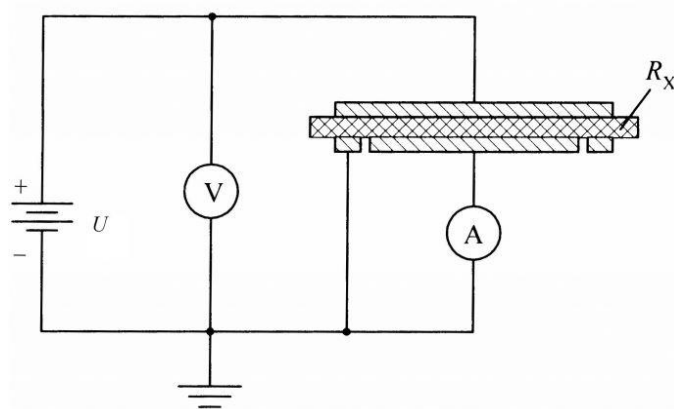
polarizační index je určen poměrem proudu v první a desáté minutě a využívá se hlavně při diagnostice elektrických strojů a jejich součástí. U navlhle izolace se prosazuje vodivostní ustálená složka  $i_{\infty}$ , proto výsledný polarizační index je blízký hodnotě jedna. Naopak u suché izolace nabývá hodnot vyšších, protože se uplatňuje časově závislá složka proudu  $i_{abs}$ . U kvalitních izolací dosahuje hodnota až hodnot 3 – 6. [3, 14]

#### 4.4.2.2 Izolační odpor

Izolační odpor se definuje jako poměr stejnosměrného napětí, které je přivedeno na elektrody zkoušence, a celkového proudu mezi elektrodami v předem stanoveném čase po připojení napětí. Izolační odpor závisí na vnitřním a povrchovém odporu materiálu. Vnitřní odpor je charakterizován jako poměr stejnosměrného napětí a ustáleného proudu, který neteče po povrchu zkoumaného tělesa se zanedbáním polarizačních jevů v oblasti elektrod. Povrchový odpor je pak určen jako poměr stejnosměrného napětí a proudu tekoucího po povrchu tělesa, který zahrnuje i složku tekoucí vnitřkem zkoušence. Izolační odpor  $R_i$  se určuje po jedné minutě, kdy bylo přiloženo napětí jako poměr stejnosměrného napětí a celkového proudu. Tento odpor je schopný indikovat přítomnost vlhkosti nebo vodivých nečistot v izolaci.

Pro zjištění odporu lze použít přímé (voltampérová metoda) a porovnávací metody (metoda Wheatstonova můstku) měření. Zástupcem přímé metody je voltampérová metoda, která je podle normy ČSN IEC 93 doporučena pro měření vnitřní a povrchové rezistivity. Je důležité, aby zdroj napětí byl stabilní, aby při jeho změně byla výchylka proudu zdroje proti měřenému proudu minimální. Nejčastěji používané napěťové hladiny jsou: 100, 500 a 1000 V. Při této metodě se odpor vyjádří jako poměr naměřeného napětí  $U$  voltmetrem a proudu  $I$  protékajícího vzorkem. Podle [3] je tato metoda nejpohotovější a nejlépe fungující, protože v případě zapojení s elektrometrem je citlivá i v oblastech proudu  $10^{-14}$  až  $10^{-16}$  A, kde jsou ostatní metody již necitlivé.

$$R_x = \frac{U}{I_x} \quad (4.16)$$

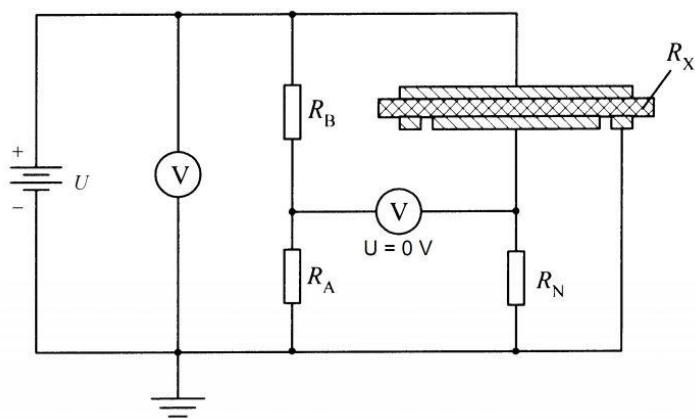


Obr. 14: Zapojení Voltampérové metody měření odporu (převzato z: [3])

V případě metody Wheatstonova můstku se porovnává neznámý odpor  $R$  se známým odporem  $R_N$ . Zjišťovaný odpor izolace je zapojen do jedné větve můstku. Do zbylých tří větví jsou zapojeny odpory  $R_N$ ,  $R_A$  a  $R_B$ . Odpory  $R_A$  a  $R_B$  jsou využívány k vyrovnávání tak, aby nulový indikátor prokázal vyváženost můstku.

$$R_X = R_N \cdot R_B / R_A \quad (4.17)$$

Při napětí 100 V lze měřit odpory až do velikosti  $10^{14} \Omega$ , ale tato metoda není vhodná pro měření odporu izolace při časově proměnném proudu. Mezi další známé metody, které se využívají pro měření odporu, patří například kompenzační metoda. Při které se kompenzuje úbytek napětí na odporovém normálu  $R_N$  pomocným proměnným napětím  $U_K$ . [3, 14]



Obr. 15: Zapojení metody Wheatstonova můstku (převzato z: [3])



#### 4.4.2.3 Rezistivita

Důležitou elektrickou vlastností pro hodnocení elektroizolačních materiálů je měrný elektrický odpor, neboli rezistivita  $\rho$ . Rozlišujeme vnitřní a povrchovou rezistivitu. Povrchová rezistivita je vyjadřována jako poměr stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty na povrchu izolace. Jednotkou povrchové izolace je  $\Omega$ . Vnitřní rezistivita je poměr stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty uvnitř izolace. Jedná se o konstantu, která charakterizuje materiál z hlediska elektrické vodivosti látky. Čím menší je rezistivita, tím větší je vodivost dané látky. Proto se pro vhodné aplikování na izolační materiály požaduje co nejvyšší rezistivita. Hodnota rezistivity se získá pomocí výpočtu izolačního odporu a rozměrů zkoušeného materiálu. Pomocí rezistivity lze porovnávat i odlišné materiály. Výpočet se provede podle následujícího vzorce:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} [\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}] \quad (4.18)$$

kde  $S$  je plocha elektrod [ $m^2$ ]

$h$  je tloušťka vzorku [m]

$R$  je hodnota izolačního elektrického odporu [ $\Omega$ ].

Výpočet vnitřní rezistivity po přiložení napětí se provádí podle následujícího vztahu:

$$\rho_V = R_X \cdot \frac{A}{h} \quad (4.19)$$

kde  $R_X$  je vnitřní odpor [ $\Omega$ ],

$A$  je efektivní plocha [ $m^2$ ],

$h$  je tloušťka vzorku [m].

Povrchová rezistivita je stanovena následovně:

$$\rho_P = R_X \cdot \frac{p}{g} \quad (4.20)$$

kde  $R_X$  je povrchový odpor [ $\Omega$ ],

$p$  je efektivní obvod ochranné elektrody pro příslušné elektrodové uspořádání [m],

$g$  je vzdálenost mezi elektrodami [m]. [3, 14]

#### 4.4.3 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty vyjadřují velmi důležitou vlastnost z pohledu použití izolantů. Dielektrickými ztrátami se rozumí energie, která se změní např. v tepelnou energii během dějů, které probíhají ve struktuře izolantu po jeho zatížení elektrickým polem. Při tomto ději tedy vzniká teplo, které je nežádoucí pro izolanty, protože by mohlo dojít k poškození izolačního materiálu. Dielektrické ztráty zahrnují vodivostní, polarizační a ztráty ionizační.

Vodivostní ztráty se vyskytují u všech druhů dielektrik a jejich důsledkem je degradace energie elektrického pole v Joulovo teplo. Polarizační ztráty jsou určeny polarizačními ději v dielektriku. Dielektrické ztráty existují při stejnosměrném ale i při střídavém napětí. V případě střídavého el. pole je důležité zmínit ztrátový úhel  $\delta$ . Pomocí něhož se často vyjadřují dielektrické ztráty.  $\text{Tg } \delta$  je určen poměrem činné a jalové složky proudu protékající dielektrikem. Ztrátový činitel je vhodný pro rychlé posouzení izolantu. Je však nutné podotknout, že při měření  $\text{tg } \delta$  je důležité znát hodnoty frekvence, teploty a napětí, aby se došlo ke správným závěrům. Pokud je  $\text{tg } \delta$  menší než  $10^{-3}$ , jedná se o dobrý elektroizolační materiál, v případě, že hodnota je větší než  $10^{-2}$ , materiál je špatný. Dielektrické ztráty se dají vyjádřit pomocí ztrátového výkonu  $P_Z$  nebo stejnosměrným elektrickým polem. Velikost těchto ztrát je závislá na průchozím proudu a izolačním odporu. Výpočet se provádí podle následujícího vztahu:

$$P_{Z_{SS}} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i} [W] \quad (4.21)$$

Pokud chceme vyjádřit dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli, použije se následující vztah:

$$P_{Z_{stř}} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg} \delta [W] \quad (4.22)$$

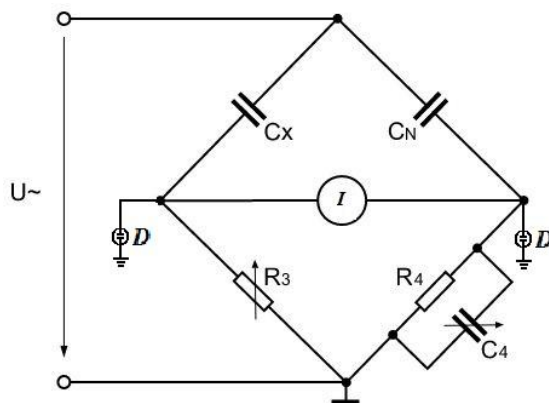
Pro měření  $\text{tg } \delta$  se nejčastěji používá metoda Scheringova můstku. Ten se skládá ze dvou částí, které jsou od sebe galvanicky odděleny měřeným vzorkem v elektrodevém systému a kapacitním normálem. Kapacitním normálem se rozumí vysokonapěťový kondenzátor, který dosahuje obvykle hodnoty 95,63 pF a  $\text{tg } \delta$  menších než  $10^{-5}$ . V uzlových bodech se nacházejí svodiče přepětí, které slouží k ochraně obsluhy. Odporová  $R_3$  a kapacitní dekáda  $C_4$  slouží k vyvážení můstku. Toto vyvážení je indikováno nulovým indikátorem I. Pro vyrovnaný můstek platí:

$$C_X = C_n \frac{R_4}{R_3} \quad (4.23)$$

$$\text{tg} \delta = \omega C_4 R_4 \quad (4.24)$$

$$\text{tg} \delta = 0,1 \cdot C_4 \quad (4.25)$$

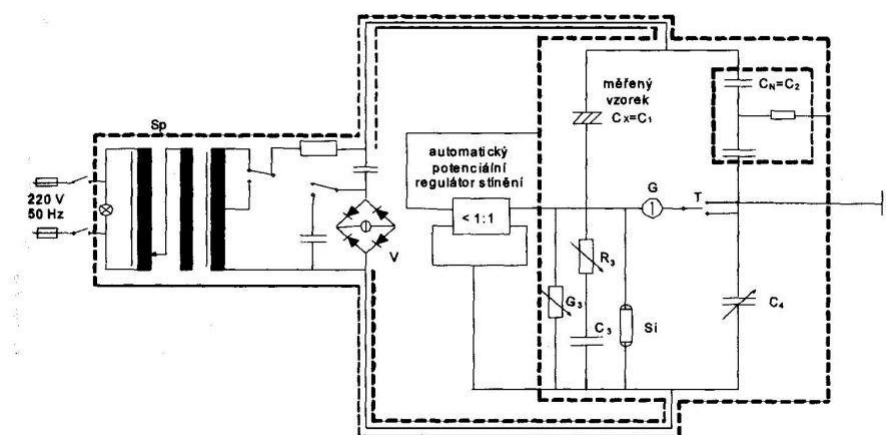
Pro frekvenci 50 Hz se volí odpor  $R_4$  o velikosti  $1000/\pi$  pro usnadnění výpočtů. Před samotným měřením je nutné odstranit parazitní kapacity potenciálním regulátorem, který zajistí likvidaci rušivých potenciálů vzniklých okolními rušivými poli a vazbami prvků můstku proti zemi. [3, 28]



Obr. 16: Scheringův vysokonapěťový můstek (překresleno z: [3])

Další metodou je metoda čtyřkapacitního můstku. Na rozdíl od Scheringova má tento můstek ve všech větvích kapacity. Tedy odpor  $R_3$  a  $R_4$  je nahrazen kapacitami, byla zvýšena impedance v těchto větvích, a tím se zvýšila i citlivost a přesnost měření. Práce do 2000 V je umožněna vlastním zabudovaným napájecím zdrojem, který zaručuje sinusový tvar křivky 50 Hz bez vyšších harmonických a je zapojen v rezonanci. Opět je součástí můstku i potenciální regulátor. Můstek se vyrovnává pomocí elektronického nulového indikátoru s regulovatelnou citlivostí. Velikost  $\text{tg } \delta$  je čtena přímo z vyvažovacích prvků můstku. Pro vyvážený stav pak platí:

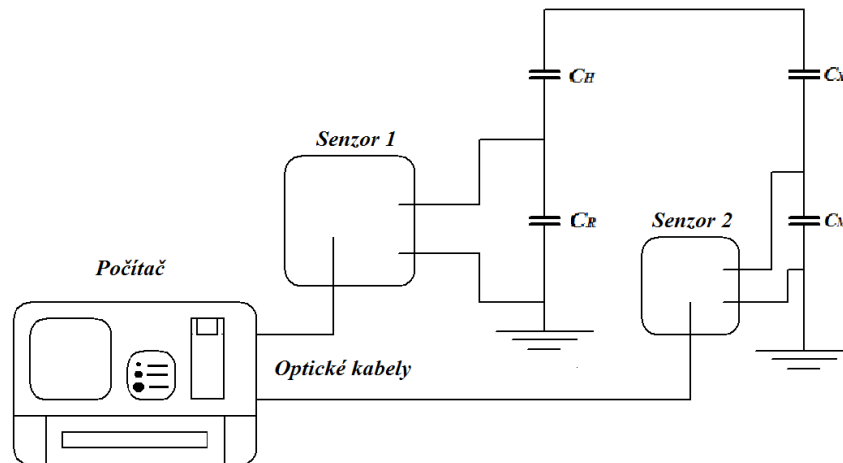
$$C_X [pF] = C_N [pF] \frac{C_3 [\mu F]}{C_4 [\mu F]} \quad (4.26)$$



Obr. 17: Čtyřkapacitní Scheringův můstek (převzato z: [3])

Automatický můstek vychází ze Scheringova můstku a automaticky zobrazuje  $\text{tg } \delta$ ,  $C_X$  a  $U_{zk}$ . Výhoda tohoto můstku je, že nemusí být zcela ve vyváženém stavu. Měří se

fázový úhel mezi dílčími napětími na obou nízkonapěťových impedancích  $C_M$  a  $C_R$ , které jsou hrubě nastaveny na hodnoty stejných řádů dělicích poměrů. Ztrátový činitel  $\tan \delta$  se určí z fázového úhlu na těchto impedancích. V počítači jsou zpracovány signály pomocí Fourierovy transformace. Schéma zapojení automatického můstku pro měření dielektrických ztrát je na následujícím obrázku. [3]



Obr. 18: Automatický můstek - schéma zapojení (překresleno z: [3])

#### 4.4.4 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost  $E_P$  je jedna z nejvýznamnějších vlastností, která charakterizuje elektroizolační materiál. Tato vlastnost umožňuje se podívat na materiál z pohledu, jak dobře dokáže izolant oddělit dvě různá místa s rozdílným elektrickým potenciálem, a tak zabránit průchodu proudu mezi těmito dvěma místy. Velkou roli zde hrají: přiložené napětí (resp. lokální elektrické pole) a vnější okolní podmínky. V homogenním el. poli elektrická pevnost představuje intenzitu elektrického pole, při které dojde k průrazu nebo přeskoku. U nehomogenního pole se musí stanovit smluvní veličina, kterou je nutno vždy měřit při předem stanovených podmínkách, které musí být pro všechny naměřené materiály stejné. V případě, že dojde k proražení pevného izolantu, mluví se o průrazu a u kapalných nebo plyných izolantů, případně na rozhraní pevného a kapalného nebo plyného izolantu, se jedná o přeskok. Rozdíl mezi průrazem a přeskokem je dán dobou regenerací izolačních vlastností. U přeskoku je zhoršení elektroizolačních vlastností pouze dočasné, avšak u průrazu je trvalé. K průrazu a přeskoku dochází při překročení kritického přiloženého napětí, které se nazývá průrazné napětí  $U_P$ . Toto napětí je závislé na druhu materiálu, rozměrech, elektrickém poli, časovém působení elektrického namáhání, době působení napětí na izolant a na vnějších podmínkách. Výpočet elektrické

pevnosti provedeme následujícím způsobem:

$$E_p = \frac{U_p}{d} [kV] \quad (4.27)$$

kde  $d$  je tloušťka izolantu v místě průrazu nebo nejmenší vzdálenost mezi elektrodami. Z pohledu kompozitních izolačních materiálů je snaha o co největší elektrickou pevnost. [3, 14]

Elektrickou pevnost lze testovat například rázovými střídavým nebo stejnosměrným napětím a rázovými zkouškami. Pro zkoušky zjišťování elektrické pevnosti je stanovena norma ČSN EN 60243. Zkoušky rázovým napětím využívají impulsy generátoru. Je nutné, aby byla zajištěna správná velikost napětí a energie generátoru, aby byl dodržen správný tvar impulsu až k dosažení průrazného napětí. Měří se vrcholová hodnota napětí, doba čela a půltýlu. Napěťová odolnost je určena nejvyšší jmenovitou vrcholovou hodnotou napětí ze série tří impulsů, kdy nedošlo k průrazu. Při zkouškách střídavým napětím je využíván vysokonapěťový transformátor napájený napětím se sinusovým průběhem. Nejvyšší hodnota napětí, kdy dojde k průrazu, se zobrazuje na voltmetru.[3]

Pomocí krátkodobých zkoušek se postupně zvyšuje napětí plynule, nebo stupňovitě. V případě plynulého zvyšování napětí je žádoucí, aby k průrazu došlo mezi 10. a 20. s. Proto je nutné, aby se pro tyto účely provedlo několik předběžných zkoušek. Pokud se zvyšuje napětí stupňovitě, mohou zkoušky probíhat dvěma způsoby. Při prvním způsobu jsou zvoleny dvacetisekundové stupně, kdy nejnižší z nich dosahuje hodnoty 40 %  $U_p$ . Výsledkem je napětí, které materiál vydržel celý jeden stupeň – 20 s. U druhého způsobu se používají šedesátisekundové stupně a nejnižší hodnota je 50 %  $U_p$ . Napětí zvyšujeme o 5 % po prvním stupni a o 10 % při přechodu na následující stupně. Čas samotného přechodu je 10 s. Průrazné napětí je určeno stejně jako u prvního způsobu. [3, 14]

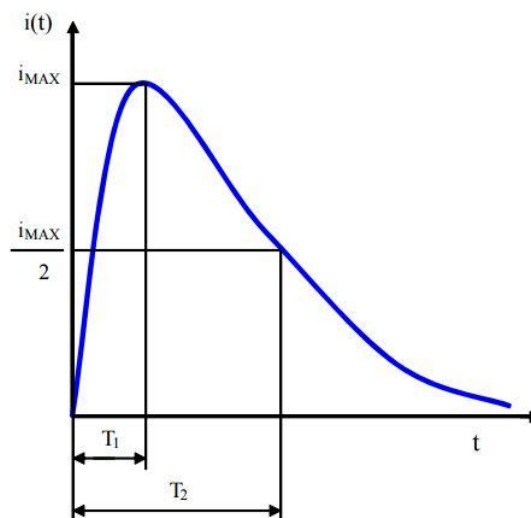
#### 4.4.5 Částečné výboje

Podle normy ČSN EN 60270 je částečný výboj definován jako: „Lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče.“ Částečný výboj je druh elektrických výbojů, který se vyskytuje během provozu elektrických zařízení, strojů, vedení, izolací atd. Zvýšená aktivita částečných výbojů zapříčiňuje nevratné poškození elektrické izolace, proto je nutné zahrnout do diagnostického souboru, který je vhodný pro kompozitní materiály, i metody detekce částečných výbojů. Během částečného výboje dochází k částečnému přemostění izolace mezi vodiči nebo elektrodami o různých potencionálech

na dobu menší než  $1 \mu\text{s}$ . Tyto výboje vznikají důsledkem elektrického namáhání v izolaci a velmi snižují spolehlivost a životnost izolačních systémů. Podle místa výskytu je lze rozdělit na tři skupiny:

- vnější částečné,
- vnitřní částečné výboje,
- povrchové částečné výboje. [14]

Jak už bylo zmíněno, aktivita částečných výbojů způsobuje nenávratnou degradaci izolačního materiálu. Tato degradace je způsobena převážně chemickou degradací dielektrika a bombardováním stěn dutiny v materiálu částicemi, které dopadají na povrch materiálu. Ale na každý materiál působí výbojová činnost trochu jiným způsobem. Nejvíce ovlivňované materiály jsou organické (PET, PEN, PE) a kompozitní (s epoxidovou nebo silikonovou maticí), na druhou stranu například slída a porcelán jsou vůči výbojové činnosti odolné. Ne na všechny materiály působí výbojová činnost stejnými účinky. Obvykle lze tyto účinky rozdělit na: chemické účinky, plynné produkty, kapalně produkty, pevné produkty, elektrické účinky, erozivní účinky a tepelné účinky. [14]



Obr. 19: Proudový impulz částečného výboje ( $T_1$ -čelo impulzu,  $T_2$  půltýl impulzu) [55]

#### 4.4.5.1 Diagnostika částečných výbojů

Před uvedením samotných diagnostických metod detekce částečných výbojů je potřeba si určit parametry, které slouží k hodnocení. Podle normy ČSN EN 60270 lze tyto parametry dělit do základních skupin:

- veličiny vztažené k jednotlivým impulzům,
- veličiny integrované,
- napětí vztahovaná k částečným výbojům.

##### Veličiny vztažené k jednotlivým impulzům

Zdánlivý náboj  $q$  impulzu částečného výboje je podle [14] náboj, při jehož mžikovém přivedení na svorky zkoušence se krátkodobě změní napětí mezi jeho elektrodami na takovou hodnotu, na kterou by se změnilo při částečném výboji. Dále do této skupiny řadíme fázový úhel a čas výskytu impulzu částečného výboje a četnost impulzů.

##### Veličiny integrované

Do skupiny veličin integrovaných patří střední proud částečných výbojů  $I$ , součtový náboj  $Q$ , střední kvadratický součet  $D$  a výkon částečných výbojů  $P$ . Střední proud vychází ze součtu absolutních hodnot zdánlivých nábojů za určitý časový interval, dělený délkou tohoto intervalu. Součtový náboj  $Q$  je součet hodnot zdánlivých nábojů. Střední kvadratický součet  $D$  je definován jako součet druhých mocnin zdánlivých nábojů. Výkon částečných výbojů je roven střední hodnotě výkonu impulz částečných výbojů po dobu  $T$ .

##### Napětí vztahovaná k částečným výbojům

Poslední skupinou jsou napětí vztahovaná k částečným výbojům, kam se řadí zkušební napětí částečných výbojů, zapalovací napětí částečných výbojů a zhasací napětí. Zkušební napětí je předem stanovené napětí, během něhož nepřekračuje aktivita částečných výbojů předem stanovenou hranici. Zapalovací napětí je nejnižší hodnota testovacího napětí, kdy dochází k zachycení stabilní aktivity částečných výbojů během postupného zvyšování testovacího napětí nad předepsanou mez. Zhasací napětí je definováno jako napětí, kdy dochází k poklesu aktivity částečných výbojů pod předepsanou mez. [14]

##### Diagnostické metody

Výbojovou činnost lze detekovat různými metodami, protože je doprovázena řadou fyzikálních jevů – proudové impulzy, VF elektromagnetické pole, vznik chemických zplodin, světelné záření, UV záření, tepelný ohřev a zvukové vlny. Díky tomu je možné

metody detekce částečných výbojů rozdělit na elektrické a neelektrické.

Princip elektrických metod je založen na měření proudových impulzů, které doprovázejí aktivitu částečných výbojů. Nejčastěji užívanou elektrickou metodou pro zjišťování aktivity částečných výbojů v izolaci je globální galvanická metoda. Při měření se sledují impulzy částečných výbojů s pomocí měřicí impedance. Ta je tvořena jako RLC člen, který obsahuje i ochranné prvky. Primární funkcí měřicí impedance je převádět proudové impulzy, které jsou vyvolané částečnými výboji, na výstupní napěťové pulzy vedené do měřicího zařízení. A dále slouží k odfiltrování superponovaných pulzů částečných výbojů od napájecí frekvence. Dle normy ČSN EN 60270 existují celkem tři základní obvody pro měření částečných výbojů galvanickou metodou:

- zkušební obvod s paralelní snímací impedancí,
- zkušební obvod se sériovou snímací,
- zkušební obvod v můstkovém zapojení.

Tyto obvody jsou navrženy tak, aby byla zajištěna vysoká míra citlivosti měření, vysoká schopnost reprodukce a porovnatelnost naměřených hodnot. Tato metoda může být použita za provozu, aniž by docházelo k nadměrnému přetěžování měřeného zařízení. Nevýhodou může být citlivost na rušivé okolní i vnitřní vlivy (koróna, signály rádiových vysílačů, pulzy silové elektroniky aj.). Pro odstranění tohoto pole se nejčastěji používají digitální filtry. Další metodou elektrických metod jsou metody nepřímé založené na principu zjišťování přítomnosti elektromagnetického pole vyzařovaného při aktivitě částečných výbojů. Použitím induktivní, elektromagnetické nebo kapacitní sondy lze toto elektromagnetické pole detekovat. [14, 55]

Neelektrickými metodami zjišťujeme přítomnost částečných výbojů pomocí přítomnosti chemických zplodin, světelného záření, tepelného ohřevu nebo zvukových vln. Pomocí těchto metod lze určit přítomnost a místo vzniku, případně množství výbojové činnosti. Například akustickou detekcí je měřena akustická emise, tedy zvukové vlny, které se šíří v prostoru. Směrové mikrofony v různém frekvenčním pásmu jsou měřeny akustické signály vzniklé výbojovou činností ve slyšitelném nebo ultrazvukovém pásmu. Další metodou je optická detekce, kterou se zjišťuje použitím vhodných optických zařízení (kamera, fotografie) přítomnost optických projevů ve viditelném UV spektru, které jsou způsobeny částečnými výboji. Chemická metoda je založena na principu detekce vzniklých plynných produktů při reakci částečných výbojů s plynem v dutinkách dielektrika. [14]



#### 4.5 Strukturální vlastnosti a zkoušky

Strukturální diagnostické systémy poskytují možnost sledování vnitřních dějů v diagnostikovaném materiálu. Podle [14] je strukturální přístup v diagnostice výpovědischopnější a vydatnější. I když použití strukturálních analýz v elektrotechnologii nemá takovou historii jako ostatní diagnostické metody, patří dnes už mezi hojně využívané metody pro diagnostiku elektrických zařízení. V elektrotechnologické diagnostice je pozornost zaměřena zejména na entalpii materiálů a na metody, pomocí nichž lze určit složení materiálu nebo přítomnost látek, které vznikly během výroby nebo provozu. Materiály, které se používají v elektrických zařízeních, jsou vystavovány vlivům okolí. Ty lze rozdělit na vlivy prostředí (teplota, vlhkost, záření, chemická činidla) a provozní (elektrické namáhání, mechanické namáhání, tepelné namáhání). Působením těchto vlivů zapříčiní v materiálu změnu ve struktuře. Nejslabším článkem kompozitních i jiných materiálů jsou většinou organické části. Vlivem již zmíněných vlivů dochází ke ztrátě původních vlastností materiálů, tento jev lze popsat jako stárnutí materiálů. S ohledem na široké spektrum možných namáhání existují i různé děje, které v materiálech probíhají. Lze zmínit například pomalé okysličování, postupné tvrdnutí a křehnutí izolace, depolymeraci, elektrolytické reakce, reakce vyvolané částečnými výboji aj. [3, 14]

Použití strukturálních analýz s sebou nese řadu specifík, která je potřeba vždy dokonale znát např. složení zkoušeného materiálu, jeho vlastnosti, pomocí toho lze zvolit správnou strukturální metodu zkoušky. Pokud by nebyly brány ohledy na tyto aspekty před zahájením samotného strukturálního zkoumání, projevíly by se nevýhody těchto zkoušek (velký rozptyl výsledků, vysoké pořizovací náklady nebo nároky na vyškolení obsluhy). V této části práce se zaměřím na termické analýzy, které jsou podskupinou strukturálních analýz. Jedná se o metody, kterými zaznamenáváme fyzikální a chemické změny vznikající v látce jako funkci teploty. Další techniky jsou separačního a spektrometrického typu. Obecně ale lze rozdělit strukturální analýzy používané v elektrotechnologii podle principu na:

- metody založené na zjišťování hmotnosti (termogravimetrie TG, plynová chromatografie GC, gelová permeační chromatografie GPC),
- metody založené na měření energie (diferenční termická analýza DTA, diferenční skenovací kalorimetrie DSC),
- metody založené na měření mechanických vlastností (termomechanická analýza TMA, dynamická mechanická analýza DMA),

- metody založené na jiných principech (infračervená spektroskopie IR, infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací FT-IR, rentgenová fluorescenční spektrometrie XRF),
- on-line diagnostické metody (měření koncentrace ozónu, rozbor příměsí vodíku).

Často jsou používány tyto metody v různých kombinacích, tak aby byla zajištěna vysoká míra přesnosti výsledků měření. Příkladem takové kombinace je například TGA s DTA a DSC případně ještě ve spojení s infračerveným spektrometrem. V takovém případě se jedná o simultánní termickou analýzu STA. Taková kombinace šetří čas potřebný pro analýzu vzorků, ale nese s sebou i některé nevýhody jako kompromis řešení aparatur, který zapříčiňuje snížení citlivosti analýz. Jelikož je problematika strukturálních analýz velmi rozsáhlá, nejsem schopen ji v této práci detailně rozebrat, proto nastíním jen základní princip vybraných, pro elektrotechnologii nejdůležitějších, metod (DTA, TMA, TGA aj.). [3, 14, 58]

#### 4.5.1 Diferenční termická analýza (DTA)

Podle [14] je DTA „*technika, která měří teplotní rozdíl mezi látkou a tzv. teplotně inertním standardem jako funkci teploty, přičemž zkoumaná látka i inertní standard jsou podrobeny řízenému teplotnímu programu*“. Inertní standard je referenční vzorek, který nevykazuje žádné fázové přechody během definovaného teplotního experimentu. Většinou se jedná o oxid hlinitý vyžíhaný při teplotě 1000 °C, ale lze použít i jiné látky (nitrid draselný, chromid draselný atd.). Touto termickou metodou je tedy popsána aktuální úroveň entalpie (energie uložená v termodynamickém systému), čímž lze určit stupeň degradace. [3, 14, 58]

Před samotným začátkem měření je nutné stanovit správnou rychlost ohřevu, tvar vzorku, velikost vzorku aj. V průběhu zkoušky je materiál zahříván nebo ochlazován společně s teplotním standardem. Postupně je zaznamenávána entalpie obou materiálů. Zatímco teplota standardu odpovídá teplotě pece, teplota zkoumaného vzorku se liší. To je zapříčiněno změnami energie při chemických a fyzikálních reakcích. U vzorku dochází k exotermním (emise energie) nebo endotermním (absorpce energie) reakcím, což má za následek změny teplot u zkoumaného vzorku. Výstupem této metody je vyhodnocení rozdílů teplot pomocí termočlánků mezi oběma vzorky tzv. termogramy. Rozdíl teplot je zaznamenáván v závislosti na čase i teplotě. Z těchto křivek lze pak hodnotit stav materiálů a zároveň je možné nastínit stav reakce schopných částic. Směrodatné pro samotné

vyhodnocení jsou plochy pod píkem. Píky znázorňují jednotlivé probíhající reakce. [3, 14]

Metodu lze využít, je-li třeba určit stupeň zestárnutí izolantu, sklon životnostních charakteristik, teplotu tepelného rozkladu a dehydrataci, technologickou kázeň při zpracování, kvalitu provedení vytvrzovacího procesu, a pokud je požadována analýza oxidační stability, zjištění jednotlivých složek izolačních systémů. Pro určení těchto aspektů se porovnává již známé termogramy s nově zjištěnými. [3]

#### 4.5.2 Termomechanická analýza (TMA)

Termomechanická analýza umožňuje zjistit teplotu skelného přechodu  $T_g$  a koeficient délkové roztažnosti  $\alpha$ . Ale podle použité metody lze zjistit i další parametry: viskozitu, modul pružnosti, teplotu měknutí a tavení materiálu, zbytkové pnutí v materiálu aj. Teplota skelného přechodu je teplota, při které dochází k výrazným změnám nejen mechanických a elektrických vlastností. Jedná se o teplotní hranici přechodu mezi kaučukovitým a sklovitým stavem materiálu. Je důležité, aby materiál byl provozován vždy pod touto hranicí. Avšak tato teplota poskytuje informace i o zpracování, kvalitě vytvrzení nebo o historii vzorku. [3]

Při této metodě je zkoušený materiál vystavován jak teplotnímu namáhání, tak i mechanickému. V průběhu analýzy jsou zaznamenávány rozměry vzorku v závislosti na teplotě a čase. Z těchto naměřených hodnot se vytváří TMA křivka, z které je možné vyhodnotit teplotu skelného přechodu nebo tepelnou roztažnost. Lze měřit všechny druhy izolačních materiálů, jen u vrstvených je potřeba zajistit, aby měření proběhlo napříč jednotlivých vrstev. Obecně se jedná o univerzální metodu, kterou lze specifikovat pro naše potřeby různými druhy sond. Pro získání parametrů (teploty skelného přechodu, teploty tavení a koeficientu tepelné roztažnosti) jsou vhodné expanzní a penetrační sondy. Penetrační sonda je užívána pro zjišťování teploty tavení  $T_m$  a teploty skelného přechodu  $T_g$ . Podle zvolené sondy se určí i specifický postup měření a příprava vzorků. Tato metoda je aplikována nejen pro diagnostiku chování polymerních materiálů, ale v elektrotechnologii je vhodná i pro diagnostiku kompozitních materiálů a jiných materiálů. [14]

#### 4.5.3 Dynamická mechanická analýza (DMA)

Metoda dynamické mechanické analýzy patří mezi nejcitlivější metody, kterými lze určit mechanické chování materiálu vystaveného teplotnímu i mechanickému namáhání. Pomocí oscilující síly sinusového charakteru a teplotního programu se popisuje

viskoelastické chování materiálů. Aplikací této metody lze stanovit teplotu skelného přechodu, teplotu tavení, hustotu zesítní, krystalinitu atd. Podle [14] je dokonce tato metoda nejpřesnější k určení skelného přechodu. Je vhodná i pro analýzu mechanických vlastností dvousložkových kompozitů, sekundárních přechodů ( $\alpha, \beta$  a  $\gamma$ ) a kvalitu vytvrzení. Samotné měření začíná upevněním vzorku do čelistí přístroje. Působením oscilujícího mechanického namáhání a teplotního programu dochází k deformaci vzorku. Působící napětí a deformace jsou ve vztahu, který je popsán následovně:

$$\sigma(t) = E^*(\omega) \cdot \varepsilon(t) \quad (4.28)$$

kde  $\sigma(t)$  je proměnlivé napětí,

$E$  je dynamický modul,

$\varepsilon(t)$  je deformace vzorku.

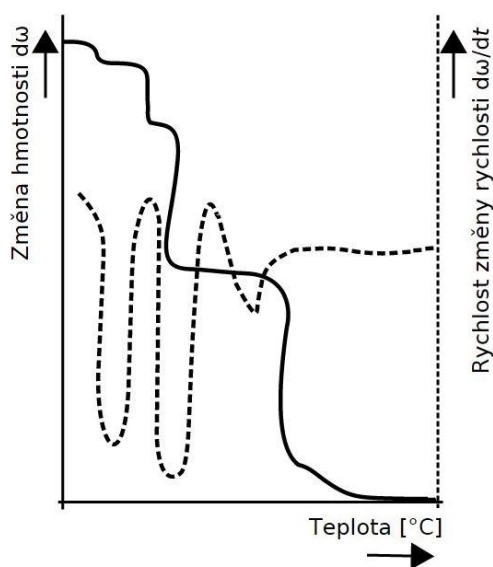
Dynamický modul  $E$  lze rozdělit na reálnou a imaginární část. Zatímco reálná část představuje elastický modul, který popisuje schopnost materiálu akumulovat energii, tak imaginární část reprezentuje útlumovou složku – ztrátový modul. Ztrátová složka – viskozita popisuje schopnost materiálu rozptýlit energii. Fázový úhel mezi těmito složkami se vyjadřuje jako ztrátový činitel  $\tan \delta$ . Pomocí ztrátového činitele lze pak rozhodnout, zda v materiálu převládá viskózní složka (vyšší ztrátový činitel) nebo elastická složka (nižší ztrátový činitel). Výstupem DMA analýzy je křivka, která vyjadřuje závislost teploty, elastického a ztrátového modulu. Na výsledek měření má vliv mnoho faktorů: typ zátěže, velikost frekvence namáhání, teplotní rozsah a rychlost ohřevu, geometrie vzorku a jeho upnutí do měřícího zařízení. [14]



Obr. 20: DMA analyzátor RSA-G2 [59]

#### 4.5.4 Termogravimetrická analýza (TGA)

Jedná se o jednu z nejjednodušších metod termické analýzy, pomocí které se sleduje změna hmotnosti (přírůstek, úbytek) vzorku v závislosti na teplotě nebo čase. Termogravimetrie umožňuje stanovit tepelnou nebo tepelně-oxidační stabilitu vzorku, z čehož lze posoudit stupeň degradace materiálu, obsah vlhkosti a organických nebo anorganických hmot. Výsledkem jsou TG (závislost hmotnosti na teplotě či čase) a DTG křivky (závislost rychlosti změny hmotnosti na teplotě). Zároveň z těchto termogramů lze určit teplotu jednotlivých fázových přechodů. Jelikož jsou známy limitní kritické úbytky pro materiály, lze pomocí této metody určit aktuální stav izolantu. V oblasti polymerů lze stanovit i obsah plniva (vápenec, saze aj.) a výztuže (skleněná vlákna, uhlíková vlákna aj.). Kromě klasické TGA analýzy je možné provádět i krokovou rozkladnou analýzu, kterou lze charakterizovat postupně rozkladné procesy. Zkoušky lze provádět v inertní i oxidační atmosféře. [14]



Obr. 21: Ukázka termogravimetrického termogramu (upraveno z: [3])

#### 4.5.5 Infračervená spektroskopie (IR)

Spektroskopie je obor, který zahrnuje všechny metody studia látek založené na interakci mezi elektromagnetickým polem a atomy nebo molekulami měřených látek v jakémkoliv stavu. Infračervená spektroskopie nepatří mezi termické analýzy, ale řadí se mezi analýzy spektrometrické. Jedná se o nedestruktivní analytickou metodu, pomocí které je zkoumáno složení materiálu, a jsou získávány informace o struktuře látky. Infračervenou spektroskopii využíváme při analýze makroskopických materiálů, ale samotnou podstatou je zkoumání interakce molekul makroskopických materiálů

s infračerveným zářením. Princip této metody spočívá v měření míry pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce materiálem, který je právě zkoumán. Při průchodu IČ záření vzorkem dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Záření po průchodu vzorkem je absorbováno a přeměněno na energii, která se projevuje vibracemi molekul. Různé látky vykazují různé spektrální projevy. Každé elektromagnetické záření je charakterizováno vlnovou délkou a frekvencí. Frekvence  $\nu$  vyjadřuje počet cyklů záření, které jsou vykonány za jednu sekundu. A vlnová délka  $\lambda$  definuje délku jednoho celého cyklu. Pro výpočet těchto hodnot se používají následující vztahy:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad a \quad \lambda = \frac{c}{\nu} \tag{4.29}$$

kde  $c$  je rychlost světla ( $3 \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Dále je nutné charakterizovat energii záření  $E$  a vlnčet. Pro energii platí vztah:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{4.30}$$

kde  $h$  je Planckova konstanta ( $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ).

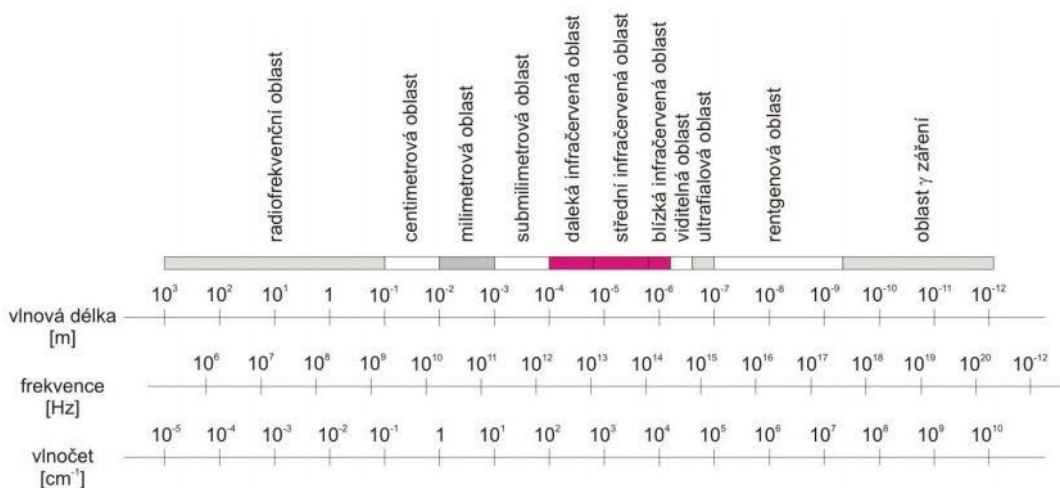
Vlnčet je převrácenou hodnotou vlnové délky.

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} \tag{4.31}$$

kde  $\bar{\nu}$  je vlnčet [ $\text{cm}^{-1}$ ],

$\lambda$  je vlnová délka [cm].

Infračervenou oblast lze rozdělit do tří oblastí: blízkou, střední a vzdálenou. [14]



Obr. 22: Spektrum elektromagnetického záření (převzato z: [61])

Výstupem této analýzy je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, která se vyjadřuje v procentech transmitance nebo absorpance, na vlnové délce dopadajícího záření. Transmitance (T) vyjadřuje poměr intenzity záření, které prošlo zkoumaným materiálem, k intenzitě záření zdroje. Absorbance (A) je definována jako dekadický logaritmus  $1/T$ . V případě, že je zkoumaným materiálem pohlceno 100 % záření, je transmitance nulová. Klasická infračervená spektroskopie nedovoluje analýzu silně absorbujících matric. Analýzy pevných vzorků byly omezeny pouze na práškové materiály. Postupem času ale byla vyvinuta metoda Infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FT-IR), která měří interferogram modulovaného svazku záření po průchodu vzorkem. Pro tuto metodu je vyžadována matematická metoda Fourierova transformace, která umožňuje zobrazit klasický spektrální záznam. Na rozdíl od klasické metody, umožňuje FT-IR sledovat všechny frekvence najednou, což výrazně zrychluje provedení analýzy. Měření je prováděno spektrometry, které lze rozdělit do dvou skupin: disperzní a nedisperzní (FT-IR). [14, 61]

Infračervené spektroskopické metody jsou využívány především k analýze polymerních elektroizolačních materiálů. Lze určit koncentraci nečistot, antioxidantů, aditiv, emulgátorů, plnidel a jiných látek. Je možné také sledovat vulkanizační, polymerační, degradační procesy a vliv okolního prostředí na materiál (teplota, tlak, záření, deformace, vlhkost aj.). Při použití v kombinaci s termickými analýzami lze například analyzovat plynné produkty, které vznikají v průběhu tepelného rozpadu izolantů. [14]

## 5 Laboratoře

Závěrečná kapitola je věnována návrhu diagnostických laboratoří a souvisejících administrativních a technických místností – kanceláře, sklad, místnost pro přípravu vzorků. Laboratoře jsou vždy navrženy s ohledem na specializovaný obor prováděných zkoušek – elektrické, mechanické a strukturální. V laboratořích je brán zřetel na všechny podstatné aspekty, zejména pak na přítomnost potřebných přístrojů, jejich rozložení v místnosti a rozměry. Při návrhu jsem se snažil zimplementovat i metody průmyslového řízení, pomocí kterých lze dosáhnout zlepšení procesů v laboratořích a tím snížit potřebný čas na provedení zkoušek, omezit množství spotřebovaných vzorků a samozřejmě snížit nákladnost prováděných zkoušek.

### 5.1 Všeobecné požadavky

Norma ČSN EN ISO/IEC 17025 „Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří“ stanovuje všeobecné požadavky, které jsou kladeny na způsobilost laboratoří provádět zkoušky, kalibrace a vzorkování. Touto normou se řídí všechny laboratoře bez ohledu na počet pracovníků nebo rozsah prováděných zkoušek a kalibrací. Použitím této normy se usnadňuje komunikace mezi laboratořemi a jinými orgány. Po dohodě mezinárodních organizací ISO, ILAC, IAF byla stanovena úmluva, že pokud laboratoře splní požadavky dané normou ČSN EN ISO/IEC 17025 získá dle této úmluvy nárok na akreditaci laboratoře a zároveň splňuje i požadavky na systém managementu dle ISO 9001. Kvalita výstupních služeb je nezbytná pro správný chod laboratoří a je garantována zavedením systému managementu kvality podle souboru norem ISO 9000. Tyto normy patří k celosvětově uznávaným standardům v oblasti řízení kvality. Z tohoto souboru lze zmínit například ISO 9001:2008 „Systémy managementu jakosti“. Dále norma ČSN EN ISO 10013:2002 se zabývá dokumentací, ISO 10012:2003 požadavky na procesy měření a měřící zařízení a norma ČSN ISO 10017:2004 je návodem k aplikaci statistických metod. Akreditací splňuje laboratoř požadavky pro provádění činností – zkoušky, kalibrace, inspekce. Akreditace se v České republice uděluje Českým institutem pro akreditaci, který vydává osvědčení pro zkušební laboratoř, čímž je laboratoř oprávněná provádět určité zkoušky nebo určité druhy zkoušek. Akreditací se kladou požadavky na management, systém jakosti, řízení dokumentů, služby zákazníkům, řízení neshod a opatření k jejich nápravě, záznamy, interní audity aj. Dále je kladen důraz na technické požadavky – pracovníky, prostory, zkušební a kalibrační metody, zařízení,



návaznosti měření, kalibraci či protokoly. [62]

Všechny laboratoře jsou povinné dodržovat postupy pro řízení dokumentů – předpisy, normy, zkušební a kalibrační metody, výkresy, software, návody a příručky. Tyto dokumenty mohou být ukládány na všechny druhy médií v podobě digitální, analogové, fotografické nebo písemné. Každý dokument by měl být řádně označen a měl by splňovat podmínku nezaměnitelnosti. Veškeré změny v dokumentaci musí být schváleny odpovědnou osobou a odpovídat předem stanovenému postupu řízení změn v dokumentech. V neposlední řadě je důležité, aby veškeré dokumenty byly k dispozici po normou stanovenou dobu. [62, 63]

Správnost a spolehlivost prováděných zkoušek nebo kalibrací je zaručena následujícími faktory:

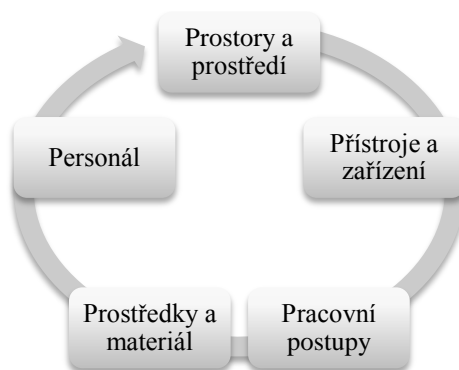
- lidské faktory,
- podmínky prostorů a prostředí,
- zařízením,
- vzorkováním,
- zkušebními a kalibračními metodami a validací metod,
- návazností měření,
- zacházení se zkušebními a kalibračními položkami.

Vliv jednotlivých faktorů se liší pro různé laboratoře. Závisí totiž na druhu prováděných zkoušek či kalibrací. Je důležité, aby jednotlivé laboratoře braly v úvahu tyto faktory při vývoji metod a postupů, výcviku a kvalifikaci osob a při výběru zařízení. Všechny osoby, které pracují v laboratoři, musí být způsobilé a dostatečně kvalifikované. Pro každého pracovníka jsou stanoveny odpovědnosti, kterými je povinný se řídit. Osoby pracující v laboratoři lze rozdělit do tří skupin: řídicí, technické a podpůrné. Každá laboratoř si musí určit vedoucího pracovníka, zástupce vedoucího, zkušební techniky, případně manažera kvality. Je možné, aby více funkcí vykonávala jedna pověřená osoba. Je nutné také zajistit pro správné provedení zkoušek vhodné prostory a podmínky prostředí. Vlivem těchto podmínek nesmí docházet k ovlivňování výsledků zkoušek. Pro každou laboratoř jsou definovány postupy a metody pro všechny druhy zkoušky nebo kalibrace: zejména vzorkování, manipulace, přeprava, skladování, příprava položek a samotné měřicí zkoušky. Každá laboratoř je vybavena potřebnými zařízeními pro všechny části zkušebního procesu (příprava, analýza, vyhodnocení). Všechna tato zařízení smějí obsluhovat pouze oprávněné osoby. Zařízení, u kterých je vyžadována

kalibrace, musí být označena kalibračním štítkem se všemi potřebnými údaji. Každá laboratoř má zavedeny přesné postupy pro kalibraci svých přístrojů. Výsledky zkoušek a kalibrací jsou uváděny v protokolech o zkouškách, v kalibračním listu nebo certifikátu. Každý protokol, list, certifikát obsahuje normou stanovené údaje (například: název, název laboratoře, adresa laboratoře, název zákazníka a jeho adresa, použité metody, popis, datum přijetí materiálu, podmínky, při kterých byly zkoušky prováděny, datum provedení zkoušek, výsledky, podpis a jméno osoby, která prováděla zkoušky aj.). Správnost výsledků je zajištěna několika aspekty: zkoušením odpovídajícím zařízením, vhodnými prostory a podmínkami, zkouškami vykonávanými kvalifikovanými pracovníky a použitím platných zkušebních metod. [62, 63]

## 5.2 Aplikace metod průmyslového inženýrství (PI)

Aplikací metod průmyslového inženýrství lze zefektivnit jednotlivé procesy a chod celé laboratoře. Tyto metody kombinují poznatky z technických oborů a oborů z podnikového řízení. Hlavním úkolem zavedení metod průmyslového inženýrství je odstranění plýtvání v laboratořích - snížení potřebných časů na provádění zkoušek, snížení potřebného počtu vzorků aj. Jednotlivé metody lze aplikovat na klíčové prvky v laboratoři.



Obr. 23: Klíčové prvky laboratoře

Zaměřením na jednotlivé prvky lze zlepšit chod celé laboratoře. Od vedoucích pracovníků se očekává neustálá tendence ke zvyšování efektivity využití celé laboratoře. K tomu využívají různých metod plánování a řízení kvality. Ale pro většinu metod průmyslového inženýrství je důležité zapojení všech pracovníků v laboratoři. Neustálým osvojováním nových vědeckých a technických poznatků ve svém oboru zvyšují pracovníci úroveň poskytovaných služeb laboratoře. Přístroje a zařízení musí vždy odpovídat požadavkům stanoveným normou. Je důležité provádět pravidelnou údržbu dle plánu, tak aby byla vždy zajištěna správnost měření. Metodou tzv. nekonečného zlepšování lze docílit odstranění plýtvání až na hodnoty možného minima. To znamená, že výsledek jednoho zlepšení

je vstupním bodem pro další zlepšování. [67]

Každý proces zlepšování je charakteristický jednotlivými fázemi. Nejprve je nutné definovat důvod pro zlepšování, kdy je stanoven problém a navrhne se základní rozsah změn. Následuje měření, kterým se určí efektivnost stávajícího a procesu po zlepšení. Analyzují se tato data a podle výsledků jsou navrženy metody vedoucí ke zlepšení. Pomocí těchto metod se odstraní stávající problémy a následně je důležité, aby došlo ke standardizaci nových procesů v laboratoři. Tímto zlepšovacím procesem se zefektivní chod celé laboratoře. Ke zlepšení může dojít dvěma způsoby:

- radikálně – reengineering, radikální rekonstrukce procesů, layoutu aj. (krátkodobé),
- kontinuálně – postupné zlepšování (dlouhodobé), Kaizen, Lean Management.

### 5.2.1 Základní pojmy PI

Před samotnou aplikací metod průmyslového inženýrství (PI) do návrhu layoutu laboratoří je nutné si definovat některé základní pojmy PI.

#### Průmyslové inženýrství

Podle [64] je průmyslové inženýrství „*interdisciplinární obor, který se zabývá projektováním, zaváděním a zlepšováním integrovaných systémů lidí, strojů, materiálů a energií s cílem dosáhnout co nejvyšší produktivity*“. Průmyslové inženýrství nabízí řadu metod, kterými lze zlepšit produktivitu, snižovat náklady, zlepšovat procesy či snižovat čas potřebný na provedení zkoušek. Přístup průmyslového inženýrství, s jakým se lze dnes setkat, můžeme rozdělit na klasický a moderní. Klasický přístup používá metody matematické statistiky, MTM aj. Moderní metody jsou například TPM, poka-yoke, vizuální management, 5S aj.

#### Proces

Proces lze definovat jako soubor činností, které přeměňují vstupy na výstupy. Tyto vzájemně navazující a opakující se činnosti spotřebovávají lidské, materiální, informační, finanční vstupy a vytvářejí právě výstupy, které mají přidanou hodnotu. Procesy lze dělit dle normy ISO 9001:2000 na řídicí, procesy přípravy zdrojů, procesy realizace produktů, procesy dalšího rozvoje. Znamějšší je ale dělení na procesy hlavní, řídicí a podpůrné. Řídicími procesy se řídí činnosti napříč celou organizací. Hlavní procesy slouží k naplňování cílů, strategie chodu laboratoří a vytváří přidanou hodnotu. A podpůrné

procesy jsou důležité jako podpora hlavních procesů.



Obr. 24: Základní schéma procesu analýzy vzorku

### **Procesní tok**

Dle [65] je procesní tok: „*Sled kroků (činností, událostí nebo interakcí), který představuje postupně rozvíjející se proces, zapojuje do spolupráce alespoň dvě osoby a vytváří určitou hodnotu pro zákazníka, jemuž má sloužit, nebo příspěvek pro podnik, v němž se uskutečňuje*“.

### **Činnost**

Dle [66] je činnost definována jako základní kámen procesu: „*Proces se skládá ze součinnosti činností, kdy činnost je určitý sled pracovních úkonů. Je přesně stanovena spolupráce a návaznost činností*“.

Příklady činností: zpracování nabídky, příprava vzorků, kondicionování vzorků, analýza, vyhodnocení vystavení protokolu aj.

### **Plýtvání**

Plýtváním lze nazvat všechny formy činností, které nepřidávají přidanou hodnotu. Jedná se o formu ztrát, která vede k neefektivnímu a neekonomickému chodu organizace, a proto je vždy nežádoucí. Pomocí metod průmyslového inženýrství a zapojení všech zúčastněných osob se plýtvání omezí nebo někdy dokonce podaří zcela odstranit. Do jisté míry se různé formy plýtvání vyskytují v každé laboratoři. [66]

Formy plýtvání v laboratořích:

- čekání – na zařízení, vzorek, zkušebnu, informace, prostoje,
- skladování – nadbytečné skladování vzorků, dokumentů, starých zařízení,
- doprava – nadbytečná manipulace, přeprava,
- nadbytečné zpracování – provádění zkoušek nad dohodnutý rozsah,
- nadprodukce – nadbytečný sběr údajů, tvorba některých dokumentů,
- nadbytečný pohyb pracovníků laboratoře,
- chybovost – nepřesnost měření, malá přesnost, která vede k novému měření,
- nevyužitý potenciál a znalosti pracovníků laboratoře.

## **Layout**

Layoutem rozumíme optimální rozložení potřebného vybavení pro provádění zkoušek v prostoru. Vždy je snaha co nejlépe využít prostor, vybavení i pracovníky. Zároveň je nutné pro všechny pracovníky zajistit rychlý a plynulý tok informací a bezpečnost pracovního prostředí.

### **5.2.2 Metody PI**

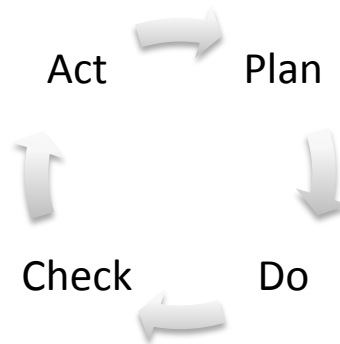
Pro laboratoř jako nevýrobní organizaci poskytující služby se nehodí všechny metody průmyslového inženýrství, proto jsem vybral jen ty, které dle mého názoru se pro návrh a chod laboratoře dají aplikovat nejlépe: Kaizen, Poka-Yoke, TPM, 5S, Lean Management, vizuální management. Vždy je snaha odstranit plýtvání a vytvořit tím štíhlou organizaci. Štíhlost si lze představit v rychlosti reakce na požadavek zadaný zákazníkem, nebo v rychlosti celého procesu od začátku do konce. To, co se děje v průběhu, lze ovlivnit právě odstraněním jednotlivých forem plýtvání, a tak zrychlit celý proces. Metodou, pomocí které lze identifikovat plýtvání, je například VSM (mapování hodnotového toku). Optimalizace se provádí v hlavních, podpůrných i v řídicích procesech. Často je využívána i metoda Six Sigma, která je považována za další metodu neustálého zlepšování procesů. Six Sigma se snaží identifikovat a odstranit chyby v procesech pomocí metodik DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), CTQ (Critical To Quality), CDOC (Conceptualize, Design, Optimize, Control) aj. [67]

Stát se „štíhlou“ organizací je dnes cílem téměř každé zkušebny či laboratoře po celém světě. Zavádí se tzv. Lean Management, kdy je snaha laboratoře uspokojit jen ty potřeby zákazníka, které jsou vyžadovány. Existuje mnoho nástrojů, technik nebo metod, které jsou používány pro dosažení stanovených cílů. Příkladem jsou metody 5S, Kaizen, vizuální management, TPM (Total Productive Maintenance), VSM (Value Stream Mapping) aj. Často se používá více metod najednou, aby bylo dosaženo optimálních výsledků. Zároveň je těžké specifikovat, kam která metoda patří, protože dochází k jejich vzájemnému prolínání

#### **5.2.2.1 Kaizen**

Jedna z nejdůležitějších metod (spíše filozofií) je Kaizen, kterou lze aplikovat. Pochází z Japonska a je založena na postupném zlepšování procesů. Využívá se nejen ve výrobní sféře, ale i v té nevýrobní. Proto je vhodná pro optimalizaci procesů v laboratoři. Pomocí této metody lze ušetřit potřebný čas na provedení analýz, náklady nebo počet vzorků

potřebných na správné provedení zkoušky, ale zároveň lze zlepšit komunikaci napříč celou hierarchií. Podstatou této metody je odstranění plýtvání a upozorňovat na problémy, proto je vhodné ji použít i v administrativě i ve zkušebních procesech v laboratorních komplexech. Důležité je, aby se zapojili všichni pracovníci včetně vedení. Při procesu neustálého zlepšování lze využít univerzální Demingův cyklus PDCA, který vychází ze slov Plan-Do-Check-Act. Nejprve se stanoví plán, shromáždí data a navrhne řešení, následně se zrealizuje zamýšlené řešení a ověří. Zhodnotí se výsledky, a pokud je dosaženo cíleného stavu, vypracuje se konečné řešení, tak aby bylo možné použít námi navržené řešení v praxi.



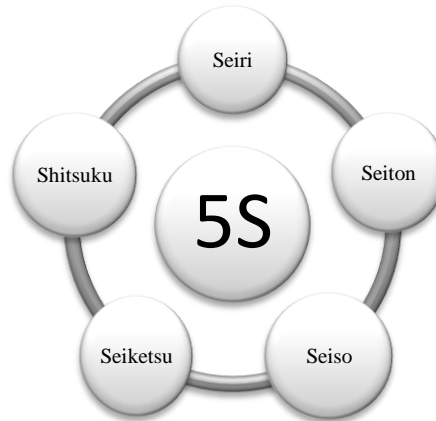
Obr. 25: Demingův cyklus PDCA

#### 5.2.2.2 Metoda 5S

Další důležitou metodou je 5S. Někdy je řazena do metod Kaizenu, někdy obecně k Lean Managementu. Název vychází z pěti základních pravidel:

- Seiri (eliminace nepotřebného) – V prvním kroku je snaha oddělit položky, které jsou nepotřebné nebo nadbytečné, případně nepřidávají přidanou hodnotu či jen budou přemístěny. Takové objekty/položky lze na pracovišti označit červenou kartičkou.
- Seiton (systematizace) – V druhém kroku se přesunou nebo odstraní položky z prvního kroku. Uspořádají se dle zakresleného layoutu, aby se eliminovalo plýtvání. U skříněk, zásuvek a regálů se vytvoří soupis položek náradí a vybavení.
- Seiso (úklid) – Třetí krok je věnovaný úklidu pracoviště, kdy se definuje co, kdy a kde bude vyčištěno, případně kdo čištění vykoná. Pro tento krok se využívá předem nadefinovaných formulářů.
- Seiketsu (standardizace) – V tomto kroku se standardizují první tři kroky, je zachycen vizuální standart pracoviště – layout, čištění.

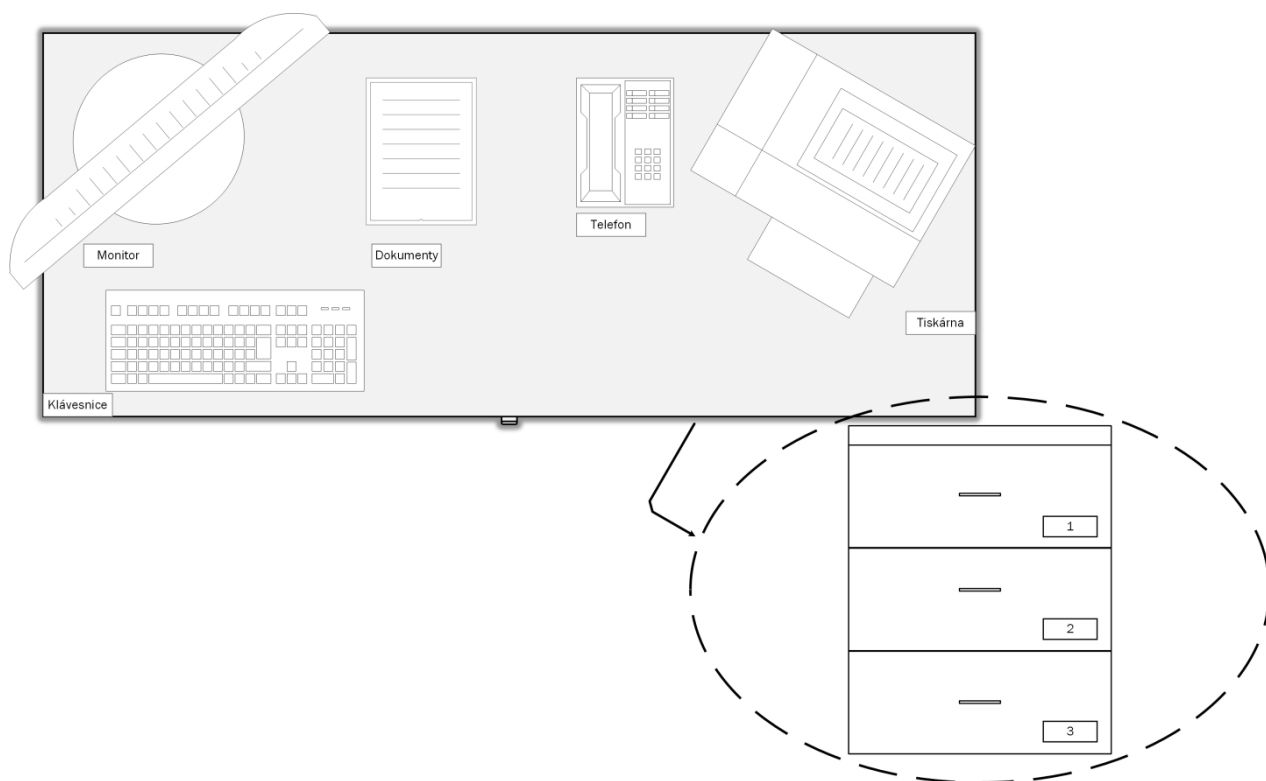
- Shitsuku (stálé zlepšování) - Je důležité, aby se dodržovaly standardy pracoviště všemi zúčastněnými.
- Dnes se někdy do této metody zařazuje i šesté „eS“, a to bezpečnost. Nesmí docházet k ohrožení pracovníků.



Obr. 26: Metoda 5S

Jedná se o souhrn základních kroků pro eliminaci plýtvání na pracovišti. Metoda 5S se často implementuje jako první. Pomocí ní dochází k vizualizaci a redukci plýtvání, kdy chyby se řeší pomocí metod Poka-Yoke (vyhnutí se neúmyslnému pochybení) nebo vizuálního managementu. Layout pracoviště, umístění zásob, zjednodušení toku informací a materiálu jsou body, které lze výrazně ovlivnit a tím zlepšit efektivitu celého laboratorního komplexu. [68]

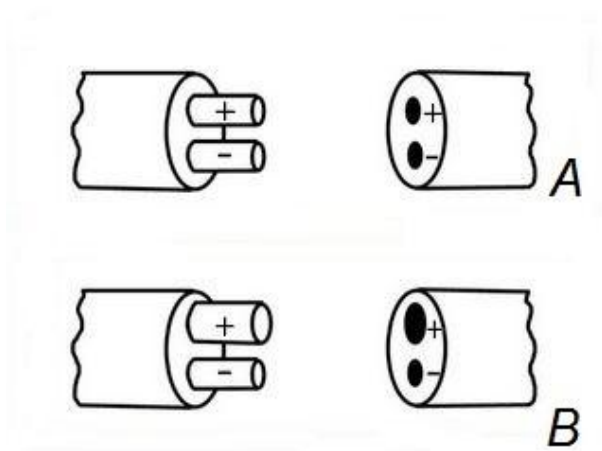
Přínosy metody 5S lze definovat do několika bodů: snížení pracovního prostoru o 20 – 40 %, snížení zásob na pracovišti až o 80 %, zlepšení kvality o 10 – 20 %, zkrácení času na hledání o 50 %, zkrácení času náběhu o 10 – 15 %, zlepšení podnikové kultury aj. Tato metoda je vzata v úvahu při návrhu rozvržení laboratoří a administrativních místností v závěrečné části této práce. Na následujícím obrázku je znázorněna metoda 5S na pracovním stole. Předměty na stole byly protříděny, uklizeny a zaveden standard pomocí štítků. Podobný princip lze zavést v jakékoliv laboratoři pro všechna zařízení a vybavení laboratoře. [68]



Obr. 27: Aplikace metody 5S na pracovním stole

### 5.2.2.3 Poka-Yoke

Metodou Poka-Yoke zabráňujeme vzniku neúmyslných chyb. Název vychází z japonských slov Poka – chyba a Yokeru – vyhnout se. Tuto metodu lze použít například na zapojení vodičů přístrojů. Poka-Yoke lze tedy neomezeně využívat v laboratořích i administrativních místnostech. Klasickým příkladem je USB konektor. Názorná ukázka je vidět na následujícím obrázku v části B, kde nemůže dojít k záměně vodičů při zapojení přístroje jako v části A.



Obr. 28: Aplikace Poka-Yoke (Na obrázku B je vidět příklad aplikace metody Poka-Yoke) [69]

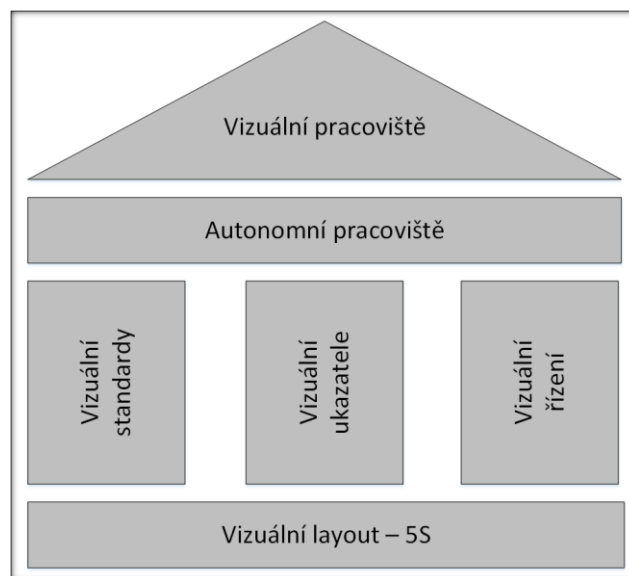


#### 5.2.2.4 Vizualní management

Vizuální management je jedna z metod řešení problémů. Využívá se při zavádění štíhlého podniku, konkrétně například u metody 5S. Vizuální management pomáhá si udělat obrázek o současném stavu pracoviště, o dostupnosti důležitých informací, kvalitě, efektivitě a jiných standardů. Vizuálním management vychází z faktu, že člověk vnímá nejvíce informací očima. Cílem vizuálního managementu je motivovat, řídit, porovnávat, učit a informovat. Pomocí této metody lze zlepšit podporu na pracovišti, zvýšit procesní efektivnost, řešit problémy na pracovišti a zjednodušit a zlepšit komunikaci mezi lidmi napříč celou organizací. Příkladem vizualizace je barevné značení komponentů, značky pro uložení náradí, materiálů, vzorků, obrázkové návody pro měřicí procesy, světelná signalizace (Světelnou signalizaci lze použít například při návrhu laboratoře pro analýzu elektrických vlastností. Správným uzavřením dveří oddělené VN klece se rozsvítí zelené světlo). Vizuální management je v současnosti spojován nejvíce s konceptem vizuálního pracoviště. Jedná se o takové pracoviště, které je jasně uspořádané, řízené, organizované a všechny procesy jsou transparentní. Vizuální pracoviště využívá vizuální prostředky pro odhalení abnormalit procesů a k přijetí standardního postupu při řešení problému. Mezi prvky prostředky patří vizuální standardy, vizuální ukazatele a vizuální řízení. Všechny tyto prostředky lze aplikovat na použití pro laboratoře.

- vizuální standardy - Nástroje, kterými se zvyšuje autonomnost pracovišť. Standard zajišťuje prevenci proti plýtvání, nekvalitě, úrazům, přetěžováním nebo nevyváženosti.
  - standardy práce
  - standardy údržby vybavení
  - standardy provádění akreditace a kalibrace
  - standardy 5S čištění
  - kontrolní plány
  - závěsky, identifikační karty vzorků a štítky zařízení
- vizuální ukazatele – Pomocí vizuálních ukazatelů je zajištěna kontrola nad procesy. Sledujeme parametry jednotlivých procesů, rozvoj pracovišť, řešení problémů.
  - tabule pro vizualizaci výkonů, laboratorní řády, pracovní postupy, soupis vybavení laboratoří, zlepšovací návrhy, stav projektů, plány, dokumentace

- počítačla
- elektronické ukazatele
- světelné a zvukové signály
- systémy abnormalit
- vizuální řízení – Zajišťuje rozpoznání stavu procesů pracovníkem. Pracovník musí být schopný rozpoznat odchylku od standardu procesu, řešit problémy a odstraňovat plýtvání, přetěžování a nevyváženost.
  - standardy vizualizace
  - standardy signálů
  - standardy řízení a organizace [70]



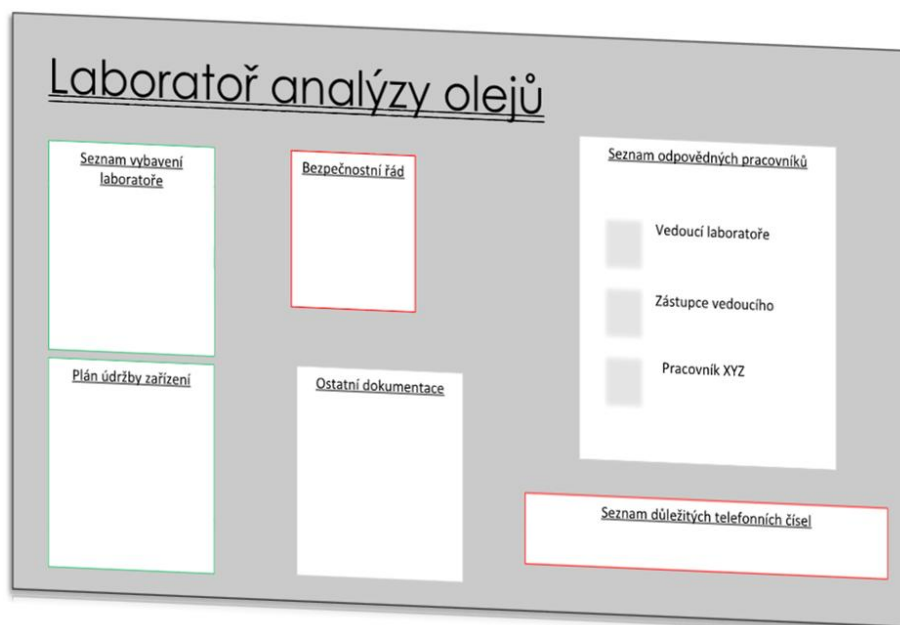
Obr. 29: Koncept vizuálního pracoviště

Z hlediska použití vizualizace v jednotlivých laboratořích je možné definovat barevné stání a označení pro jednotlivé vybavení – měřicí zařízení, nástroje a uložení vzorků. Ve skladu materiálu a vybavení lze označit podle metody 5S podlahy barevnou páskou a odlišit tak místa, kde může být uložen materiál/zařízení a kde musí prostor zůstat volný. Barevnou páskou lze označit i prostory vysokého napětí nebo jinak nebezpečná místa. Barevné označení, které bylo vyvinuto společností Brady Worldwide Inc., je možné stanovit následovně:

- žlutá – uličky, pracovní úseky,
- bílá – zařízení a instalace,
- modrá, zelená, černá – materiál, vzorky,
- oranžová – materiály, vzorky čekající na inspekci,

- červená – poškození, údržba, oprava,
- červenobílá – Oblasti, které je nutné nechat volné z důvodu bezpečnosti.
- černobílá – Oblasti, které musí zůstat z provozních důvodů volné.
- černožlutá – Oblasti, kde mohou být pracovníci vystaveny specifickým fyzickým nebo zdravotním nebezpečím.

Barevné kódování a značení zvyšuje produktivitu, usnadňuje organizaci celého pracovního procesu a zároveň dochází ke zvýšení transparentnosti toku materiálu a práce. Vizuelní tabule lze umístit do společných prostor, laboratorních místností i kanceláří. Například tabule umístěná v některé z laboratoří může obsahovat stručný popis laboratoře, seznam vybavení, odpovědné osoby a kontakty na ně, dokumentaci norem nebo laboratorní řád. Nad nebo u každého přístroje lze umístit seznam jednotlivých úkonů a postupů při měření doplněný ilustracemi, postup řešení při obtížích, provozní dokumentaci, plány údržby, bezpečnostní informace, případně seznam problémů, které nastaly během prováděných zkoušek. Na tabuli v nelaboratorních prostorách lze vyvěsit seznam pracovníků, stav projektů, diagram docházek a dovolených, dokumentace (výroční zprávy, plány, příručky, technická dokumentace) nebo zlepšovací návrhy. Na následujícím obrázku je navržena vizuelní tabule pro laboratoř analýzy olejů, která obsahuje seznam vybavení, pokyny pro údržbu, bezpečnostní řád, prostor pro dokumentaci, seznam odpovědných pracovníků s fotografiemi a seznam důležitých telefonních čísel.



Obr. 30: Návrh tabule pro umístění v laboratoři analýzy olejů

### 5.2.2.5 TPM

Další metodou průmyslového inženýrství, kterou lze aplikovat v laboratořích, ale již nesouvisející s návrhem pracoviště, je TPM – Totálně produktivní údržba. Jedná se o metodu, která zajišťuje dosahování nulových neplánovaných prostojů, nulových ztrát a nulových vad způsobených stavem zařízení. Tato metoda je zaváděna jako součást Lean Managementu. Opět je ale nutné, aby byli zapojeni všichni pracovníci laboratoře. Hlavními aktivitami TPM jsou: program plánované údržby, program autonomní údržby, program celkové efektivity zařízení, program plánování pro nové stroje a jejich součásti, program tréninků a vzdělávání pro pracovníky laboratoří. Výsledky TPM se nedostavují okamžitě, ale prvních kladných výsledků je možné dosáhnout již po šesti měsících. [68, 72]

Údržba patří mezi největší provozní náklady, proto je nutné tyto výdaje nějakým způsobem redukovat. Právě metoda TPM umožňuje uchovat zařízení a vybavení laboratoří v provozuschopném stavu, při zajištění maximální spolehlivosti a kvality prováděných zkoušek. Jednotlivé TPM programy musí být zvoleny podle druhu a specifikace zařízení.

Je důležité, aby odpovědné osoby měly přehled o tom, co se může na zařízení pokazit, jak provádět čištění zařízení, technicky diagnostikovat zařízení, identifikovat a předpovídat dobu životnosti součástí nebo celého zkušebního vybavení. Pro včasné odhalení vznikající poruchy je nastavení intervalu kontrol zcela zásadní. [68, 71]

### 5.3 Prostorové rozvržení pracovišť

Správným návrhem prostorového uspořádání pracovišť lze zvýšit efektivitu celé organizace. Cílem správného uspořádání je, co nejlépe využít prostor, zařízení a pracovníky. Zároveň se dosáhne rychlejšího a plynulejšího toku informací, vzorků a pracovníků. Při navrhování pracoviště je nutné brát ohledy i na pracovníky laboratoře, tak aby pro ně vzniklo bezpečné a případně příjemné pracovní prostředí. Například kancelářský layout je navržen tak, aby byly zajištěny co možná nejhladší toky informací.

V literatuře je často zmiňováno dělení layoutů na tři základní typy: předmětné, technologické a pevné uspořádání. Případně někdy se sestavují kombinovaná uspořádání. Pro oblast laboratorních zkoušek je nejvíce vhodné technologické uspořádání, které je navrženo tak, aby lépe zvládalo různorodost požadavků. Pro tento způsob uspořádání jsou specifická specializovaná pracoviště či stanoviště jednotlivých zkoušek. Vzorky jsou přesunovány od zařízení k zařízení dle potřeby. Nevýhodou u tohoto uspořádání může být náročnost manipulace se vzorky při přesunu mezi jednotlivými pracovišti. Jedná se o jednu z forem plýtvání, ale i tak je toto uspořádání pro laboratorní

procesy nevhodnější. [73]

Při návrhu layoutu se postupuje v následujícím pořadí:

- diagnostika – průzkum, seznámení s projektem,
- sběr informací – nejdůležitější činnost,
- rozbor – zhodnocení informací z různých hledisek (technické, ekonomické aj.),
- návrh – řešení problému s pomocí využití vizualizace,
- realizace – výstavba, vyhodnocení.

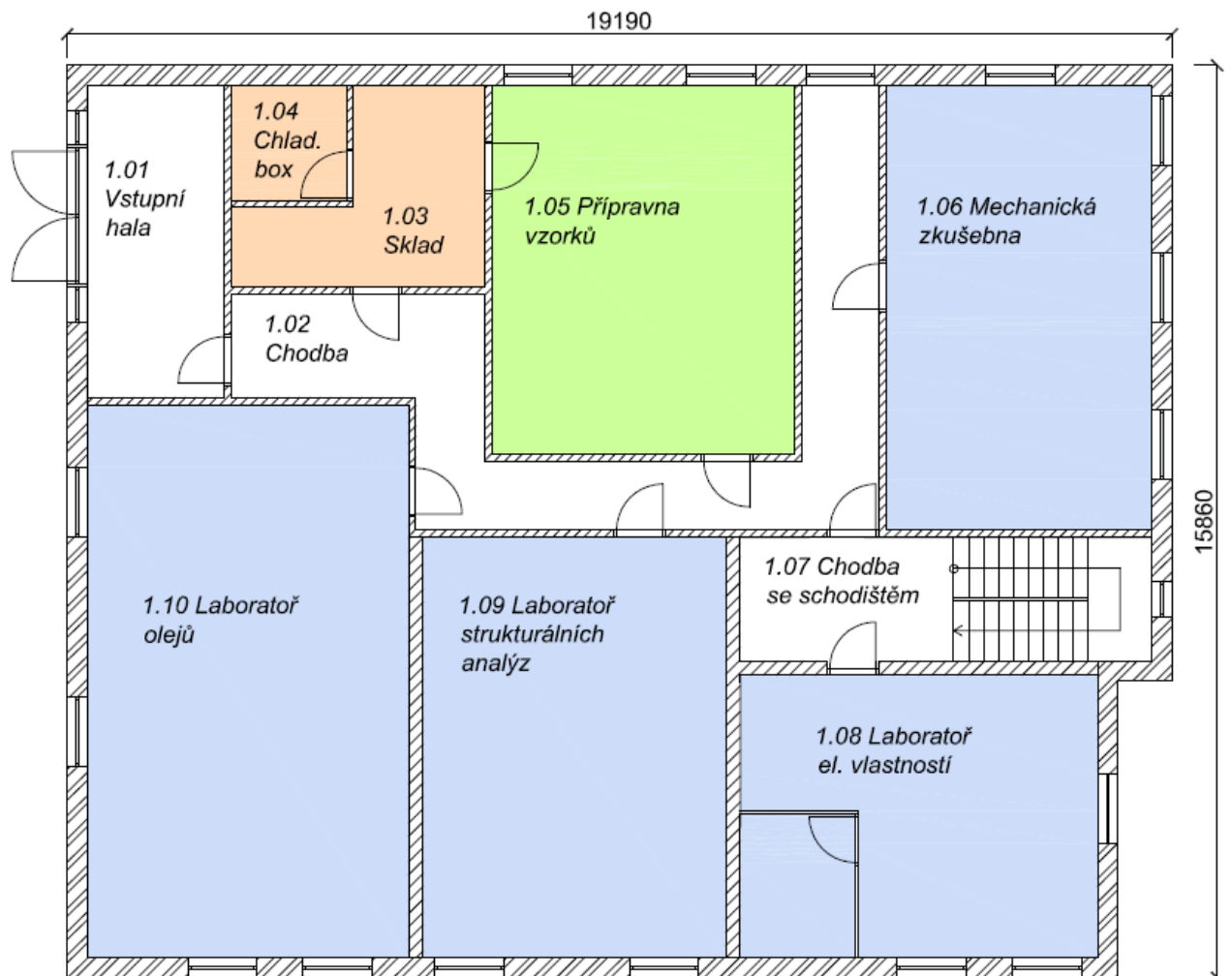
Při návrhu rozložení jednotlivých pracovišť a pracovišť jako celku jsem uvažoval vztahy, vzdálenosti mezi nimi a rozměry jednotlivých přístrojů. Při rozmístování laboratoří a administrativních místností jsem vzal v potaz minimalizaci nutnosti přesunu vzorků při provádění určitého souboru zkoušek, stupeň vzájemného rušení, zajištění dostatečného toku informací a předpokládané požadavky organizace. Mým cílem bylo navrhnout optimalizované rozložení laboratoří a jejich vybavení, které je vhodné pro diagnostikování vlastností kompozitních materiálů. Mnou vytvořený návrh pracovišť je rozdělený na dvě části - patra. První patro je věnováno laboratorním prostorům, přípravě vzorků a skladovacímu prostoru. V druhém patře je administrativní část, která obsahuje dvě kanceláře pro šest pracovníků, kancelář vedoucího pracovníka, zasedací místnost, technické a úklidové místnosti a odpočinkovou místnost s kuchyňkou. Pro komunikaci mezi jednotlivými pracovišti je vhodná metoda DMS (Document Management System), pomocí které se zefektivní workflow jednotlivých procesů. Umožňuje efektivní zpracování a uchování dokumentů po zákonem stanovenou dobu.

S ohledem na potřebné vybavení laboratoří k diagnostikování kompozitních materiálů byla navržena tato pracoviště:

- přípravná vzorků,
- skladovací místnost s chladicím boxem,
- laboratoř olejů,
- laboratoř strukturálních analýz,
- laboratoř elektrických vlastností,
- mechanická zkušebna,
- administrativní a správní prostory.

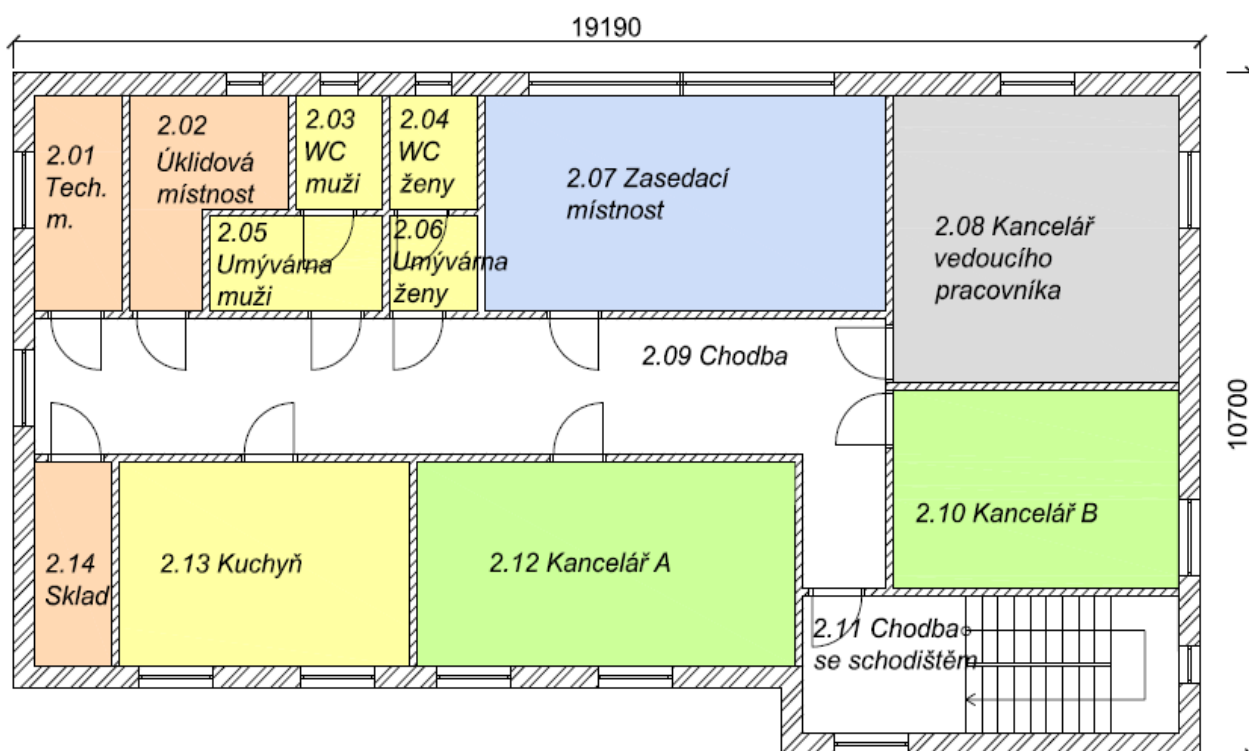
Všechny místnosti v každém patře jsou označeny číslem a barvou pro snazší orientaci v prostoru. Číselné označení je složeno ze dvou částí. První číslice určuje číslo patra a druhá číslice místnosti. Ve všech laboratořích je pro bezpečnost umístěn i hasicí přístroj.

Na obr. 31 je znázorněn layout prvního patra, ve kterém jsou rozloženy všechny laboratoře, přípravná vzorků, skladovací místnost a vstupní hala. Do pomyslného středu byla umístěna přípravná vzorků se skladovací místností, tak aby byl zajištěn optimální tok materiálu a vzorků právě mezi přípravnou a danou laboratoří. Skladovací místnost přímo navazuje na přípravnou vzorků, čímž dochází k urychlení počáteční fáze přípravy vzorků. Nedochozí tak k plýtvání ve formě nadbytečné manipulace a nadbytečného pohybu pracovníků. Uvnitř skladovací místnosti je umístěn chladicí box pro specifické uložení některých vzorků, u kterých by docházelo ke změně vlastností při skladování při běžných podmínkách (Například u vzorků s pryskyřicí dochází za pokojové teploty k vytvrzení.).



Obr. 31: Layout prvního patra

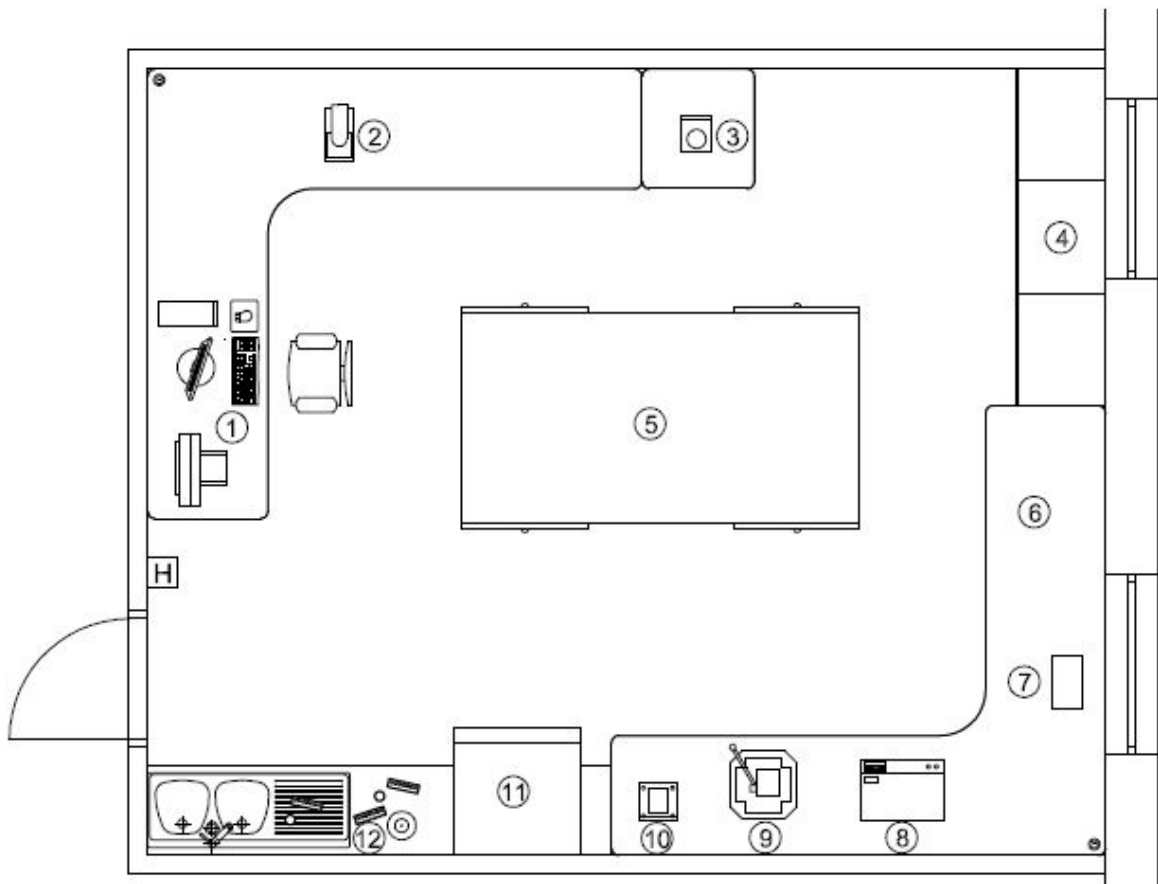
Na obr. 32 je znázorněn layout druhého patra, ve kterém jsou umístěny kancelářské prostory, zasedací místnost a ostatní technické místnosti. Návrh uvažuje dvě kanceláře pro běžné pracovníky laboratoře. Každá je standardizována pro tři pracovníky tak, aby office layout dodržoval všechny podmínky pro zajištění optimálního toku informací. V každé kanceláři jsou také umístěné pomůcky vizuálního managementu. V návrhu je uvažována i kancelář pro vedoucího pracovníka a zasedací místnost pro různé příležitosti (školení, jednání aj.). Dále jsou v layoutu znázorněny technické a skladovací místnosti, toalety s umývárnou a kuchyňka. Jednotlivá patra jsou spojena chodbou se schodištěm 2.11.



Obr. 32: Layout druhého patra

V následující části této kapitoly budou popsány jednotlivé laboratoře z pohledu potřebného vybavení a prostorového rozložení tohoto vybavení v místnostech. Vybavení bylo voleno tak, aby odpovídalo potřebnému zařízení pro provádění zkoušek dle kapitoly č. 4. U všech místností byla uvažována komfortní zóna 75 cm pro volný průchod a práci pracovníků. Veškeré rozměry odpovídají poměru ke skutečným rozměrům zařízení a vybavení od různých světových výrobců (např. TA instruments, Labor machine, Labtech aj.). Symbolika značení přístrojů vychází ze skutečného přibližného půdorysu zařízení.

### 5.3.1 Přípravná vzorků



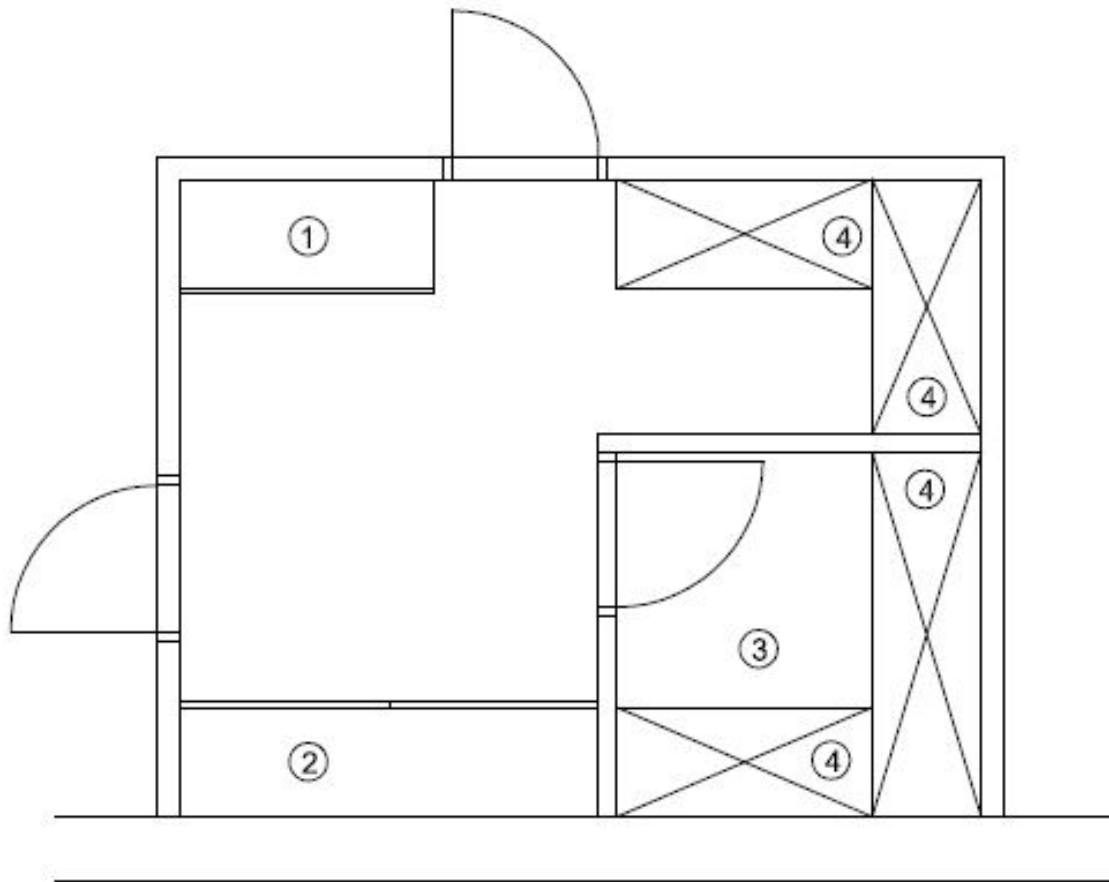
Obr. 33: Přípravná vzorků č. 1.05

#### **Vybavení místnosti:**

- 1 ..... pracovní prostor s PC, tiskárnou a telefonem
- 2 ..... mikroskop
- 3 ..... laboratorní váhy umístěné na váhovém stole
- 4 ..... úložný prostor pro potřebné nářadí a vybavení
- 5 ..... pracovní stůl s úložným prostorem
- 6 ..... prostor pro kondicionování vzorků
- 7 ..... UV vytvrzovací systém
- 8 ..... zařízení pro vysekávání vrubů
- 9 ..... ruční vysekávací lis
- 10 ..... CNC frézka
- 11 ..... klimatická a termostatická komora
- 12 ..... laboratorní nádobí s umyvadlem



### 5.3.2 Skladovací místnost

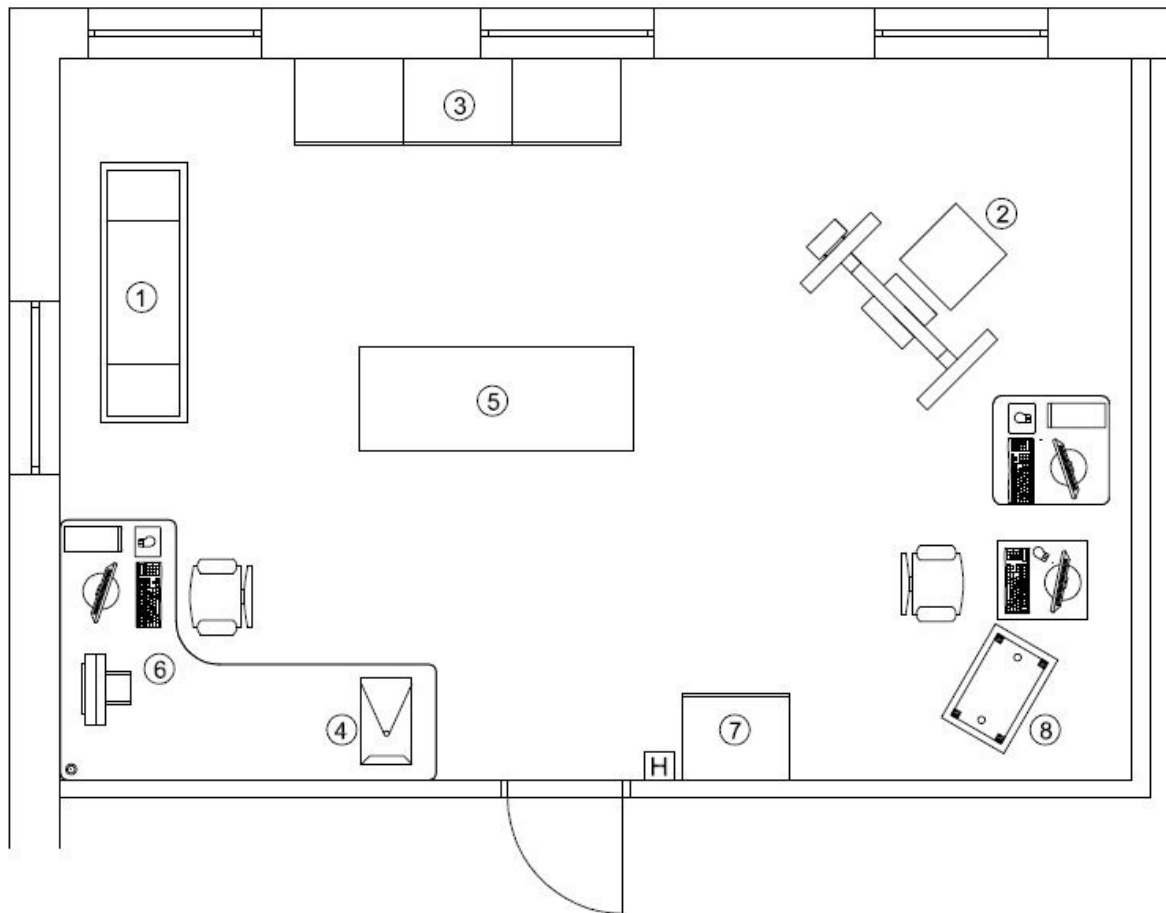


Obr. 34: Sklad č. 1.03 s chladicím boxem č. 1.04

#### **Vybavení místnosti:**

- 1 ..... skříň pro uložení dokumentů
- 2 ..... skříň pro uložení zařízení a potřebných náhradních dílů
- 3 ..... chladicí box
- 4 ..... regálové prostory pro uložení materiálů a vzorků

### 5.3.3 Mechanická zkušebna

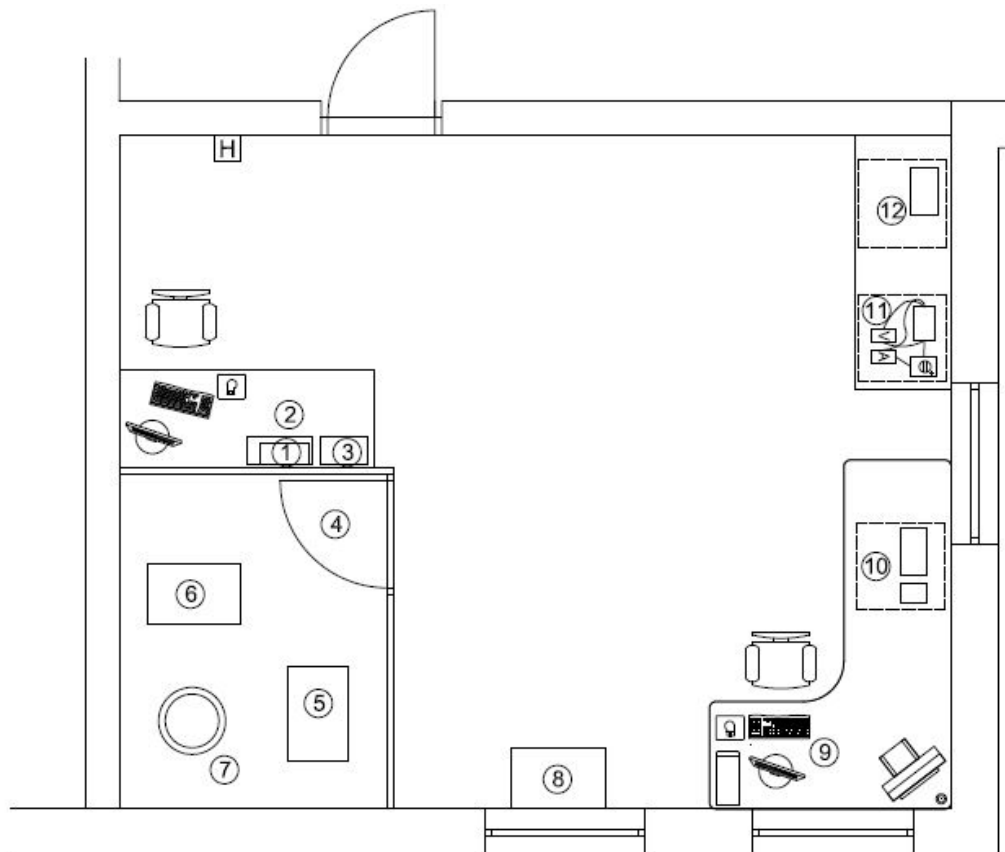


Obr. 35: Mechanická zkušebna č. 1.06

#### Vybavení místnosti:

- 1 ..... Charpyho kladivo
- 2 ..... univerzální zkušební stroj s teplotní komorou
- 3 ..... prostor pro uložení drobného nářadí a přípravků potřebných pro 1 a 2
- 4 ..... univerzální tvrdoměr
- 5 ..... pracovní stůl
- 6 ..... pracovní prostor
- 7 ..... prostor pro uložení nářadí a přípravků pro rezonanční pulsátor
- 8 ..... rezonanční pulsátor

### 5.3.4 Laboratoř elektrických vlastností

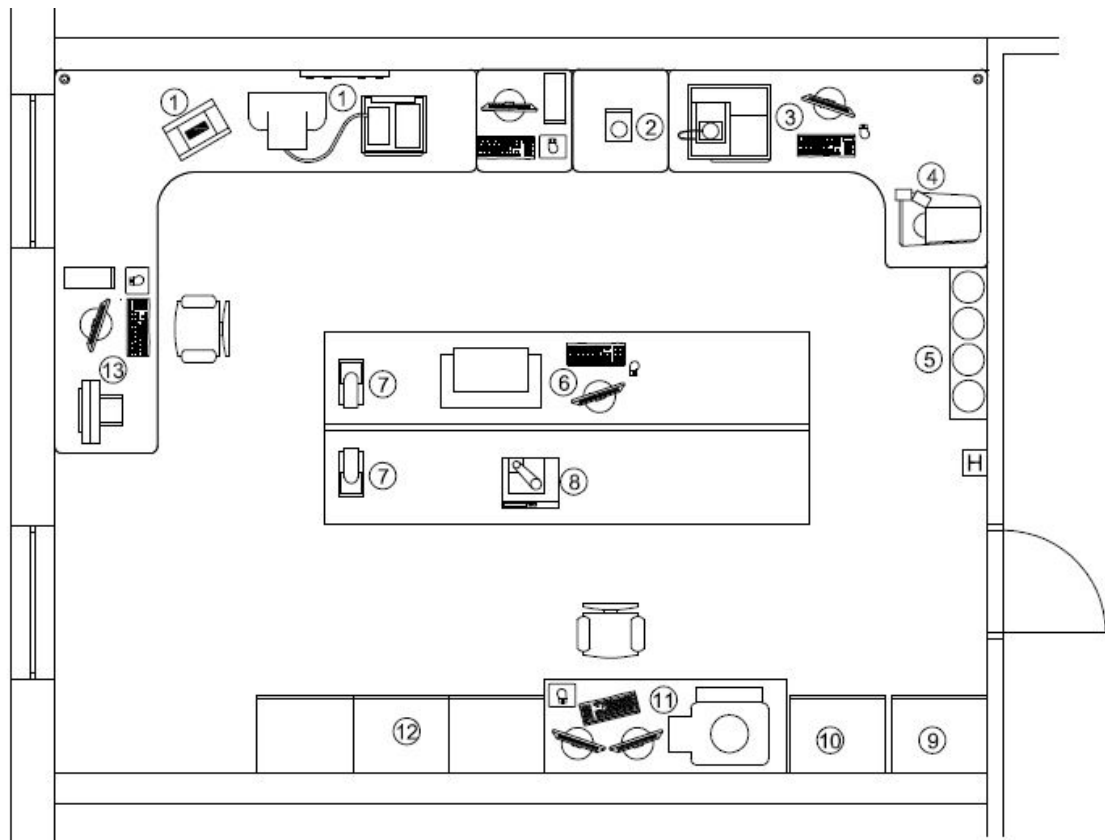


Obr. 36: Laboratoř elektrických vlastností č. 1.08

#### **Vybavení místnosti:**

- 1 ..... Ovládání VN zdroje
- 2 ..... zařízení pro měření dielektrických ztrát na VN části
- 3 ..... zařízení pro detekci částečných výbojů
- 4 ..... oddělená VN část se speciálním systémem zabezpečení
- 5 ..... VN část detekce částečných výbojů
- 6 ..... VN část měření dielektrických ztrát
- 7 ..... zkušební transformátor
- 8 ..... zařízení pro sinusové namáhání
- 9 ..... pracovní prostor s PC a tiskárnou
- 10 ..... pracovní prostor pro měření dielektrických ztrát (automatický můstek)
- 11 ..... pracovní prostor pro měření rezistivity
- 12 ..... pracovní prostor pro měření absorpčních a resorpčních charakteristik

### 5.3.5 Laboratoř strukturálních analýz

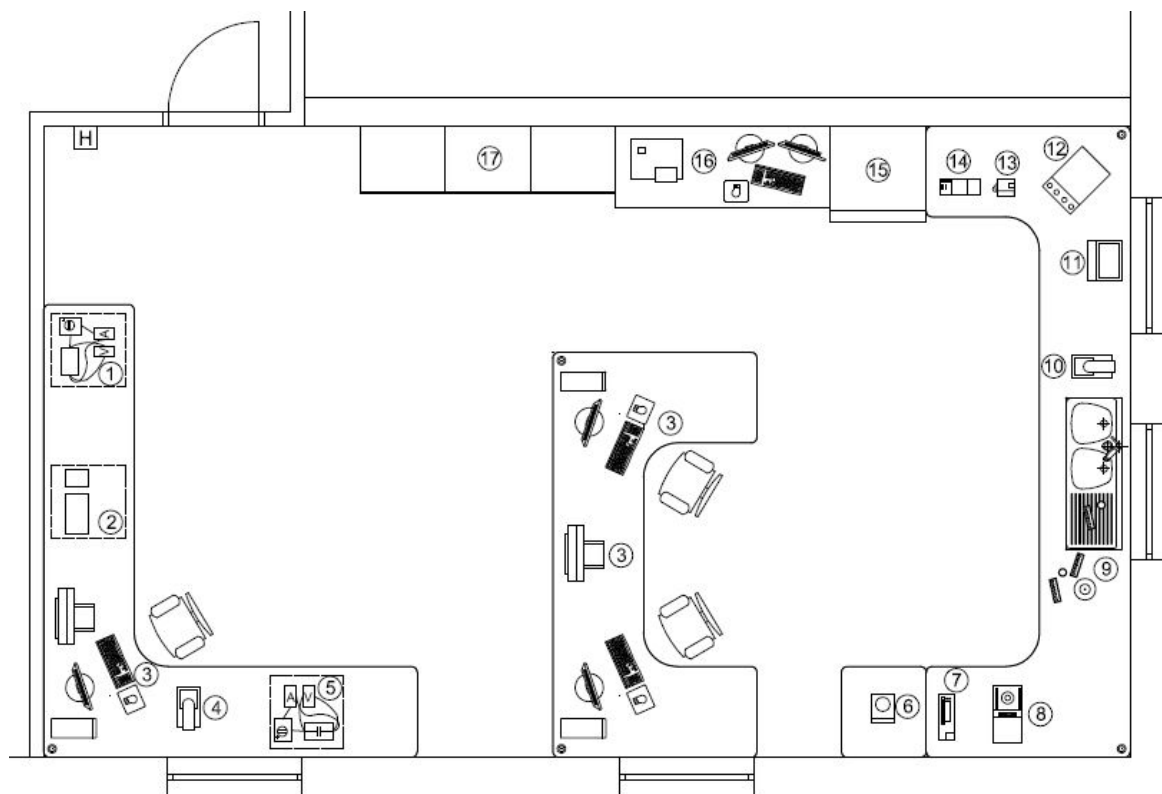


Obr. 37: Laboratoř strukturálních analýz č. 1.09

#### **Vybavení místnosti:**

- 1 ..... STA analýza (DSC+TGA+DTA) s infračerveným spektrometrem s FT
- 2 ..... laboratorní váha na váhovém stole
- 3 ..... TMA analyzátor
- 4 ..... DMA analyzátor
- 5 ..... uložení lahví s technickými plyny
- 6 ..... XRF spektrometr
- 7 ..... mikroskopy
- 8 ..... zkušební zařízení tavenin
- 9 ..... klimatická komora
- 10 ..... komora pro expozici vzorků
- 11 ..... elektronový mikroskop
- 12 ..... úložný prostor pro drobné nářadí, materiálu a vzorků

### 5.3.6 Laboratoř pro měření vlastností olejů



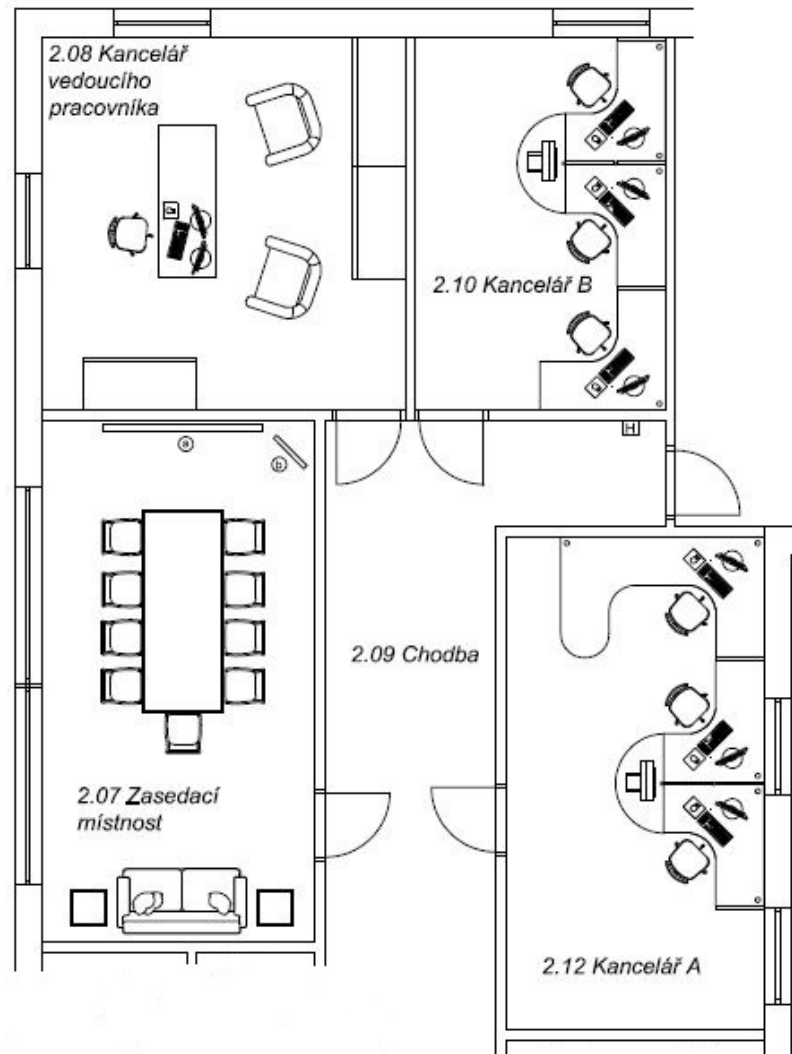
Obr. 38: Laboratoř pro měření vlastností olejů č. 1.10

#### **Vybavení místnosti:**

- 1 ..... pracovní prostor pro měření rezistivity
- 2 ..... pracovní prostor pro měření dielektrických ztrát
- 3 ..... pracovní prostor s PC a tiskárnou
- 4 ..... mikroskop
- 5 ..... pracovní prostor pro měření přeskovového napětí (elektrodový systém)
- 6 ..... laboratorní váhy na váhovém stole
- 7 ..... zařízení pro stanovení bodu tekutosti a zákalu
- 8 ..... analyzátor bodu vzplanutí
- 9 ..... pracovní prostor pro určení kyselosti a mezipovrchového napětí
- 10 ..... mikroskop
- 11 ..... zařízení pro stanovení obsahu vody
- 12 ..... viskozimetr
- 13 ..... hustoměr
- 14 ..... kolorimetr
- 15 ..... testovací komora (klimatické a teplotní testy)
- 16 ..... chromatograf

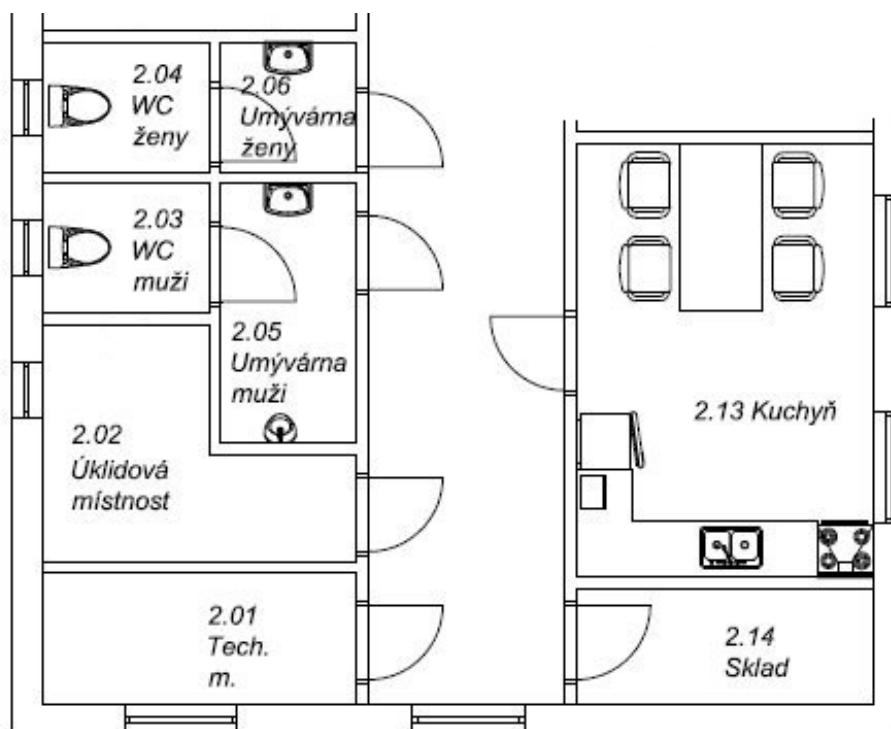
17 ..... úložný prostor pro vybavení, materiál a vzorky

### 5.3.7 Administrativní prostory



Obr. 39: Kancelářské prostory část A

Při návrhu prostorového rozvržení kancelářských prostor jsem uvažoval tzv. oddělené kanceláře, ve kterých je v ideálním případě umístěno 1 až 4 pracovníků. Kanceláře jsou vybaveny pracovními stoly, židlemi, skříněmi, poličkami a výpočetní technikou. Samozřejmou součástí jsou i nezakreslené drobné předměty typu lamp, košů, obrázků, vizuálních tabulí atd. Všechny kanceláře mají zdroj denního světla, který je stanoven dle normy pro kancelářské práce na intenzitu o velikosti přibližně 500 lx. Avšak vždy se volí kombinované osvětlení, aby byl zajištěn zdroj světla za všech podmínek, které mohou nastat. Administrativní prostory obsahují i zasedací místnost, kuchyňku s odpočinkovou částí, toalety s umývárnou a technické místnosti – sklad, úklidová a technická místnost.



Obr. 40: Kancelářské prostory část B

## Závěr

Diplomová práce se zabývá kompozitními materiály používanými v silnoproudé elektrotechnice a diagnostickým systémem, který slouží ke sledování jejich vlastností. Kompozity jsou heterogenní materiály, které nabízejí jedinečnou možnost kombinace vlastností jednotlivých složek. Právě kombinací pozitivních vlastností jednotlivých složek získává kompozit lepší výsledné elektrické, mechanické, tepelné a jiné vlastnosti, které by se u klasického homogenního materiálu získaly jen stěží nebo vůbec. Tento pro kompozity charakteristický jev se nazývá synergický efekt. Popisuje výsledné složení pozitivních vlastností, které je lepší, než by byl poměrný součet vlastností jednotlivých složek.

V práci je popsán vliv jednotlivých složek podle druhu použitého materiálu na výsledné vlastnosti kompozitu. Například na výrobu matric pro elektrotechniku se nejvíce používají silikonové, epoxidové a fenolické pryskyřice. V dnešní době jsou stále častěji nahrazovány levnějšími polyuretanovými nebo polyesterovými pryskyřicemi. Pro vyztužování matric se nejvíce (až 80 %) používají skleněná vlákna. Perspektivní vyztuži jsou materiály na bázi uhlíku, aramidů a tzv. whiskery, které svými vlastnostmi mnohdy převyšují ostatní látky. Jejich nevýhodou je ale vysoká cena a obtížnější zpracovatelnost. Plniva jsou často do kompozitu přidávána pouze za účelem snížení ceny materiálu. V případě, že jsou použita tzv. funkční plniva, dochází k ovlivňování fyzikálních vlastností. Pro elektroizolační účely jsou nejvýznamnější plniva na bázi slídy ve formě slídového papíru.

V dnešní době nacházejí kompozity široké možnosti uplatnění nejen v silnoproudé elektrotechnice, ale i v jiných průmyslových odvětvích. Nejčastěji jsou v elektrotechnice používány v elektroizolačních systémech elektrických strojů, na výrobu izolátorů, krytů elektrických zařízení a konstrukčních prvků. Dále jsou dnes nahrazována klasická vedení kompozitními pro zvýšení přenosové kapacity. Jedná se o ACCR a ACCC lana, která disponují vyšší pevností a zatížitelností. Věřím, že kompozity budou nacházet své uplatnění mnohem častěji, protože se neustále pracuje na vývoji těchto materiálů a již dnes vznikají velmi perspektivní nanokompozitní materiály, které disponují ještě lepšími vlastnostmi. Některých vlastností, kterých se dosahuje u nanokompozitů, nelze totiž u běžných kompozitů vůbec nebo jen stěží dosáhnout.

Aby bylo možné stanovit vlastnosti kompozitního materiálu, je nutné určit vhodný diagnostický systém. Často jsou ale materiály vystavovány vlivu okolního prostředí, proto řada zkoušek probíhá za uměle zhoršených podmínek. Pro určení mechanických



vlastností je vybrán soubor metod, který obsahuje zkoušky tahem, ohybem, rázem, chvěním a zkoušky tvrdosti. Jelikož v elektrotechnice nacházejí kompozity své uplatnění především jako elektroizolační materiály, sledují se například tyto elektrické parametry: absorpční a resorpční charakteristiky, dielektrické ztráty, detekce částečných výbojů nebo elektrické pevnosti. Použití strukturálních analýz v elektrotechnologii nemá takovou historii jako ostatní zkoušky, ale dnes již patří k hojně využívaným metodám, které umožňují sledování dějů v diagnostikovaném materiálu. V práci jsou zmiňovány zejména termické analýzy, kterými lze určit například entalpii, stupeň zestárnutí, teplotu tavení, skelného přechodu, teplotu tepelného rozkladu a mnoho dalších parametrů, které pomáhají popsat stav materiálu. Velmi moderní metodou je STA, simultánní metoda, která kombinuje termickou analýzu DTA, termogravimetrii TGA a skenovací kalorimetrii DSC. Někdy je spojována ještě s infračerveným spektrometrem s Fourierovou transformací. Tato kombinovaná zkouška je velmi komplexní a poskytuje ucelený obraz o stavu materiálu.

Závěr této práce je věnován návrhu prostorového rozložení laboratoří a přilehlých administrativních a technických místností. Při návrhu rozložení jednotlivých pracovišť a rozložení všech místností jako celku jsou uvažovány vzájemné vztahy, vzdálenosti mezi nimi a rozměry jednotlivých přístrojů. Navržené laboratoře respektují potřebné zařízení pro stanovený diagnostický systém kompozitních materiálů. Aplikací metod průmyslového inženýrství dochází k minimalizaci plýtvání a zajištění optimálního toku materiálu a informací. Nejvhodnější metody pochází z filozofie Lean Managementu a Kaizen. V návrhu je nejvíce uplatněna metoda 5S, pomocí níž dochází k redukci plýtvání, kdy se chyby řeší pomocí metod Poka-Yoke nebo vizuálního managementu.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s.
- [2] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1987, 294 s.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [4] DEFENSE, United States. Dept. of. *Composite materials handbook. materials usage, design, and analysis*. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Defense, 2002. ISBN 978-159-1245-087.
- [5] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [6] MILTON, Graeme Walter. *The theory of composites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, xxviii, 719 s. ISBN 05-217-8125-6.
- [7] LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, 200 s. ISBN: 978-80-7043-689-9
- [8] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [9] SKÁLOVÁ, Jana. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 231 s. ISBN 80-708-2501-4.
- [10] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály. In: *Kompozitní materiály* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf)
- [11] Uhlík: Kompozitní materiály. LITOMYSKÝ. *Železniční modely* [online]. 2014 [cit. 2014-11-5]. Dostupné z: <http://www.litomysky.cz/mat/c.htm>
- [12] Kompozitní materiály. In: *Kompozitní materiály* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2014 [cit. 2014-11-5]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [13] Vlastnosti kompozitních materiálů. *Altima Bohemia s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2014-11-5]. Dostupné z: <http://www.altimaboheemia.cz/vlastnosti-kompozitnich-materialu.html>
- [14] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [15] *ISOMA: Kompozity pro elektrickou a tepelnou izolaci* [online]. 2014 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.isoma.cz/>
- [16] KOŘÍNEK, Zdeňek. *Kompozity* [online]. 2014 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [17] Composite Materials. *Princeton University* [online]. 2014, November 20, 2014 [cit. 2014-11-5]. Dostupné z: [https://www.princeton.edu/~humcomp/bikes/design/desi\\_30.htm](https://www.princeton.edu/~humcomp/bikes/design/desi_30.htm)
- [18] CHAWLA, Krishan Kumar. *Composite materials science and engineering*. 3rd ed. New York: Springer, 2012. ISBN 978-038-7743-653.
- [19] Youngův modul pružnosti. *WikiSkripta* [online]. 2014 [cit. 2014-11-7]. Dostupné z: [http://www.wikiskripta.eu/index.php/Young%C5%AFv\\_modul\\_pru%C5%BEnosti](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Young%C5%AFv_modul_pru%C5%BEnosti)
- [20] Elektroizolanty, tvrzené plasty a vybrané termoplasty. *ARCO technik* [online]. 2014 [cit. 2014-11-28]. Dostupné z:

- <http://www.arco.cz/hp2061pfc201tvrzenypapirkartitpentinaxgumoid>
- [21] *Elektroizolanty.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-11-28]. Dostupné z: <http://www.elektroizolanty.cz>
- [22] Textit J. *HUPL CZ* [online]. 2010 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.hupl.cz/elektroizolanty-izolacni-desky-textit-hgw-2082.php>
- [23] Sklotextit (Gumoid). *Hansanet* [online]. 2014 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.hansanet.cz/oddeleni/108/Sklotextit-%28Gumoid%29---tvrzena-skelna-tkanina.aspx>
- [24] Lignostone, tvrzené bukové dřevo DIN 7707. *ARCO technik s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.arco.cz/lignostone-tvrzene-bukove-drevo-din-7707>
- [25] Vacuum Pressure Impregnation Resins. In: *Dolphs* [online]. John C. Dolph Company, 2013 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: [http://www.dolphs.com/pdfs/Dol\\_VPI\\_Chart.pdf](http://www.dolphs.com/pdfs/Dol_VPI_Chart.pdf)
- [26] Vacuum Pressure Impregnation (V.P.I.). *Avonmore Electrical* [online]. 2014 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://www.avonmore-electrical.com/vacuum-pressure-impregnation->
- [27] Resin Rich izolační systém. *COGEBI a.s.* [online]. 2009 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: [http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR\\_2009%20CZ.pdf](http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR_2009%20CZ.pdf)
- [28] JIRÁK, Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdeňka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. Materiály v elektrotechnice. In: *Materiály a technická dokumentace* [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: [http://www.dufi.net/black/BOOKS\\_cz/\\_ELEKTRO/ele%20knihy/Materialy%20V%20Elektrotechnice.pdf](http://www.dufi.net/black/BOOKS_cz/_ELEKTRO/ele%20knihy/Materialy%20V%20Elektrotechnice.pdf)
- [29] *Kompozitní izolátory VVN Maclean Power Systems* In: DRIBO, spol. s.r.o. [online]. 2011 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: <http://www.dribo.cz>
- [30] ABB Composites: Insulating composite components for reliable performance. In: *ABB* [online]. 2010 [cit. 2015-01-18]. Dostupné z: [www.abb.com/composites](http://www.abb.com/composites)
- [31] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1.
- [32] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011, 276 s. ISBN 978-807-0807-880.
- [33] HARRIS, Bryan. *Engineering Composite Materials*. In: [online]. London: The Institute of Materials, 1999 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://www.cantab.net/users/bryanharris/Engineering%20Composites.pdf>
- [34] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-708-2940-0.
- [35] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [36] TOMÁŠKOVÁ, Tetjana. *Perspektivní kompozity pro elektrotechniku*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [37] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: Materiály a technologie v elektronice a elektrotechnice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 183 s. ISBN 80-860-5675-9.
- [38] MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 63 s. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.

- [39] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [40] ACCR lana řeší energetické přetížení sítí. In: *ETM Elektrotechnický magazín: Odborný magazín pro elektrotechniky, energetiky, projektanty, zájemce o silnoproudou elektrotechniku, podnikatele a investory v oborech elektro* [online]. Brno: Elektromanagement, 2015 [cit. 2015-02-03]. ISSN 1210-5422. Dostupné z: <http://www.etm.cz/index.php/etm/677-accr-lana-resi-energeticke-pretizeni-siti>
- [41] Aluminum Conductor Composite Reinforced: Technical Notebook. In: *3M* [online]. 2003 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://multimedia.3m.com/mws/media/5812680/electrical-markets.pdf>
- [42] Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC® Conductors. *CTC GLOBAL CORPORATION* [online]. 2011 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: [http://www.ctcglobal.com/protected/Engineering\\_Transmission\\_Lines\\_with\\_ACCC\\_Conductor.pdf](http://www.ctcglobal.com/protected/Engineering_Transmission_Lines_with_ACCC_Conductor.pdf)
- [42] *Fiberex Corporation* [online]. Edmonton, Canada, 2015 [cit. 2015-02-06]. Dostupné z: <http://www.fiberex.com/>
- [43] HASSDENTEUFEL, Josef. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967
- [44] Všeobecný a základní popis kompozitů používaných při výrobě kompozitů. *Havel Composites* [online]. 2010 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>
- [45] ROTHON, R. *Particulate-filled polymer composites*. 2nd ed. Shrewsbury, UK: Rapra Technology, 2003, x, 544 p. ISBN 9781859573822.
- [46] HOŠEK, Jan. *Úvod do nanotechnologie*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 170 s. ISBN 978-80-01-04555-8.
- [47] CAMARGO, Pedro Henrique Cury, Kestur Gundappa SATYANARAYANA a Fernando WYPYCH. Nanocomposites: Synthesis, Structure, Properties and New Application Opportunities. In: *Materials Research: Vol. 12* [online]. Brazil: Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, 2008, 2009 [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v12n1/02.pdf>
- [48] Single-wall Carbon Nanotubes. *Carbon Allotropes* [online]. 2015 [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.carbonallotropes.com/carbon-nanotubes/39-single-wall-carbon-nanotubes.html>
- [49] KREIDL, Marcel. *Diagnostické systémy*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 352 s. ISBN 8001023494.
- [50] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁCKO. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9.
- [51] *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů. Část 1: Zkušební metoda. ČSN EN ISO 14577–1*.
- [52] BLÁHOVÁ, O.: *Nanoindentační měření povrchových vrstev*. Habilitační práce, ZČU Plzeň, 2007.
- [53] Zkoušky tvrdosti. In: *OVMT* [online]. Brno: Střední škola strojírenská a elektrotechnická, 2014 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky_tvrlosti.pdf)
- [54] Casemodding: Kompozitní zázrak-laminát. *PC tuning* [online]. 2008 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: [http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni\\_zazrak-laminat](http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemodding-kompozitni_zazrak-laminat)
- [55] HAVLÍČEK, Tomáš. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*. Brno, 2009. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=20100](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20100).

- Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí doktorské práce Doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.
- [56] TESTOMETRIC stroje. *Labor machine s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://labormachine.cz/testometric-stroje/>
- [57] Strojírenská technologie – Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. *Strojírenství-engineering* [online]. 2007 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: [http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)
- [58] MENTLÍK, Václav a Radek POLANSKÝ. Aspekty strukturální elektrotechnologické diagnostiky. *Elektro časopis pro elektrotechniku*. 2008, č. 2. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37214](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37214)
- [59] *TA instruments* [online]. 2015 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.tainstruments.com/>
- [60] Termická analýza – termogravimetrie (TGA). *Chempoint* [online]. 2011 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kucerik-1>
- [61] Infračervená spektrometrie. In: KANIA, Patrik. [online]. VŠCHT Praha [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/anl/lach1/7\\_IC.pdf](http://old.vscht.cz/anl/lach1/7_IC.pdf)
- [62] ČSN EN ISO/IEC 17025. *Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří*. Český normalizační institut, 2005.
- [63] VANÍKOVÁ, Michala. Systém managementu kvality ve zkušebních laboratořích: Učební texty k semináři. In: [online]. Písek, 2012 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_08\\_1203.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1203.pdf)
- [64] Možnosti průmyslového inženýrství. *Moderní řízení* [online]. 2006 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://modernirizeni.ihned.cz/c1-19494840-moznosti-prumysloveho-inzenyrstvi>
- [65] SVOZILOVÁ, Alena. *Zlepšování podnikových procesů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 223 s. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-3938-0.
- [66] ŠIMONOVÁ, Stanislava. *Modelování procesů a dat pro zvyšování kvality*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta ekonomicko-správní, c2009, 192 s. ISBN 978-80-7395-205-1.
- [67] *System Online: S přehledem ve světě informačních technologií* [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.systemonline.cz/>
- [68] *IPA* [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.ipaczech.cz/>
- [69] *IKvalita.cz: Portál pro kvalitáře* [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.ikvalita.cz/>
- [70] *Escare* [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.escare.cz/>
- [71] COLLINS, L. Wayne. Managing Laboratory Maintenance. [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/18808-Managing-Laboratory-Maintenance/>.
- [72] *API: Academy of Productivity and Innovations* [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: [www.e-api.cz](http://www.e-api.cz)
- [73] SVOBODOVÁ, Hana a Jaromír VEBER. *Produktový a provozní management: [Product and operation management]*. 2. vyd. Praha: Oeconomica, 2006, 153 s. ISBN 80-245-1083-9.