

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Hodnocení elektroizolačních materiálů z hlediska
mechanických vlastností**

**vedoucí práce: Ing. Pavel Prosr, Ph.D.
autor: Bc. Tomáš Hubinský**

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Tomáš HUBINSKÝ**
Osobní číslo: **E11N0015P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Hodnocení elektroizolačních materiálů z hlediska mechanických vlastností**
Zadávající 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. Proveďte základní dělení materiálů dle skupenství látek a uveďte charakteristiku jednotlivých skupin materiálů.
2. Vyjmenujte základní mechanické vlastnosti z hlediska aplikovatelnosti v oblasti elektrotechnických aplikací.
3. Charakterizujte materiály používané jako konstrukční materiál v elektrotechnických aplikacích.
4. Proveďte proměření mechanických vlastností materiálu pro konkrétní aplikaci.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
2. MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
3. Internetové informační zdroje - databáze ScienceDirect, IEEE.
4. KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. ISBN 80-7082-940-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Prosr, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předložená diplomová práce se zaměřuje na hodnocení elektroizolačních materiálů z hlediska mechanických vlastností. V úvodu této práce jsou uvedeny vlastnosti izolantů a jejich třídění dle skupenství s popisem běžně používaných zástupců každé skupiny. Dále jsou zde popsány mechanické vlastnosti izolantů a jednotlivé mechanické zkoušky, se kterými je možné se setkat při vyhodnocování mechanických vlastností materiálů. V závěru diplomové práce je provedeno měření konkrétní aplikace. Výsledkem experimentu je stanovení působení vlivu navlhování na materiál v závislosti na době jeho stárnutí.

Klíčová slova

Dynamická mechanická analýza, třibodový ohyb, univerzální zkušební stroj, elektroizolační materiál.

Abstract

The thesis is focused on the evaluation of electrical insulating materials in terms of mechanical properties. In the introduction of this work are given the properties of insulators and their classification according to form with description commonly used representatives from each group. There are also described mechanical properties of insulators and individual mechanical test, with which is possible to meet when we are evaluating the mechanical properties of materials. In conclusion of this thesis is measuring of specific applications. The result of the experiment is to assessment the influence of humidity to the material depending on the time of aging.

Key words

Dynamic mechanical analysis, three-point bending, universal testing machine, electrical insulation material.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 5.5.2013

Tomáš Hubinský

.....

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlovi Prosovi, Ph.D. za odborné vedení a náměty, díky kterým jsem mohl dokončit tuto diplomovou práci. Dále bych rád poděkoval i celému pedagogickému sboru Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni za získání všech odborných znalostí během mého studia a také těm, kteří mně podporovali a umožnili studovat na této škole.

Tento příspěvek vznikl s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Obsah

OBSAH	5
ÚVOD.....	7
SEZNAM SYMBOLŮ	8
1 IZOLANTY A JEJICH SKUPENSTVÍ.....	10
1.1 VLASTNOSTI IZOLANTŮ	10
1.1.1 <i>Vodivost izolantů.....</i>	<i>10</i>
1.1.2 <i>Dielektrické ztráty v izolantech.....</i>	<i>11</i>
1.1.3 <i>Elektrická pevnost izolantů.....</i>	<i>12</i>
1.2 SKUPENSTVÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.2.1 <i>Kapalné izolanty</i>	<i>14</i>
1.2.2 <i>Plynné izolanty.....</i>	<i>16</i>
1.2.3 <i>Pevné izolanty anorganické</i>	<i>18</i>
1.2.4 <i>Pevné izolanty organické</i>	<i>20</i>
2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ	21
2.1 PRUŽNÁ DEFORMACE.....	21
2.2 PLASTICKÁ DEFORMACE	22
2.3 OHYBOVÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ	23
2.4 RÁZOVÁ A VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST IZOLANTŮ.....	24
2.5 TEPelné VLASTNOSTI IZOLANTŮ	24
3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ.....	25
3.1 RÁZOVÁ A VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST METODOU CHARPY.....	25
3.2 UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	27
3.2.1 <i>Zkouška tahem</i>	<i>27</i>
3.2.2 <i>Zkouška ohybem.....</i>	<i>29</i>
3.3 ZKOUŠKA BRINELLOVA	31
3.4 ZKOUŠKA VICKERSOVA.....	32
3.5 DYNAMICKÁ MECHANICKÁ ANALÝZA (DMA).....	33
4 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY V ELEKTROTECHNICE.....	35
4.1 KOVY	35
4.2 PLASTY.....	38
4.3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	39
4.4 KRITÉRIA VOLBY VHODNÝCH MATERIÁLŮ PRO PRAKTICKÉ APLIKACE.....	41

5	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PRO KONKRÉTNÍ APLIKACI ...	42
5.1	MĚŘENÍ POMOCÍ DMA	43
5.2	MĚŘENÍ POMOCÍ UNIVERZÁLNÍHO ZKUŠEBNÍHO STROJE	47
5.3	KORELACE DAT MEZI DMA A UNIVERZÁLNÍM ZKUŠEBNÍM STROJEM	48
	ZÁVĚR	50
	SEZNAM LITERATURY.....	51
	PŘÍLOHY	55

Úvod

V dnešní době se klade důraz především na spolehlivost, přesnost a bezpečnost výrobků. Z tohoto důvodu jsou stále zvyšovány požadavky na materiálové parametry a je zapotřebí neustále získávat informace o materiálech nejen z mikroskopického hlediska, ale i z makroskopického hlediska. Tyto informace je možné získat pomocí dynamické mechanické analýzy a také za pomoci univerzálního zkušebního stroje.

Základem této diplomové práce je seznámení s mechanickými vlastnostmi elektroizolačních materiálů a jejich mechanickými zkouškami. V této práci jsou popsány jednotlivé metody související s měřením konkrétní aplikace v závěru diplomové práce. Dále je zmíněné rozdělení jednotlivých izolantů z hlediska skupenství a v neposlední řadě dle jejich využití.

Závěrečná část diplomové práce je zaměřena na měření mechanických vlastností konkrétní aplikace. Analyzovaný vzorek je kompozitní materiál používaný jako materiál na výrobu desek plošných spojů. Tento materiál je vystaven navlhování a vzorky jsou vyhodnoceny po stanovených časových obdobích. U materiálu se provádí měření skelného přechodu, Youngova modulu a měření maximální síly potřebné k deformaci vzorku. Jednotlivá měření jsou provedena na měřících přístrojích TA Instruments Q800 a univerzálním zkušebním stroji. Obě tyto měřící zařízení umožňují měření v režimu tříbodového ohybu.

Seznam symbolů

b	.....	šířka zkušebního tělesa [mm]
d	.....	tloušťka izolantu [m]
D	.....	průměr kuličky [mm]
d_v	.....	aritmetický průměr vtisku [mm]
DMA	.....	dynamická mechanická analýza
E	.....	modul pružnosti v tahu [Pa]
E'	.....	elastický modul [MPa]
E''	.....	ztrátový modul [MPa]
E_f	.....	ohybový modul pružnosti [MPa]
E_p	.....	elektrická pevnost [$V \cdot m^{-1}$]
ΔF	.....	rozdíl mezi silou F'' a silou F' [mm]
F	.....	zatěžující síla [N]
F_{eH}	.....	zatěžující síla na horní mezi kluzu [N]
F_{eL}	.....	zatěžující síla na dolní mezi kluzu [N]
G	.....	modul pružnosti ve smyku [Pa]
h	.....	tloušťka zkušebního tělesa [mm]
HV	.....	tvrdost podle Vickerse
K_p	.....	kapacita stroje
L	.....	rozpětí podpěr [mm]
PA	.....	polyamid
PVC	.....	polyvinylchlorid
R	.....	smluvní napětí [$N \cdot mm^{-2}$]
R_{eH}	.....	horní mez kluzu [$N \cdot mm^{-2}$]
R_{eL}	.....	dolní mez kluzu [$N \cdot mm^{-2}$]
Δs	.....	rozdíl v průhybu mezi s'' a s' [mm]
S_0	.....	počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyčinky
s'	.....	průhyb uprostřed tělesa [mm]
s''	.....	průhyb uprostřed tělesa [mm]
$tg \delta$	.....	ztrátový činitel [-]
U_p	.....	průrazné napětí [V]
α	.....	vrcholový úhel vnikacího tělesa [136°]
ε	.....	poměrné prodloužení [mm]

ε_f' ohybová deformace [-]

ε_f'' ohybová deformace [-]

ε_rrelativní permitivita [-]

ρ_vměrný odpor [Ωm]

σmechanické napětí [MPa]

σ_{dt}dovolené napětí pro namáhání tahem [MPa]

σ_fpříslušné napětí v ohybu [MPa]

σ_{kt}napětí na mezi kluzu [MPa]

σ_{pt}napětí na mezi pevnosti [MPa]

1 Izolanty a jejich skupenství

Dielektrikem lze charakterizovat látky, které mají schopnost existence vlastního elektrického pole a vlastní polarizovatelnost v elektrickém poli. Většina dielektrik je považována za dobré izolanty, není však možné z této věty usuzovat, že každé dielektrikum je izolant, jelikož každý pojem má své specifikum.

Za izolanty považujeme látky, které neobsahují na rozdíl od kovů volné nosiče nábojů, tím pádem nevedou elektrický proud. Elektrické izolanty jsou tvořeny z atomů, molekul nebo iontů. Částice s elektrickým nábojem jsou vázány k mřížce izolantu, ze které se nemohou za běžných okolností odpoutat. V praxi se nesetkáváme s absolutně nevodivými izolanty, tedy ideálními izolanty. Za ideální izolant může být považováno absolutní vakuum nebo technický izolant v blízkosti teploty 0 K (absolutní nuly). Při standardních podmínkách nelze technické izolanty považovat za ideální izolanty, protože obsahují vždy alespoň část volných elektrických nosičů nábojů, které nejsou připevněné k mřížce izolantu, a za působení vnějšího elektrického pole je možný jejich následný pohyb. Tyto látky označujeme jako reálný izolant, jelikož obsahují určitý počet nosičů elektrického náboje [1].

Pokud má být materiál dobrým izolantem, měl by splňovat určité vlastnosti. Jsou to především vlastnosti elektrické např. elektrická pevnost (co nejvyšší), dále stanovujeme rezistivitu, která u dobrého izolantu dosahuje hodnoty alespoň $10^{12} \Omega\text{m}$ a v neposlední řadě určujeme relativní permitivitu a ztrátový činitel [2].

1.1 Vlastnosti izolanů

1.1.1 Vodivost izolanů

Vodivost je závislá na pohybu elektrického náboje ve struktuře izolanů. Mechanismus vodivosti závisí na daných nosičích a skupenství látek.

Plyny můžeme považovat jako dobré izolanty, jelikož obsahují především neutrální molekuly, u nichž jsou vzdálenosti řádově stokrát větší než jejich rozměry. K následnému průchodu proudu dochází až po vzniku volných nosičů elektrického náboje a následné ionizaci. Tento jev nastává poté, co atom absorbuje dostatečně velké množství ionizační energie a elektron přechází na vyšší energetickou hladinu. Energii dodávanou formou tepla nazýváme jako tepelnou ionizaci, dále můžeme ještě určit nárazovou ionizaci, kde dochází k rozpadu molekuly plynu na vodivé částice, díky nárazu elektricky nabitých částic. U plynných látek můžeme sledovat děj nazývaný rekombinace, který je jevem opačným. Pokud uvažujeme nezávislost ionizace, musí během jednotky času současně vzniknout i zaniknout

stejně množství iontových párů a dochází k ustavení rovnováhy [1],[3].

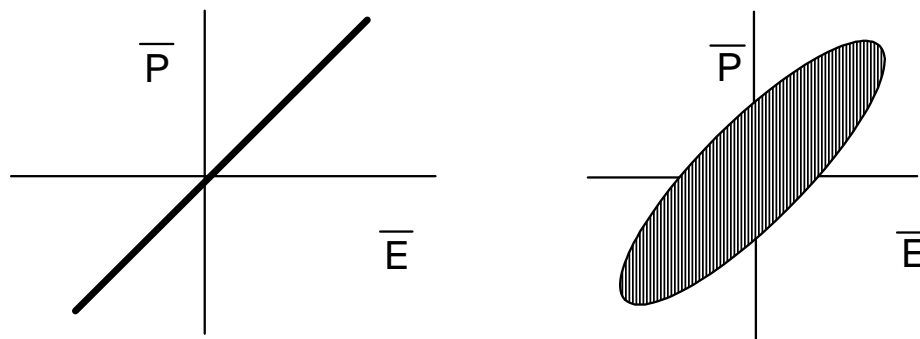
U kapalin jsou pevněji vázané molekuly, takže vzájemné interakce jsou silnější než v plynech. Mezimolekulová vzdálenost je úměrná velikostem jednotlivých molekul. Vodivost kapalin ovlivňuje zejména obsah vody a dalších příměsí, ve většině případů má iontový charakter. V molekulách musíme dále rozlišovat, zda molekuly mají iontovou nebo kovalentní vazbu a zda se jedná o polární či nepolární látky [1],[3].

Pevné izolanty mají zpravidla jeden převládající mechanismus vodivosti. Při standardních podmínkách, kdy máme běžnou teplotu okolí a slabé elektrické pole, mají tyto materiály nízkou konduktivitu. Iontová elektrická vodivost je závislá na chemickém složení a struktuře látek, proto se velikost konduktivity liší pro různé materiály.

U izolantů můžeme dále určit tzv. povrchovou elektrickou vodivost, která je u tuhých elektrických izolantů způsobena pohybem volných nosičů elektrického náboje na povrchu látky. Materiály s iontovým charakterem vazeb mají nejnižší povrchový odpor, jelikož u nichž vzniká vodní roztok elektrolytu, který má již značnou vodivost [2].

1.1.2 Dielektrické ztráty v izolantech

Ztráty v dielektriku vznikají při působení elektrického pole. Tyto ztráty jsou způsobeny pohybem volných i vázaných nábojů a jejich následnými srážkami, kdy se část energie přeměňuje na energii tepelnou. Tento ohřev se považuje za nežádoucí jev, jelikož ohřev izolace zapříčiňuje její stárnutí a vyvolává degradační reakce. Dielektrické ztráty jsou vyvolávány u nepružné polarizace, kde vzdálenosti mezi atomy jsou velké a při jejich pohybu mohou předávat energii. Jelikož pohyb náboje závisí na teplotě, jsou i dielektrické ztráty závislé na teplotě [3].



Obr. 1: Dielektrické ztráty při různých druzích polarizace [1]

Dielektrické ztráty v plynech vznikají pro nízké hodnoty napětí, kdy dochází pouze k nízkým vodivostním ztrátám. Při překročení ionizačního napětí vzroste elektrická vodivost a důsledkem toho vzrůstají ionizační ztráty. Tento jev nastává i u nehomogenních pevných izolantů s dutinkami, v nichž jsou částečné výboje [1].

Dielektrické ztráty v kapalných izolantech jsou u nepolárních izolantů a mají pouze vodivostní ztráty, rozhodující je především čistota materiálu. Tyto ztráty jsou frekvenčně nezávislé, avšak exponenciálně rostou s teplotou. Polární kapaliny mají jak vodivostní ztráty, tak i ztráty polarizační. [1].

Dielektrické ztráty v pevných izolantech obsahují všechny typy ztrát, záleží především na daném druhu izolantu. Neutrální pevné izolanty mají pružnou polarizaci. Ztráty vodivosti jsou nízké a vyskytují se jenom díky nečistotám. Tyto materiály jsou používány především pro vysokofrekvenční aplikace. U polárních pevných izolantů dochází k dipólové polarizaci. Látky mají ztráty totožné jako polární kapaliny a řadíme do této kategorie většinu technických izolantů a makromolekulární látky typu kaučuk, celulóza, PVC, PA [1].

1.1.3 Elektrická pevnost izolantů

Elektrické namáhání izolantu se charakterizuje na základě velikosti intenzity elektrického pole. Každý izolační materiál má elektroizolační schopnost pouze v určitém rozsahu intenzit vnějšího elektrického pole. Pokud nastane překročení rozsahu intenzity pole, dochází u pevných izolantů k průrazu, naopak u izolantů plyných i kapalných dochází k přeskočení. Hodnota napětí, při kterém dochází k průrazu či přeskočení je nazvána průrazné napětí. Na základě stanovení průrazného napětí je možné určit intenzitu elektrického pole, která se označuje jako elektrická pevnost. Elektrická pevnost je definována jako poměr průrazného napětí k tloušťce izolantu v místě průrazu [4].

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (7)$$

Ztráta izolační schopnosti průrazem je u pevných izolačních materiálů trvalého charakteru. Dojde k propálení vodivé cesty, která je mezi elektrodami. Jevy, které mohou degradovat pevný izolant působí tepelně, opticky a chemicky. Pokud nastane čistě elektrický průraz na základě působení energií nosičů elektrického náboje dodávaného elektrickým polem, snižuje se hodnota elektrické pevnosti na základě frekvence. Pokud se zvyšuje frekvence, podmínky izolantů se zvyšují a zvyšuje se i hodnota elektrické pevnosti.

V plyných izolantech je přeskok způsoben vlivem nárazové ionizace s lavinovým

růstem počtu nosičů elektrického náboje. Projevuje se koncentrace částic, to znamená, že při poklesu tlaku plynu nárůstem volné dráhy nosičů dochází k charakteristickému poklesu E_p . Od překročení vlivu pravděpodobnosti srážek částic začne E_p opět vzrůstat. V plynné fázi se projevuje korona, kdy v první fázi dochází ke zvyšování napětí, a dále přechází v jiskrový a obloukový výboj [2].

U kapalných izolačních materiálů se setkáme s kratšími vzdálenostmi mezi molekulami a tím je umožněna silnější interakce s molekulami nečistot. Citlivost elektrické pevnosti je závislá na čistotě a to vede k vyšším hodnotám E_p než u plynů. Koloidní částice ovlivňující elektrickou pevnost můžeme charakterizovat jako vzduchové bublinky, pevné částice či kapičky vody, které způsobí vytvoření vodivých cest, přičemž se sníží hodnota elektrické pevnosti [6].

1.2 Skupenství izolačních materiálů

1.2.1 Kapalné izolanty

Kapalné izolanty jsou využívány především pro své vlastnosti při odvádění přebytečného tepla. Kapalné izolanty snadno vyplňují daný prostor a umožňují zhášení případného výboje a odlehčují tím zatížení pevných izolantů. Podle vzniku je můžeme rozdělit na rostlinné oleje, minerální oleje a syntetické kapaliny [1].

Rostlinné oleje lze považovat z chemického hlediska za směs esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Dále je rozdělujeme podle vysychavosti. Ricinové se řadí mezi nevysychavé a používají se především k napouštění papírových kondenzátorů pro stejnosměrné obvody. Lněné či dřevné oleje patří k vysychavým, u nichž dochází k chemické reakci při pohlcení kyslíku. Vysychavé oleje vytváří tenkou vrstvu s dobrými elektroizolačními vlastnostmi, dnes se využívají jako přísady do elektroizolačních laků [2].

Minerální oleje se získávají z ropy destilací, následuje rafinace, pomocí které se odstraňují nežádoucí látky obsahující kyslík. Zbylé nečistoty jsou odstraněny hlinkou a jejím ofiltrováním. Minerální oleje rozdělujeme dle použití na transformátorové, kondenzátorové, kabelové. Transformátorové oleje mají za úkol chladit transformátory při vyhovujících elektrických podmínkách. U těchto olejů je důležitá jejich viskozita a její teplotní závislost. Ani při nízkých okolních teplotách nesmí viskozita klesnout pod určitou mez. Nižší viskozitu lze najít u olejů, které obsahují složky, jež se za vyšších hodnot odpařují a tyto páry jsou vysoce hořlavé. Proto je u olejů důležitá hodnota bodu vzplanutí. U kabelových olejů má viskozita velký význam, je potřebné, aby při teplotě $115 \div 130^\circ \text{C}$ byla viskozita nízká, neboť olej potom lépe nasytí pórovitou izolaci. Na druhé straně požadujeme v provozu zabránění stékání impregnantu z vyšších poloh a to je zajištěné pomocí požadavku na maximální viskozitu. K impregnaci kabelů se nepoužívají pouze oleje samotné, ale používají se olejové kompaundy s kalafunou. Kalafuna prodlužuje životnost izolace a snižuje i samotnou stékavost [5].

Oleje použité v kondenzátorech požadují větší stabilitu. Nevýhodou minerálních olejů je jejich stárnutí a tím zapříčiněná změna vlastností v závislosti na čase. Stárnutí je způsobené fyzikálně-chemickými pochody, které ovlivňují především, tlak, teplota a záření. Díky těmto jevům vzniká v olejích oxidace, kterou se snažíme potlačit inertní atmosférou nebo přidáním různých antioxidantů. Oleje mohou pohlcovat vodu, což znamená zhoršení elektrických vlastností a zejména elektrické pevnosti. Základní vlastnosti minerálních olejů jsou uvedeny v Tab. 1 [5].

Tab. 1: Dielektrické vlastnosti používaných kapalných izolantů [5]

olej	teplota tuhnutí [°C]	teplota vzplanutí [°C]	relativní permitivita ϵ_r při 20°C	ztrátový činitel tg δ při 20°C	elektrická pevnost E_p [kV/cm]
transformátorový BTA	≤ -45	> 130	2,1 ÷ 2,4	$\leq 0,015$	$> 92^* \div 200^{**}$
transformátorový BTS	-40	135	2,1 ÷ 2,4	0,015	$> 92^* \div 200^{**}$
kabelový VN	≤ -8	> 220	-	-	-
kondenzátorový	≤ -40	> 130	2,1 ÷ 2,25	$\leq 0,0012$	> 200
metylsiloxanový	-	$> 180^{***}$	2,3 ÷ 2,8	0,001	> 20

* platí pro nevysušený olej

** platí pro vysušený olej

*** olej teplotně stálý až do uvedené teploty

Syntetické kapaliny jsou využívány jako náhrada hořlavých minerálních olejů. Mají výborné izolační a dielektrické vlastnosti a dále jsou nehořlavé, nevýbušné, vysoce stabilní a prakticky nestárnou. Velké množství sloučenin je u syntetických kapalin na bázi esterů. Na tyto látky jsou v současné době kladeny vysoké nároky na ekologickou nezávadnost a podle přípravy je lze řadit do těchto skupin [2].

- **Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků** vynikají především svojí stabilitou i při vyšších teplotách a mají dobré elektroizolační vlastnosti. Tyto kapaliny mají různou viskozitu a jsou odolné proti záření a oxidaci. Pro jejich ekologickou nezávadnost se používají jako impregnace svitkových kondenzátorů a jako náplně kabelů [2].

- **Chlorované uhlovodíky**, jejichž izolační vlastnosti se mění v závislosti na stupni chlorování. Pentachlordifenyl se dříve používal jako látka pro napouštění kondenzátorových papírů. Dnes se již nepoužívá, jelikož jde o látku zdraví nebezpečnou [5].

- **Fluorované sloučeniny** jsou jako látky velmi stálé až do teploty 500 °C. Mají výborné elektroizolační vlastnosti, ale musí se brát v potaz toxicita fluoru. Pokud se tyto sloučeniny vyskytují v místě se zvýšenou vlhkostí, působí silně korozivně na železo. Fluorované sloučeniny nachází uplatnění jako náplň do transformátorů a výkonových spínačů, kde se používají pro svoje zhašecí účinky [7].

Tab. 2: Charakteristické vlastnosti vybraných syntetických kapalin [2]

druh kapaliny	hustota [kg · m ³]	teplota tuhnutí [°C]	ϵ_r 50Hz	tg δ 50 Hz	E_p [kV · mm ⁻¹]
osopropyldifenyl	988	-55	2,8	0,002*	23
dioktylfthalát	990	-45	5,2	0,01*	13,8
polydimetylsiloxan	960	-55	2,7*	0,001	42

* při teplotě 100 °C

1.2.2 Plynné izolanty

Při normálních okolních podmínkách a při nízké intenzitě elektrického pole je elektrická vodivost plynů velmi malá, jelikož v plynu se nachází jen malé množství iontů a volných elektronů. Při malé hustotě je střední volná dráha elektronů i iontů v plynech mnohem větší než u kovů. Ze všech dielektrik mají plyny nejmenší elektrickou pevnost, ale vykazují i spousty užitečných vlastností. Mají frekvenčně nezávislé ztráty, po průrazu mají rychlé regenerační vlastnosti a rovnoměrně vyplňují celý objem. U plynů charakterizujeme tři typy výbojů [1].

- **Tichý výboj** nastává při nárazové ionizaci, která probíhá v celém průřezu plynového sloupce. Jako příklad může být uvedena koróna nebo Eliášův oheň, kdy při vyšší intenzitě pole potřebného pro ionizaci se v důsledku kladného náboje pomalu se pohybujících kladných iontů udržuje pouze u katody. Tam je oblast s intenzivní lavinovou ionizací. U anody je oproti tomu oblast bez lavinové ionizace. Než vznikne výboj, prochází oblastí jen malý proud, při dosažení průrazného napětí hodnota prudce vzroste [1].

- **Jiskrový výboj** nenastává v celé šíři mezi elektrodami, nachází se zde pouze velmi úzká ionizovaná cesta. Vznik výboje je doprovázen jiskřením. U tohoto výboje není závislost proudu na napětí stabilní, proto neplatí Ohmův zákon [1].

- **Obloukový výboj** vzniká tak, že jsou elektrody rozžhaveny tak, že samy začínají vyzařovat ionty. V závislosti na rostoucím proudu se zvyšuje i hodnota teploty a tím i počet emitovaných iontů. Obloukový výboj je využitelný především u obloukového svařování a obloukových pecí [1].

Vzduch je v elektrotechnice nejčastěji používaný izolant. Je složen z několika směsí různých plynů a jejich poměrné objemové podíly jsou uvedeny v Tab. 3. Při běžných okolních podmínkách 20 °C a tlaku 10⁵ Pa má vzduch tyto parametry: $\epsilon_r = 1,0006$, $\rho_v = 10^{14} \Omega\text{m}$, $\text{tg } \delta = 10^{-6}$ a používá se především jako izolant u venkovních vedení [8].

Tab. 3: Složení vzduchu [8]

plyn obsažený ve vzduchu	objemový podíl [%]	bod varu [°C]
dusík	78	-196
kyslík	21	-183
argon	0,9325	-186
kysličník uhličitý	0,03	-78,5
neón	0,00161	-246
hélium	0,00046	-269
metan	0,0001	-161,4
vodík	0,0001	-253
krypton	0,000108	-153
xenon	0,000008	-109

Vodík má $14 \times$ menší hustotu než vzduch a tím je i tření v něm pohybujících se částí menší. Ze všech plynů má nejlepší tepelné vlastnosti, ale na druhou stranu má nejmenší elektrickou pevnost. Čistější vodík je výhodné získávat elektrolýzou vody, jelikož obsahuje jen vodní páry a malé množství kyslíku. Vodík se nejčastěji využívá ve vakuové technice jako náplň do výbojek a elektronek. Při použití vodíku jako chladicího prostředku velkých strojů se plní ventilační prostory vodíkem čistoty 99 % při malém přetlaku [8].

Dusík je hlavní složkou vzduchu. Základní vlastnosti jsou podobné jako u vzduchu, avšak dusík nemá oxidační účinky a proto se používá jako inertní atmosféra chránící okysličování izolačních olejů v transformátorech. Další jeho využití se nachází jako chladicí médium v kryogenní technice [5].

Fluorid sírový SF₆ je používán jako dielektrický plyn pro vysokonapěťové aplikace. Za normálních podmínek je chemicky inertní a plynný i při nízkých teplotách (teplota varu -63,8 °C). Díky vynikajícím chemickým, tepelným a elektrickým vlastnostem je používán v mnoha odvětvích. Především v elektrotechnickém průmyslu jako elektrický izolátor v transformátorech. Díky vysoké tepelné kapacitě a nízké viskozitě se fluorid sírový používá pro vysoce efektivní přenos tepelné energie. Přirozeně se v přírodě nevyskytuje a jedná se o syntetickou látku. Proto jsou veškeré jeho úniky spojeny s lidskou činností [9].

1.2.3 Pevné izolanty anorganické

Pevné izolanty anorganické lze z hlediska struktury rozdělit do dvou základních skupin. Látky bez pravidelného strukturálního uspořádání jako jsou skla a na látky s pravidelným uspořádáním kam řadíme azbest, slídu, a keramiku [10].

Anorganické sklo je z fyzikálního hlediska podchlazená kapalina, u které nedochází k vytvoření krystalické struktury, protože její viskozita s klesající teplotou prudce vzrůstá. Základem většiny anorganických skel tvoří síť Si-O iontů. Pokud jsou používána technická skla, jsou jejich volné prostory zaplněny ionty modifikátorů. Sklo je využitelné v oblasti izolační, konstrukční a při výrobě skelných vláken [10].

Skla jsou látky, jejichž elektrická pevnost dosahuje hodnot přibližně $40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. Relativní permitivita se u nich pohybuje v rozmezí $3,7 \div 16$ v závislosti na typu daného skla, v některých případech lze dosáhnout i vyšších hodnot [2].

Azbest je označení pro přirozeně vzniklé vláknité křemičitanové minerály. Nejčastěji se vyskytuje v bílé formě jako takzvaný chryzotil. Tyto nerosty nemají žádný charakteristický zápach ani chuť. Azbestová vlákna jsou odolná vůči většině chemických látek a též proti teplu.[11] Pokud dochází k namáhání azbestových materiálů, mohou se uvolňovat ostrá vlákna, která způsobují rakovinu plic. V České republice je zakázáno na trh uvádět výrobky, které obsahují azbest, stejně tak tomu je i v Evropské unii [12].

Slída patří k nejlepším elektrotechnickým izolantům. Je to minerál s jednoklonnými krystaly, které se štěpí na lístky tloušťky $10 \mu\text{m}$ i méně. Z mnoha druhů slídy je pro elektrotechnické účely významný pouze muskovit a flogopit. Oba tyto minerály jsou v lístcích ohebné, pružné a dokážou odolat vysokým teplotám i chemickým vlivům. Muskovit neboli křemičitan hlinitodraselný bývá převážně průhledný. Zbarvení je ovlivňováno ostatními prvky a v případě zvýšení množství železa se muskovit zbarvuje do zelena. Pokud je podrobován zahřívání, ztrácí se průhlednost i průsvitnost a následně se stane i drobným. Flogopit je označován jako křemičitan hlinitohořečnatý. Flogopit nemá tak hladký povrch jako muskovit, ale oproti němu je ohebnější. Pokud je flogopit ohříván snadno se láme, ale nedrobí se. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 4 [8].

Tab. 4: Fyzikální a elektrické vlastnosti slídy [8]

vlastnost	muskovit	flogopit
měrná hmotnost [kg/m^3]	2760	2720
přípustná teplota [$^{\circ}\text{C}$]	500 až 600	900 až 1000
teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$]	1230 až 1290	1270 až 1330
permitivita	6 až 7,7	5 až 6,5

Keramika je anorganické nekovové nebo uhlíkové těleso, které je vytvářeno pomocí vysokoteplotního procesu. Základní suroviny tvoří převážně práškovité látky, které se nechají vytvářet ve formách a následně se vypalují v pecích. Keramika vykazuje vysokou odolnost proti žáru, dále je odolná proti chemickým vlivům a působení navlhování [2],[13].

Hořčnatá keramika se využívá pro výrobu drobných izolačních a konstrukčních prvků. Nejvýznamnější materiály pro elektrotechniku jsou zejména steatit, forsterit a kordierit. Jednotlivé materiály se od sebe liší obsahem oxidů [14].

Základem steatitu je metakřemičitan hořčnatý $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, který obsahuje velké množství skelné fáze, jenž urychluje proces slinování. Jako vstupní suroviny se používají mastek, kaolín a sodnodraselné živce jako tavivo. Má dobrou mechanickou pevnost (140 MPa v ohybu) i elektrickou pevnost (20 kV/mm). Forsterit má za základní složku ortokřemičitan hořčnatý $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$. Mechanická pevnost při srovnání se steatitem je nižší, ale má nižší dielektrické ztráty okolo $5 \cdot 10^{-4}$ při 10 GHz oproti steatitu, který dosahuje hodnoty $7 \cdot 10^{-4}$. Hlavní využití forsteritu je ve vakuové technice a dále v mikrovlnné technice jako konstrukční materiál. Kordierit krystaluje v komplikovaném složení $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$. Jeho hlavní předností je velmi nízká délková teplotní roztažnost, proto je vysoce odolný proti rychlým změnám teploty. Je možné regulovat teplotní koeficient pomocí přídavku SiO_2 , jenž zvyšuje tento koeficient. Kordierit má velké dielektrické ztráty a vzhledem k tomu se nevyužívá ve vysokofrekvenčních obvodech [14].

Oxidová keramika je jednosložková keramická hmota složená ze žáruvzdorných oxidů, které neobsahují skelnou složku. Korundová keramika se využívá především v mikrovlnné technice. Na složení a obsahu nečistot jsou značně závislé elektrické vlastnosti, které nejvíce ovlivňuje obsah alkalických kovů. Vysoce čistý korund se využívá u vysokofrekvenčních výkonových zařízení, kde i za zvýšených teplot udržuje izolační vlastnosti, elektrickou a mechanickou pevnost, nízké dielektrické ztráty a slušnou tepelnou vodivost. Pokud jsou kladeny vyšší nároky na tepelnou vodivost, používá se oxid berylnatý s vodivostí až desetinásobně vyšší. BeO je toxický materiál, který je nutné zpracovávat ve speciálních podmínkách. Oxid zirkoničitý je žáruvzdorný materiál a výrobky z něj lze používat až do teploty 2400 °C. Pro běžné využití je nutná jeho stabilizace, jelikož při změně teploty dochází k rekrystalizaci spojené s velkou objemovou změnou. Pokud se stabilizuje oxid zirkoničitý jen částečně, nachází se v materiálu rozptýlené ostrůvky v metastabilním stavu [14].

1.2.4 Pevné izolanty organické

Šelak je přírodní pryskyřice, která se získává zpracováním výměšků hmyzu žijícího na tropických ostrovech. Vyskytuje se především ve formě tenkých, křehkých šupinek různých barev. Vlastnosti šelaku se mění s rostoucí se teplotou, kdy při 50 – 60 °C začíná měknout. Při delším působení zvýšených teplot se stává reaktoplastem, jeho využití se nachází jako pojivo při výrobě slídových izolantů a je dobře rozpustný v lihu [9].

Kalafuna se získává ze smol jehličnatých stromů po oddestilování tekutých složek terpentýnem. Je to látka, která je dobře rozpustná v líhu, benzínu, terpentýnu, acetonu a minerálních a rostlinných olejích. Využívá se v kabelářském průmyslu, kdy se kalafuna rozpouští a tím je následně napouštěna papírová izolace kabelů. Dále se využívá při přípravě zalévacích látek a při přípravě nekorozivních pájecích prostředků [9].

Kopály pochází z jehličnatých stromů a získávají se buď ze země, nebo jako smola některých tropických smolných stromů. Vlastnosti kopálu se mění s místem jeho získání, kdy manilský kopál je rozpustný v metanolu, etanolu a částečně v amylalkoholu a kongo kopál je v surovém stavu nerozpustný ve většině organických rozpouštědel [2],[15].

Jantar je diterpenoidní fosilní pryskyřice z vyhynulých stromů, které vytvářely pralesy na pobřeží Baltického moře. Vyskytují se především jako průhledné kousky zbarvené žlutě až hnědočerveně. Využívá se jako ochrana citlivé vrstvy kolodiových skleněných negativů proti poškrábání [15].

Tab. 5: Přírodní makromolekulární látky [2]

látka	E_p [kV · mm ⁻¹]	ρ_v [Ωm]	ϵ_r [-]	tg δ [-]	teplota měknutí T_m [°C]
šelak	20 ÷ 30	$10^{13} \div 10^{14}$	3 ÷ 4	0,008 ÷ 0,01	50 ÷ 70
kalafuna	10 ÷ 15	10^{15}	2,7 ÷ 3	0,001 ÷ 0,01	60
kopál	14 ÷ 17	$10^{13} \div 10^{15}$	2,5 ÷ 2,7	0,001 ÷ 0,01	60 ÷ 130
jantar	200	$10^{15} \div 10^{17}$	2,6 ÷ 2,9	0,001 ÷ 0,002	175 ÷ 200

2 Mechanické vlastnosti izolanů

Izolanty jsou již od výroby ovlivňovány nejen elektrickým namáháním, ale i podstatnou částí mechanickým namáháním. Pro udržení požadovaných elektrických vlastností je nutné sledovat působení statických a dynamických sil na izolan. Statické zkoušky jsou provozovány pozvolna, kdy na materiál působí síly řádově minuty až dny. Dynamické rázové a cyklické zkoušky jsou prováděny pouze po zlomek sekundy, kdy se tyto cykly mohou opakovat. Zkoušky se provádějí při různých teplotách okolního prostředí a i na tento faktor se bere zřetel, kdy se dělí na zkoušky při normálních teplotách, zvýšených teplotách a snížených teplotách [16]. Jako další charakteristické vlastnosti izolanů považujeme, viskozitu, hustotu, objemovou hustotu, tažnost, pevnost v kroucení, odolnost proti štěpení, odolnost proti žáru, odolnost proti elektrickému oblouku, bod vzplanutí, bod zápalu, bod měknutí a nasákavost [1].

2.1 Pružná deformace

Pokud zatížíme pevný izolan vnějšími silami, dochází ke změně tvaru materiálu a jeho deformaci. Jestliže z tělesa odebereme vnější zatížení a dosáhne zpětně svých původních tvarů a rozměrů, mluvíme o pružné deformaci. Pokud uvažujeme jednoosé zatěžování isotropního tělesa, závislost poměrné deformace na napětí je lineární a vyjadřuje ji Hookův zákon (8), který se častěji přepisuje ve tvaru (9). Ve většině případů složky normálového napětí působí kolmo ke sledované ploše a rovnoběžně s touto plochou působí smykové napětí. U materiálu se projevuje lineární elasticita, v tomto případě je deformace přímo úměrná napětí a probíhá okamžitě. Pro tahové i tlakové napětí platí výše uvedený Hookův zákon (10), pro smykové napětí je analogický vztah (11). Ve výše uvedených rovnicích je E modul pružnosti v tahu neboli Youngův modul a G je modul pružnosti ve smyku. Pokud budeme uvažovat ideální tuhé těleso, to se pružně deformuje okamžitě při působení napětí a obrácená pružná deformace se ztrácí současně s poklesem napětí na nulovou hodnotu. V reálných látkách je čas na přemístění atomů konečný, tím pádem se deformace opožďuje za napětím a tento jev nazýváme anelasticita. Nejvíce se anelasticita projevuje u polymerů a podílí se na jejich viskoelastickém chování [17].

$$\varepsilon = \alpha \cdot \sigma \quad (8)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \sigma \quad (10)$$

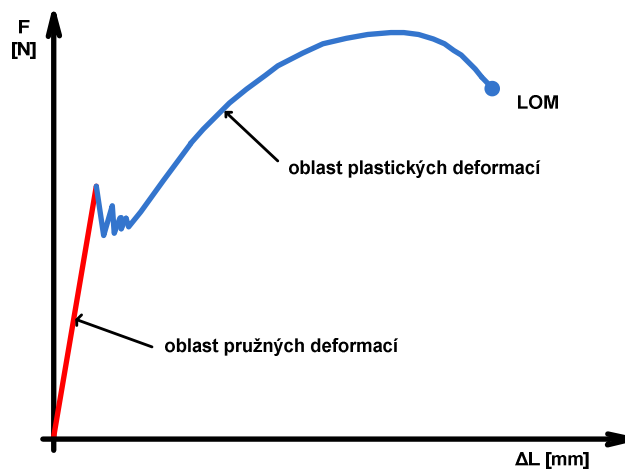
$$\gamma = \frac{1}{G \cdot \tau} \quad (11)$$

2.2 Plastická deformace

Plastická deformace vzniká kombinací elastické deformace a toku, čímž vznikne deformované těleso, které po odlehčení ještě relaxuje, ale nevrátí se již do původního stavu. Změna geometrických parametrů mezi původním tělesem a následně plasticky deformovaného a relaxovaného materiálu se nazývá zbytková plastická deformace. Zbytková plastická deformace roste se zatížením tělesa. Plastickou deformaci působením konstantního napětí σ popisuje rovnice [18]:

$$\gamma(t) = \frac{\sigma}{G(t) + \gamma_p(t)} \quad (12)$$

kde $\sigma/G(t)$ vyjadřuje příspěvek viskoelastické deformace a $\gamma_p(t)$ představuje zbytkovou plastickou deformaci, která je důsledkem nevratného toku. Plastická deformace nastává při překročení jistého napětí nazývaného mez kluzu (Obr. 2). Tato deformace je typická především u lineárních rozvětvených polymerů [18].

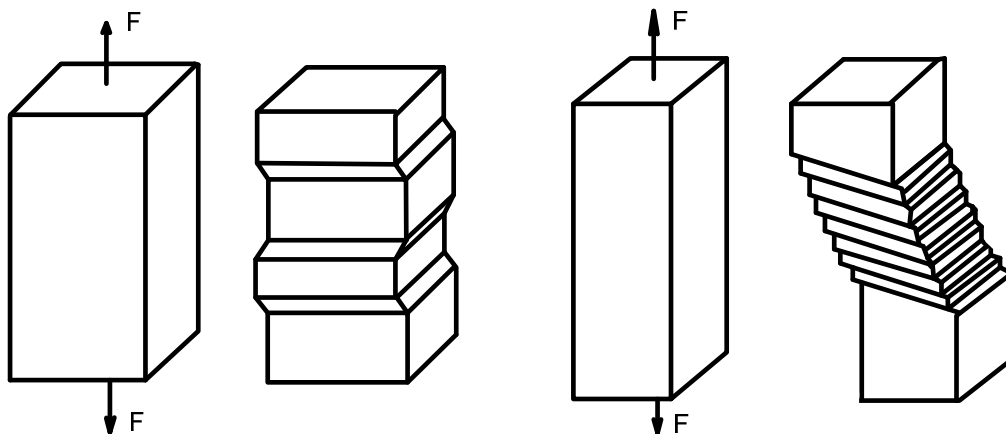


Obr. 2: Graf pružné a plastické deformace

Mechanismy způsobující plastickou deformaci jsou skluz dislokací a dvojčatní. Nejčastějším a nejnámějším mechanismem plastické deformace je skluz dislokací, kdy se pohybují dislokace ve skluzových systémech. Skluz těchto dislokací je prováděn jen v některých krystalografických rovinách a směrech, pro které platí:

- směr skluzu je totožný s některým směrem, který je obsazený atomy
- skluz probíhá většinou v rovině nejhustěji obsazené atomy
- ze skluzových souborů je aktivní ten, který je orientován vůči vnějšímu zatížení

Dvojčatění je druhý nejvýznamnější mechanismus, kdy jeho výskyt je podporován zejména vysokou rychlostí deformace a nízkou teplotou. Při dvojčatění se atomy přesunou o část meziatomové vzdálenosti, díky čemuž vznikne oblast mřížky souměrná podle roviny dvojčatění s neposunutou mřížkou. Přesun atomů je výsledkem pohybu neúplných dislokací, naopak k deformaci kluzem, kdy se přesouvaly pouze úplné dislokace [19].



Obr. 3: Zobrazení působení dvojčatění a skluzu dislokací

2.3 Ohybové vlastnosti izolanů

Zkouška ohybem umožňuje dokládat důležité konstrukční podklady pro materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb. Tato metoda dále umožňuje stanovit model pružnosti E u materiálů, kde je nemožné přesně určit parametry z tahové nebo tlakové zkoušky. V horních vrstvách materiálu je tahové napětí a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se přeměňuje v dolní polovině průřezu materiálu na tlakové napětí. U zkoušky ohybem rozlišujeme tříbodovou a čtyřbodovou zkoušku ohybem [20].

Během tříbodové zkoušky ohybem, je těleso podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a prohýbáno trnem, který je posunován konstantní rychlostí uprostřed podpěr. Zkouška je prováděna po dobu, která je stanovena dle normy ČSN EN ISO178 nebo do té doby, dokud se těleso nezlomí [20].

Čtyřbodová zkouška ohybu má již dva trny, které působí v jedné třetině nebo jedné polovině vzdálenosti podpůrných trnů. U této zkoušky se vykazují nižší hodnoty pevnosti v ohybu a je i jiný rozložení ohybového momentu. Rovnoměrnější působení ohybového momentu vedlo k vyššímu využívání čtyřbodové metody. Díky přechodu k čtyřbodovému systému se snížila celková koncentrace napětí v místech styku vzorku s trny, což umožňuje testování tenčích vzorků [20].

2.4 Rázová a vrubová houževnatost izolanů

Rázová a vrubová zkouška houževnatosti patří do kategorie dynamických zkoušek. To znamená, že zkušební těleso je namáháno rázem, tedy silou, která je koncentrována během velmi krátké doby. U zkušebního tělesa se následně určí jeho deformační vlastnosti, z kterých je jednoznačné, s jakou schopností je schopné absorbovat energii, tedy deformovat se s určitou rychlostí [21].

2.5 Tepelné vlastnosti izolanů

Při tepelném namáhání působí zvýšená zátěž na izolační materiál, která má za následek zhoršení mechanických a elektrických vlastností. Při narušení struktury izolantu dochází ke zrychlenému stárnutí izolantu, což se projevuje především u organických izolanů. Každý izolační materiál má svojí vlastní trvalou teplotní odolnost, která je vyjádřena maximální působící teplotou, při které může izolant pracovat. Tato vlastnost rozděluje izolant do jednotlivých teplotních tříd uvedených v Tab. 6 [2].

Tab. 6: Tepelné třídy [3]

třída	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
teplota/°C	90	105	120	130	155	180	200	220	250

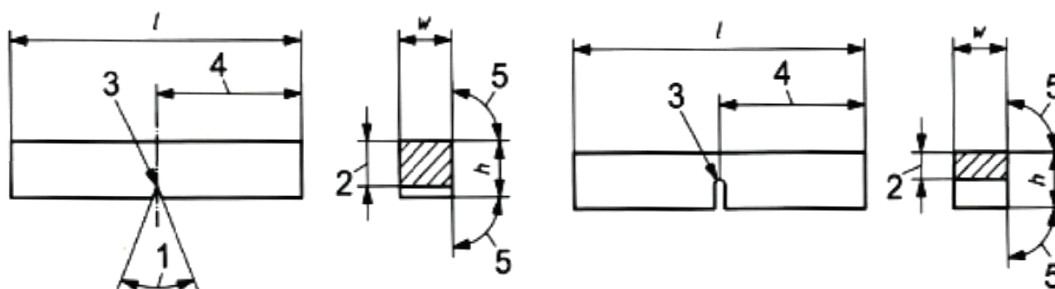
Jednotlivé tepelné vlastnosti izolanů lze charakterizovat pomocí materiálových konstant, do kterých patří měrná tepelná kapacita, součinitel teplotní vodivosti a teplotní součinitel délkové nebo objemové roztažnosti. Působení tepla se ověřuje zkouškami, např. tvarovou stálostí za tepla podle Martense, odolnost za tepla podle Vicata, stanovením vznětlivosti a hořlavosti [2].

3 Mechanické zkoušky vlastností materiálů

3.1 Rázová a vrubová houževnatost metodou Charpy

Tato metoda se zabývá přeražením zkušebního tělesa s vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva, kdy jsou předem definované podmínky. Těleso vložené proti opěrám musí mít vrub s předepsanou geometrií umístěný uprostřed tělesa a zároveň tento vrub je na protilehlé straně místa úderu. Jelikož tělesa mohou vykazovat různé hodnoty absorbované energie v závislosti na teplotě, jsou tyto zkoušky prováděny při specifikované teplotě. Pokud není možné zajistit tuto teplotu, je nutné zkušební těleso ochladit či zahřát na danou teplotu za řízených podmínek [22].

Standardní tělesa používané pro tuto metodu musí mít délku 55 mm a čtvercový průřez o stranách 10 mm. Dále musí těleso mít vrub tvaru V či U (Obr. 4). Při použití tělesa s vrubem typu V musí mít úhel 45° , hloubku 2 mm a poloměr kořene 0,25 mm, těleso s vrubem typu U musí mít hloubku 5 mm a poloměr kořene 1 mm. Pokud není možno z materiálu zhotovit standardní zkušební těleso, musí se opatřit jedno z náhradních zkušebních těles o šířce 7,5 mm, 5 mm nebo 2,5 mm. Povrchová drsnost u zkušebního tělesa musí být lepší než $R_a = 5 \mu\text{m}$. Pokud je hodnocen tepelně zpracovaný materiál, musí být konečné mechanické opracování zkušební vzorku a to včetně vrubu provedeno až po konečném tepelném zpracování [22].



Obr. 4: Typy vrubů pro metodu Charpy [22]

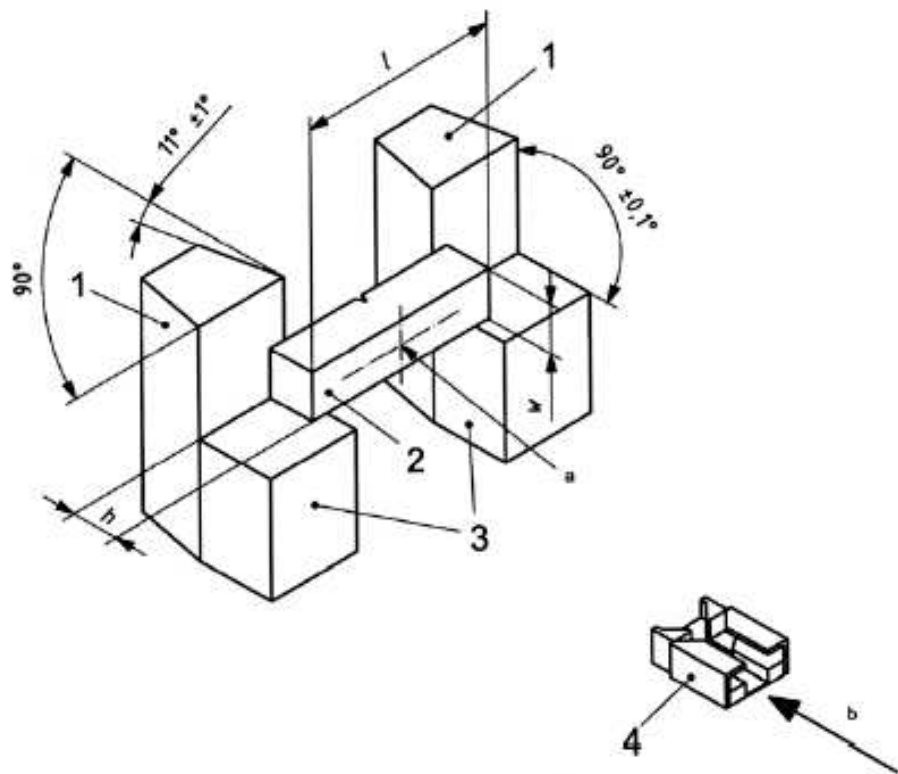
Při měření musí být zkušební vzorek vystředěn s maximální vrubovou odchylkou do 0,5 mm od středové roviny opěr Obr. 5. Kladivo následně musí udeřit břitem v rovině souměrnosti. Při zkoušce může dojít k nestandardnímu porušení vzorku a na tomto základě jsou příčiny rozděleny do několika možných skupin [22]:

Překročení kapacity stroje – absorbovaná energie nesmí překročit 80% počáteční energie K_p . Pokud je tato hodnota překročena, musí se absorbovaná energie považovat jako orientační a následně uvést ve zkušebním protokolu, že hodnota překročila 80% kapacity stroje [22].

Neúplný lom – pokud nedojde u tělesa k úplnému přeražení, je možné tuto hodnotu zaznamenat a zároveň ji použít k vyhodnocení průměrné hodnoty spolu s hodnotami kompletně přeražených těles [22].

Zaklínění zkušebního tělesa – při této příčině se hodnoty ignorují a stroj je zkontrolován s ohledem na poškození, které by mohlo následně ovlivnit jeho kalibraci [22].

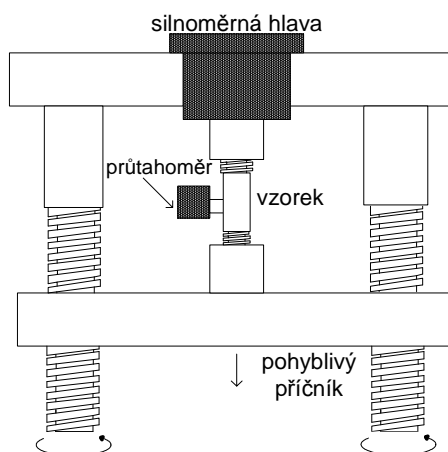
Prohlídka lomu – pokud se prokáže během prohlídky lomu, že jakákoliv část označení se nachází na části zkušební vzorku, která je viditelně deformovaná, nemusí být tento výsledek věrohodný pro testovaný materiál a tento fakt musí být zveřejněn následně do zkušební protokolu.[22]



Obr. 5: Uložení zkušební vzorku na podpěrách [22]

3.2 Univerzální zkušební zařízení

Univerzální zkušební stroj (Obr. 6) umožňuje provádět různé druhy mechanických zkoušek. Toto zařízení se skládá ve většině případů ze dvou vertikálních nosných sloupů, na kterých je připevněn pevný i pohybový příčník. Tyto univerzální stroje mohou být na principu mechanickém, hydraulickém, elektronickém, servohydraulickém a nebo moderní stroje řízené počítačem. Deformace těles je zkoumána pomocí extenzometru. V závislosti na velikosti zkušebních strojů je definován jejich maximální silový rozsah, který je například pro většinu plastů a keramik stanoven v rozmezí 1 – 10 kN. Rychlost těchto zkoušek je řádově milimetry až metr za minutu, díky tomu se o zkouškách na univerzálním zkušebním stroji hovoří jako o statických zkouškách [17].



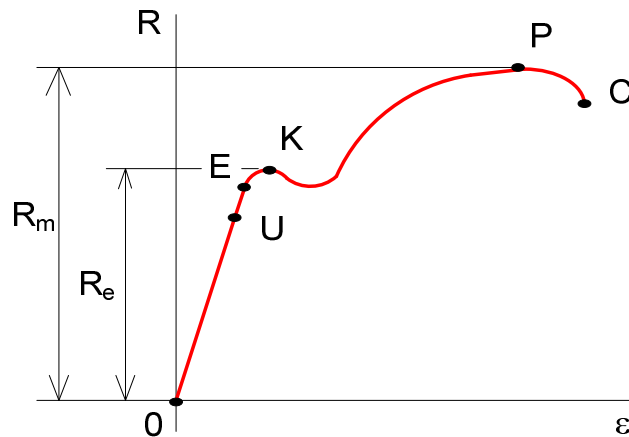
Obr. 6: Schéma univerzálního zkušebního stroje [17]

3.2.1 Zkouška tahem

Pro ověření mechanických vlastností materiálů patří tato zkouška mezi nejpoužívanější v technické praxi. Během zkoušky se zjišťuje chování materiálu za působení klidných, plynule a spojitě se měnících sil bez rázů, během kterých se zjišťuje závislost mezi působící silou a deformací zkušebního vzorku. Zkušební tělesa jsou jednoduchých tvarů, které se zatěžují až do jejich porušení. Závislost mezi napětím a poměrným prodloužením se znázorňuje jako smluvní diagram statické zkoušky pro příslušný materiál. U statické zkoušky tahem je uváděno smluvní napětí, které je definováno jako poměr okamžité zatěžující síly a původního průřezu zkušebního tělesa [23].

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (13)$$

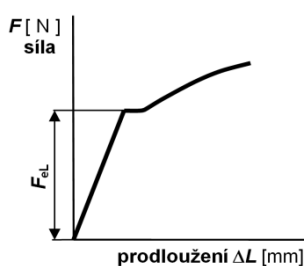
Ve vztahu F [N] vyjadřuje zatěžovací sílu a S_0 [mm²] je původní průřez zkoušeného tělesa. U smluvního diagramu jsou důležité jednotlivé body v diagramu.



Obr. 7: Diagram závislosti napětí na poměrném prodloužení [23]

Z diagramu (Obr. 7) je patrná lineární závislost mezi napětím a poměrným prodloužením, tento bod je označován U a považuje se za mez úměrnosti. Následující bod E je charakterizován jako mez pružnosti, kdy při jejím dosažení dochází v tyčince k trvalé deformaci o velikosti 0,005 %. Dále je z diagramu patrná hranice, kdy napětí roste pomaleji či dochází i k jeho pokles. Takto je označována mez kluzu K a dochází k rychlému prodlužování tyčinky. Maximální smluvní napětí R_m odpovídá mezi pevnosti P [23].

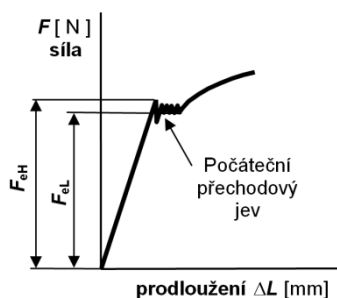
Mez kluzu je možné charakterizovat jako napětí, při kterém se materiál začne plasticky deformovat. Dle zvoleného materiálu je dán charakter přechodu mezi plastickou deformací a elastickou.



Dolní mez kluzu (Obr. 8) považujeme jako místo s nejnižším napětím v průběhu plastické deformace.

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} [N \times mm^{-2}] \quad (14)$$

Obr. 8: Dolní mez kluzu [24]



Horní mez kluzu (Obr. 9) odpovídá místu v diagramu, kde se poprvé snižuje hodnota napětí.

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} [N \times mm^{-2}] \quad (15)$$

Obr. 9: Horní mez kluzu [24]

Míra bezpečnosti a dovolené napětí jsou dalšími parametry, ke kterým musí konstruktér následně přihlížet. Tvary zatěžovaných těles se liší od tvarů zkušebních tyčí. Jedná se především o změny průřezu a osazení a dále na tělesa nepůsobí pouze statické síly, ale jako například u motorů síly dynamické. Dynamické zatížení může způsobovat únavové lomy, které se šíří díky mikroskopickým trhlinám. Kvůli nestandardnímu zatížení se zavádí koeficient $k > 1$ nazývaný míra bezpečnosti, pomocí kterého je možné dopočítat dovolené napětí σ_{dt} pro namáhání tahem [25].

$$\sigma_{dt} = \frac{\sigma_{kt}}{k} \quad (16)$$

Ve výše uvedeném vzorci je σ_{kt} je napětí na mezi kluzu, které je určené statickou zkouškou. Pokud uvažujeme materiál, který nemá mez kluzu, používáme k určení napětí na mezi pevnosti vztah:

$$\sigma_{dt} = \frac{\sigma_{pt}}{k'} \quad (17)$$

přičemž $k' > k$. Koeficient míry zatížení je především otázkou empirie získané provozem a zkušeností konstruktéra. Při volbě se musí zohledňovat otázky spolehlivosti a ekonomiky. Zvláštní pozornost je věnována cyklicky namáhaným součástkám, u kterých je možné předpokládat únavové lomy, které by mohli způsobit následně mnohem větší škody. V těchto případech je nutné statickou zkoušku doplnit zkouškou meze únavy při střídavém tahu, tlaku anebo při souměrném střídavém ohybu. Během zkoušek se zjišťuje závislost cyklického napětí σ_c na počtu N cyklů až do vzniku únavového lomu [25].

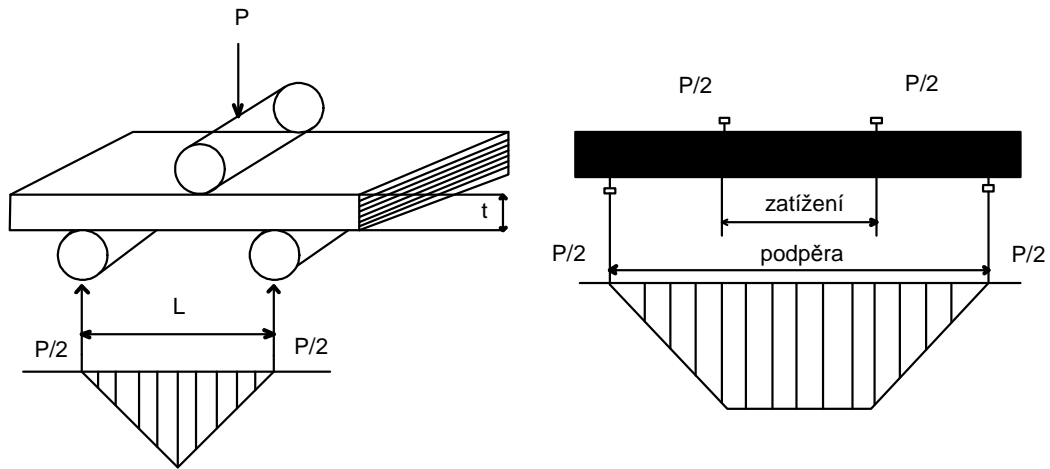
3.2.2 Zkouška ohybem

Statická zkouška ohybem se používá především u křehkých materiálů, zejména litiny. U houževnatých materiálů tato zkouška není vypovídající, jelikož u nich nedojde k porušení zkušební tělesa. I tak je možné zkoušku ohybem využít jako technologickou zkoušku nebo zkoušku ohybem hotových součástí konstrukčních celků. U zkoušky ohybem se též zjišťuje největší průhyb, který nastává v okamžiku porušení a charakterizuje tvárnost materiálu. Rozměry zkušebních tyčí jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 14125 [26].

Pevnost v ohybu σ_f [MPa] vyjadřuje hodnotu maximálního napětí v ohybu, kterou vydrží zkušební těleso.

Průhyb s [mm] je určená výchylkou mezi původní polohou zkušební tělesa a vychýlenou horní nebo spodní plochou.

Rychlost působení ohybové zkoušky musí být stejná jako u tahové zkoušky. Uspořádání jednotlivých částí včetně patřičných rozměrů plyne z Obr. 10.



Obr. 10: Schéma podpěr pro třibodový a čtyřbodový ohyb [20]

Průřez zkušební tělesa musí svírat pravé úhly, a tloušťka ve střední třetině se nesmí od střední hodnoty odchylovat o více než 2%. Pokud není možné měřit na zkušebním tělese, je nutné zachovat poměr délky a tloušťky zkušební tělesa $l/h = 20 \pm 1$ [3].

Jednotlivá zkušební tělesa nesmí podléhat předběžné deformaci, neboť by mohlo dojít ke zkreslení výsledků. Při samotné zkoušce by zatěžování zkušební tělesa nemělo přesáhnout rychlost $2 \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$. Výjimku lze provést, pokud je pro materiál stanoveno materiálovou normou jinak. Během zkoušky se automaticky zaznamenává silové působení a průhyb zkušební tělesa, u kterého je dokládána i křivka napětí v ohybu v závislosti na průhybu [3].

Výpočet a vyjádření výsledků:

Napětí v ohybu

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (18)$$

- kde σ_f příslušné napětí v ohybu [MPa];
 F použitá síla [N];
 L rozpětí [mm];
 b šířka zkušební tělesa [mm];
 h tloušťka zkušební tělesa [mm];

Ohybový modul

Pro zjištění ohybového modulu je nejprve nutné stanovit průhyby s' a s'' , které odpovídají hodnotám ohybové deformace $\varepsilon_f' = 0,0005$ a $\varepsilon_f'' = 0,0025$ [3].

$$s' = \frac{\varepsilon_f' \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad (19)$$

$$s'' = \frac{\varepsilon_f''}{6 \cdot h} \quad (20)$$

kde s' a s'' jsou průhyby uprostřed těles [mm];

ε_f' a ε_f'' ohybové deformace, u kterých jsou uvedené hodnoty výše.

Ohybový modul se následně vypočítá z rovnice (21) nebo (22).

$$E_f = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (21)$$

Kde E_f je ohybový modul pružnosti [MPa];

Δs rozdíl v průhybu mezi s'' a s' ;

ΔF rozdíl mezi silou F'' a silou F' při s'' a s' .

Použití rovnice (22)

$$E_f = 500 \cdot (\sigma'' - \sigma') \quad (22)$$

3.3 Zkouška Brinellova

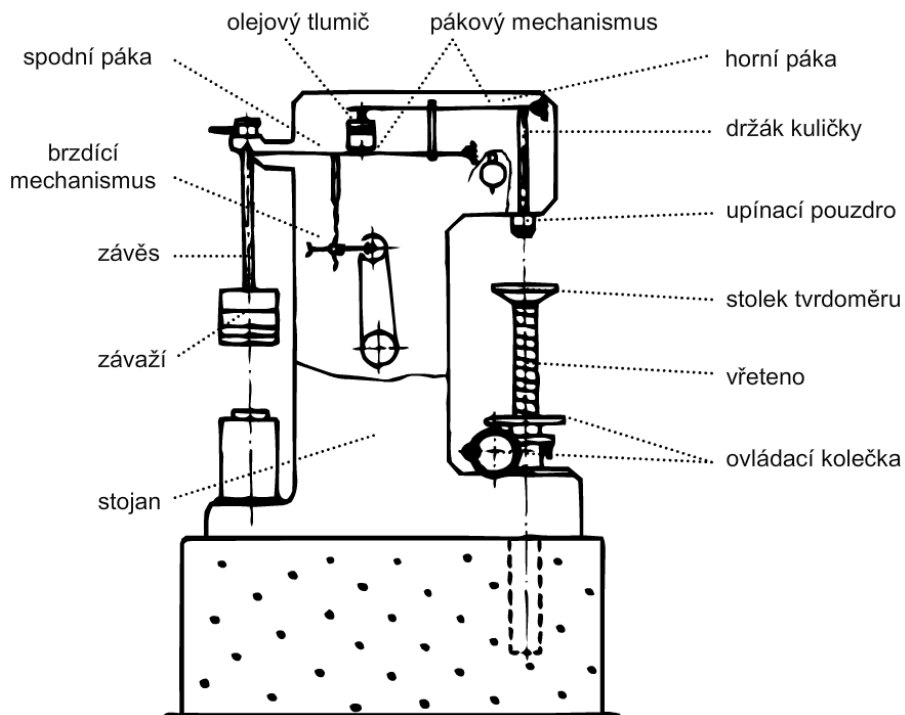
Autorem metody je švédský inženýr Johan August Brinell, který představil metodu na 2. mezinárodním kongresu o zkoušení materiálů roku 1900. Metoda je vhodná pro zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Princip je v zatlačování vnikacího tělesa (Obr. 11). Používá se kalená ocelová kulička (metoda HBS) nebo kulička z tvrdokovu (metoda HBW) o průměru D [27].

U zkoušeného tělesa se musí povrch opatřit tak, aby dovolil přesné měření průměru vtisku. Při úpravě je nutné dodržovat metody, při kterých bude povrch ovlivněn co nejméně ohřevem nebo tvářením za studena. Zkušební těleso musí mít nejméně osminásobek předpokládané hloubky vtisku. Síla působící na těleso je kolmá k jeho povrchu. Doba zatěžování musí být od počátku do plné hodnoty síly v rozmezí $2 \div 8$ s. Následné plné působení zkušebního zatížení je v rozmezí $10 \div 15$ s [27].

Vztah pro výpočet tvrdosti podle Brinella

$$HBS(HBW) = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_v^2} \right)} \quad (23)$$

kde F zkušební zatížení [N]
 D průměr kuličky [mm]
 d_v aritmetický průměr vtisku [mm]



Obr. 11: Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Brinella [27]

3.4 Zkouška Vickersova

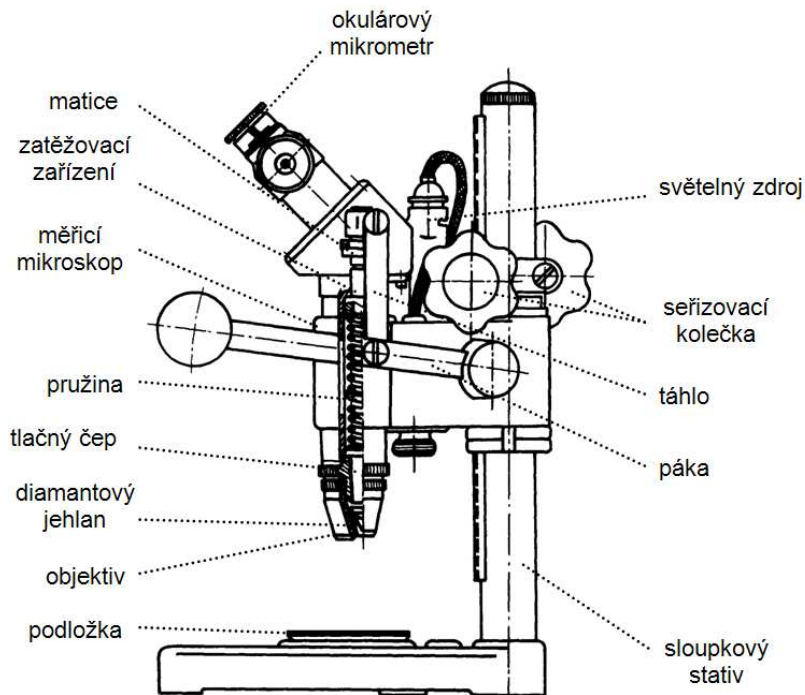
Tato zkouška byla vyvinuta roku 1922 a poprvé popsána R. L. Smithem a G. E. Sandlandem. Název získala podle firmy Vickers, ve které byl první tvrdoměr zkonstruován. Je to velmi citlivá a přesná metoda, která je rozšířená především v Evropě. Tato zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 6507.

Samotná Vickerova zkouška (Obr. 12) je založena na stejném principu jako zkouška Brinellova, liší se pouze vnikacím tělesem, kterým je v tomto případě diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Tento jehlan je vlačován silou, která je rozlišná dle typu zkoušky na měření tvrdosti podle Vickerse, měření tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení a měření mikrotvrdosti podle Vickerse [28].

Vztah pro výpočet tvrdosti podle Vickerse

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (24)$$

- kde HV tvrdost podle Vickerse;
 F zkušební zatížení [N];
 α vrcholový úhel vnikacího tělesa ($\alpha = 136^\circ$);
 d úhlopříčka vtisku v [mm];



Obr. 12: Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Vickerse [28]

3.5 Dynamická mechanická analýza (DMA)

Za pomoci dynamické mechanické analýzy je možné sledovat viskoelastické chování materiálu, který je zatížen oscilující silou. Oscilující síla je většinou sinusový průběh, jako je funkce teploty, během které je látka vystavena řízenému teplotnímu programu. Dynamickou mechanickou analýzu je možné považovat za jednu z nejcitlivějších metod schopnou charakterizovat mechanické chování materiálu. Počátky této metody lze datovat k roku 1909, kdy Poyting provedl své první experimenty s oscilující mechanickou silou za účelem sledování elasticity materiálů. DMA zaznamenala velký rozvoj díky příspěvku rychlého vývoje v počítačové technice, díky kterému je mnohem rychlejší a uživatelsky příjemnější automatický sběr dat i jejich následné vyhodnocení [29].

Na vzorek působí proměnlivé mechanické zatížení o určité frekvenci ω , které vytváří v

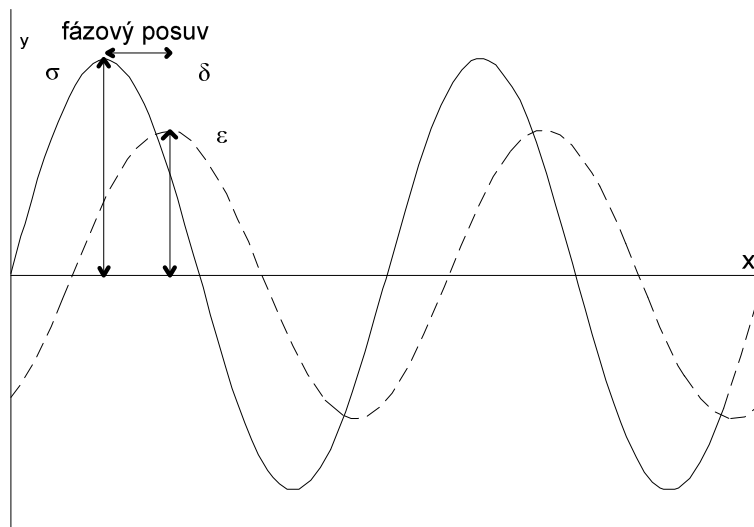
materiálu napětí σ . Napětí lze zapsat dle následující rovnice [30]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (25)$$

kde σ_0 je maximální amplituda napětí. Díky fázovému zpoždění napětí δ vzniká deformace vzorku ε , jež lze zapsat pomocí rovnice [29],[30],[31]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (26)$$

kde ε_0 je maximální amplituda deformace a lze znázornit za pomoci Obr. 13 [19].



Obr. 13: obecný průběh napětí a deformace u viskoelastického materiálu [19]

Komplexní modul pružnosti je možné formulovat rovnicí [20]:

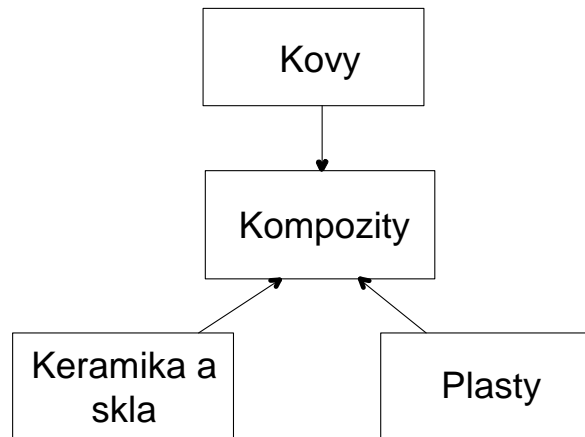
$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E^* = E' + iE'' \quad (27)$$

DMA umožňuje rozdělit viskoelastickou odezvu materiálu na reálnou část a imaginární část. Reálná část E' [MPa] představuje elastický modul. Imaginární část charakterizuje útlumovou (viskozitní) složku, neboli takzvaný ztrátový modul E'' [MPa]. V materiálu se během analýzy utváří dva nezávislé procesy. Elasticita znázorňuje schopnost materiálu pohlcovat energii a viskozita určuje schopnost rozptýlit energii. Mezi těmito dvěma moduly lze zavést ztrátový činitel $\tan \delta$ [29],[32],[33].

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (28)$$

4 Konstrukční materiály v elektrotechnice

V dnešní době je možné rozdělit konstrukční materiály do čtyř skupin dle Obr. 14. V každé uvedené skupině jsou zařazeny materiály s obdobnými vlastnostmi, které mají podobné výrobní a zpracovatelské technologie [34].



Obrázek 14: Rozdělení konstrukčních materiálů [34]

Pro kovové materiály je typický vysoký modul pružnosti, jsou houževnaté a mají značnou elektrickou a teplotní vodivost. Oproti těmto vlastnostem jsou náchylné ke korozi. Vlastnosti kovových materiálů leží mezi keramikou a skly a zároveň mezi plasty [34].

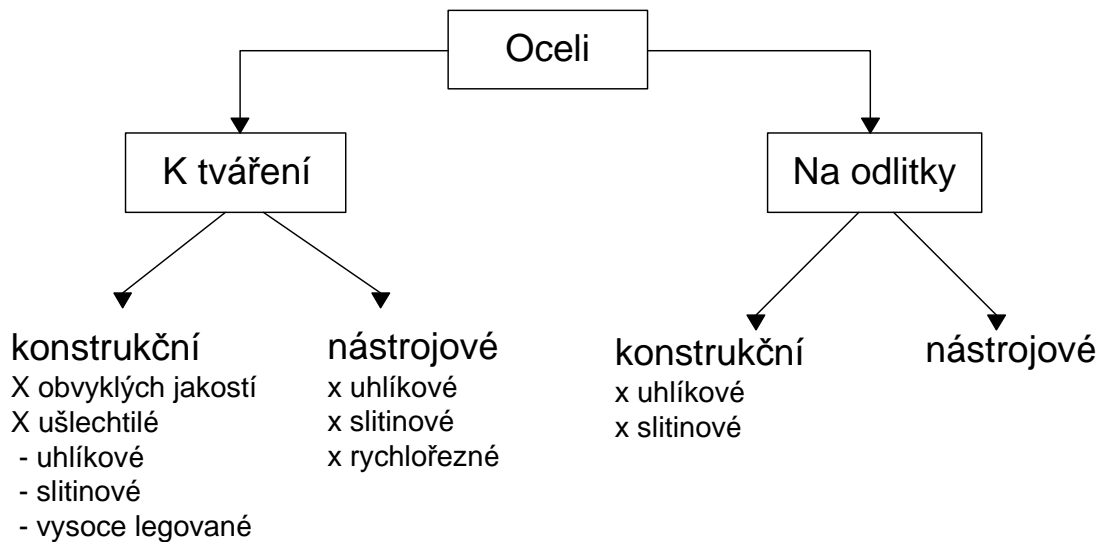
Keramické a skleněné materiály mají též vysoký modul pružnosti, ale jejich konstrukční omezení je dáno především jejich křehkostí a s tím musí konstruktér dále počítat. Tyto materiály vykazují dobrou odolnost proti opotřebení, mají vysokou tvrdost a tuhost a mohou se využívat i při vysokých teplotách [35].

Kompozitem klasifikujeme materiál, který je kombinací dvou a více komponent u kterých se výrazně liší jejich fyzikální a chemické vlastnosti. Jednotlivé vlastnosti jsou dány především použitým typem matrice a výztuže [36].

Plasty všeobecně jsou velice závislé na teplotě. Jedná se o materiály pevné a lehké, které mají nízký modul pružnosti. Jsou velmi odolné proti odírání a proti korozi [34].

4.1 Kovy

Oceli je možné rozřadit do mnoha skupin a nejvhodnější volbou bude rozdělení ocelí na konstrukční oceli. Ty jsou využívány jako materiály používané k výrobě součástí strojů a zařízení. Rozhodující jsou u nich především jejich mechanické vlastnosti jako vysoká mez průtažnosti nebo prokalitelnost. Konstrukční oceli lze dále rozdělit podle Obr. 15 [2].



Obr. 15: Rozdělení ocelí [34]

Oceli konstrukční tvářené se dále rozdělují na uhlíkové nebo ušlechtilé. Obsah uhlíku v konstrukčních ocelích uhlíkových je maximálně do 0,7 %, jen výjimečně jeho obsah vyšší. Konstrukční oceli ušlechtilé oproti běžným ocelím vykazují větší čistotu a pečlivější výrobu s kontrolou. Tyto ocele je tepelně zpracovávají a dále se rozdělují dle součtu legovacích prvků na nízkolegované, středně legované a vysoce legované. Tvářené oceli se používají jako plechy pro stator turbogenerátorů, svorníky transformátorů, hřídele, malé rotory a stožáry vvn [6].

Oceli konstrukční na odlitky se využívají v případech, kdy jde o složitější tvary. Při obsahu uhlíku do 0,25 % jsou stále ještě svařitelné. Tyto odlitky se používají pro výrobu částí elektrických strojů jako například pánve ložisek turbogenerátorů, rotory a tělesa ložisek synchronních generátorů, kostry asynchronních motorů. Pro kostry asynchronních motorů se dodávají ocelové odlitky, které zajišťují nejmenší magnetickou indukci [6].

Litiny mají kromě vyššího obsahu uhlíku (více než 2%) i větší množství příměsí. Oproti surovému železu, kde se klade důraz především na chemické složení, jsou pro litiny důležité především jejich mechanické a technologické vlastnosti. Na základě chemického složení a podle tuhnutí taveniny slitiny železa s uhlíkem a dalšími prvky vzniká eutektikum. Eutektikum se rozumí tuhá směs dvou látek, jejichž krystaly se při tuhnutí vytvářejí společně. Podle typu eutektiku rozlišujeme litiny na šedé a bílé [2],[34].

Neželezné kovy jsou takové, které neobsahují železo. V praxi se čisté využívají jen výjimečně a častěji se najde jejich využití jako slitin. Podle jejich hustoty je můžeme dělit na lehké a těžké, dle teploty tavení na vysokotavitelné a nízkotavitelné a podle elektrické vodivosti na vodiče, izolanty a polovodiče [37].

Hliník a jeho slitiny

Čistý hliník se v přírodě jako samostatná látka nevyskytuje a získává se ze sloučenin. Hliník se vyrábí z bauxitu a to ve dvou fázích. První fází je získání čistého oxidu hlinitého Al_2O_3 a z něho se následně elektrolýzou vyrábí hliník o čistotě 99,5 %. Čistý hliník má velmi dobrou odolnost proti korozi a povětrnostním vlivům, ale má horší obrobiteľnosť jelikož se maže [38].

Nejběžněji využívanou tvářenou hliníkovou slitinou je dural. Ten má široké uplatnění jako konstrukční materiál při výrobě automobilů, letadel a kolejových vozidel. Pokud je na materiál požadována větší pevnost, používá se dural s vyšším obsahem hořčíku, jenž se dále nazývá superdural. Slitiny hliníku s mědí se používají především pro zvýšení pevnosti, tažnosti a tvrdosti. Tyto slitiny mají obsah mědi kolem 10 % [38].

Hořčík a jeho slitiny

Hořčík je kov, který podléhá chemickým vlivům a vyznačuje se slučivostí s kyslíkem. Vyskytuje se jako stříbrobílý až šedý kov, tažný, slévatelný, jenž se ve vlhkém prostředí pokrývá vrstvou oxidu. Nejvyužívanější slitinou je elektron, který se využívá k tváření i k výrobě odlitků. Elektron má pevnost 300 MPa a patří mezi nejlehčí slitiny neželezných kovů, smrštění u něj dosahuje hodnoty 1,4 %. Ochranu proti korozi je možné zlepšit lakováním nebo chromováním [38].

Měď a její slitiny

Čistá měď se v přírodě nachází pouze vzácně, proto se získává především ze sloučenin. Nejčastěji se měď vyskytuje ve formě sulfidů, dalšími významnými minerály jsou kuprit a malachit. Měď je závislá na okolních podmínkách a ve vlhkém prostředí se působením kyslíku, oxidu uhličitého a vlhkosti pokrývá měděnkou. Slitiny mědi jsou z 80 % zastoupeny mosazí. Ty je možné rozdělovat podle chemického složení na dvousložkové a vícenosložkové a dle způsobu zpracování na tvářené a slévárenské. Bronzy jsou především slitiny mědi s cínem nebo jinými kovy. Cínové bronzy obsahují maximálně 20 % Sn a bronzy k tváření do 9 % Sn. Jejich využití je především na pružiny, membrány a součásti pro chemický a elektrotechnický průmysl [37].

4.2 Plasty

V dnešní době se vyrábí velké množství plastů a pro lepší orientaci mezi jednotlivými typy se rozdělují podle chování při zahřívání. Podle tohoto rozdělení máme dvě skupiny a těmi jsou termoplasty a reaktoplasty (Tab. 7) [38].

Tab. 7: Rozdělení plastů [38]

skupina	změna vlastností	příklad plastů	využití
termoplasty (tepelně tvárné)	Působením tepla měknou a působením chladu opět tuhnou, mění se vratně	Polystyren PVC Organické sklo	Spotřební průmysl
reaktoplasty (tepelně tvrditelné)	Působením tepla dochází k chemické reakci a plasty se vytvrzují, mění se nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu	Kartit Umakart Epoxydy Skleněné lamináty Polyestery	Strojírenství Doprava Chemický průmysl

Termoplasty při zahřání měknou a po ochlazení tuhnou. Při následujícím zahřátí opětovně termoplasty měknou a dají se přetvářet i několikrát, čehož se využívá především při recyklaci. Reaktoplasty jsou oproti nim tvrditelné teplem, při zvýšené teplotě nejprve měknou, ale následně se vytvrdí v požadovaném tvaru. Surová hmota je v prášku nebo tabletách, které se vkládají do forem. Hmota při zahřívání následně měkne a s účinkem tlaku vyplňuje prostory formy a dostává požadovaný tvar [39].

Polystyren patří mezi nejlevnější a díky jeho vlastnosti se řadí i mezi nejpoužívanější termoplasty. Je tvrdý a dobře odolný proti kyselinám a zásadám. Polystyren během stárnutí křehne a objevují se v něm trhliny. Je to čistá, tvrdá lesklá hmota, málo houževnatá, která při nárazech praská a měkne při teplotách kolem 80 °C. Z polystyrenu se vyrábí široké spektrum výrobků. Jsou to obaly a krabice pro různé přístroje a dále se využívá jako tepelný izolant. Z termoplastů ho využitím předstihují pouze polyethylen, polypropylen a PVC. Kvůli vysoké hořlavosti polystyrenu se do něj přidávají bromované zpomalovače hoření [40].

Polyvinylchlorid (PVC) je jedním z nejdůležitějších termoplastů. Vyrábí se polymerizací vinylchloridu za použití katalyzátoru na bázi volných radikálů. Při zpracování je velice citlivý na přehřátí, jelikož snadno odštěpuje chlorovodík. Na tvrdé výrobky se využívá

neměkčené PVC ve formě tyčí a trubek a měkčené PVC se používají jako folie, profily a opláštění elektrických vodičů. PVC je možné zpracovávat i ve formě plastisolů pro nanášení korozivzdorných vrstev na podvozky automobilů [41].

Polymetylmetakrylát (PMMA) se v běžné praxi označuje jako organické sklo. Výchozími surovinami jsou aceton, kyanovodík a metanol, ze kterých se vyrábí metylester kyseliny metakrylové. Následnou polymerací se získává PMMA. Vyniká svými vlastnostmi, jako jsou propustnost světla, která dosahuje až 92%, je lehké, netříštivé, pevné a poměrně tvrdé. Organické sklo se využívá při výrobě kabin, oken letadel a autobusů, ochranných štítů dále nachází uplatnění i pro reklamní účely a umělé klouby [42].

Epoxidová pryskyřice je značně podobná nenasyčeným reaktoplastickým polyesterovým pryskyřicím. Čisté epoxidové pryskyřice jsou snadno tavitelné a rozpustné žlutohnědé hmoty bez většího praktického využití. Jejich využití nastává s jejich schopností vytvrzování na mechanicky pevné, netavitelné a nerozpustné makromolekulární hmoty s velmi hustě zasíťovanou prostorovou strukturou. Epoxidové pryskyřice i přes vyšší cenu nahrazují v elektrotechnice starší fenoplasty a aminoplasty. V elektrotechnice se používají především pro svoji odolnost proti vlhkosti a plísním a společně s velkou tepelnou odolností a pevností se používají ve stále širších oblastech použití [8],[42].

Polyesterové pryskyřice jsou kondenzační polymery vznikající esterifikací vícekarbonových kyselin s vícemocnými alkoholy. Podle toho jestli jsou reagující složky dvoufunkční nebo vícefunkční se získávají plastické materiály různých vlastností. Vytvrzování polyesterových pryskyřic je založeno na směsných polymeracích, díky kterým reagují nenasyčené skupiny reaktivních rozpouštědel s nenasyčenými základními polyestery. Polyesterové pryskyřice jsou svými vlastnostmi podobné epoxidovým pryskyřicím. Oproti nim jsou cenově výhodnější, ale mají své nevýhody jako větší smrštitivost a horší průběh tepelných charakteristik. Většina druhů se zpracovává jako licí, zalévací a impregnační prostředky. Dále je jejich využití především jako pojiva pro skleněné vrstvené materiály a lisovací hmoty [8].

4.3 Kompozitní materiály

Kompozitními materiály se charakterizují materiály, které jsou složeny ze dvou či více složek, přičemž každá z těchto složek plní jinou specifickou funkci a má především jiné mechanické a fyzikální vlastnosti. Kompozitní materiály se charakterizují především dle nosné části a matrice. Matrice je kontinuální složkou kompozitu a vytváří vnější tvar tělesa. Nosná část je diskontinuální složka kompozitu, kde není možné přejít z jednoho místa výztuže

na druhou část v rámci dané složky výztuže a je nutné pokračovat přes matici. Vhodnou volbou matrice a nosné části je možné dosáhnout vysoké úrovně užitných vlastností kompozitů. Hlavní specifické funkce matrice lze vyjádřit několika body [43]:

- spojuje vlákna v kompaktní celek
- vytváří povrch tělesa a estetický vzhled včetně barvy
- zprostředkuje zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušeni vláken a přemostuje trhliny ve vláknech

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů je možné vyjádřit na základě nejpoužívanější organické polymerní matrice, kterou rozdělujeme na dvě základní skupiny. Termosety (Tab. 8) zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje odolnost proti creepu a vyšším teplotám. U konstrukčních aplikací je tento typ vláknových kompozitů převládající. Jednotlivé mechanické vlastnosti termosetů jsou uvedeny v tabulce [35],[43].

Tab. 8: Mechanické vlastnosti vybraných termosetů [43]

	ρ [$10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	E_t [GPa]	σ_{Pt} [MPa]	$\varepsilon_{m,krit}$ [%]
epoxidová pryskyřice	1,1 – 1,4	2,1 – 6,0	35 – 90	1 – 10
polyestery	1,1 – 1,5	1,3 – 4,5	45 – 85	1 – 5
fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50 – 60	1 – 3
polyimidy	1,2 – 1,9	3,0 – 3,1	80 – 190	2 – 40

Termoplasty (Tab. 9) jsou po vytvrzení tuhé, ale se zvyšující teplotou měknou a po překročení kritické teploty tečou. Charakterizují je dlouhé lineární molekuly vytvořené opakováním stavebních jednotek. Oproti termosetům mají viskozitu o 2 až 4 řády vyšší, což zapříčiňuje vznik defektů. Pokud se použijí předimpregnovaná vlákna, zvýší se pevnost v tahu, ale i cena termoplastu. Tyto matrice se nacházejí u plněných plastů a částicových kompozitů. Jejich mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce [35],[43].

Tab. 9: Mechanické vlastnosti termoplastů [43]

	ρ [$10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	E_t [GPa]	σ_{Pt} [MPa]	$\varepsilon_{m,krit}$ [%]
Polypropylen	0,9	1,1 – 1,5	28 – 41	10 – 700
Polyamid	1,42	2,4 – 2,8	76 – 83	60 – 300
Polykarbonát	1,21	2,1 – 2,8	62 – 76	110 – 130
Polyether	1,31	3,8	70	50 – 130

4.4 Kritéria volby vhodných materiálů pro praktické aplikace

Pevnost materiálu je nejdůležitějším hlediskem při výběru jednotlivých materiálů. Pokud konstruktér vybrá materiál na základě pevnosti, má široký výběr jednotlivých materiálů a musí výběr zúžit na základě následujících požadavků [34]:

- **Materiálové charakteristiky.** Mezi základní charakteristiky se považují houževnatost, odolnost proti opotřebení, únavové vlastnosti a působení teploty.
- **Technologie výroby.** Zde je rozhodující vliv technologie na složení, strukturu a mechanické vlastnosti. Především jde o využití bezodpadových technologií jako je prášková metalurgie.
- **Materiálové a výrobní náklady.** Do nákladů není možné započítávat pouze náklady spojené za materiál a technologii na jeho využití. Kvůli ekonomičnosti provozu je nutné započítávat i dopravu a povrchové úpravy.
- **Ekologičnost zvoleného materiálu.** Při výběru materiálu se musí brát zřetel na přímé i nepřímé dopady materiálu na životní prostředí. Tato položka má mnoho aspektů a je složité ji kvalifikovat.

5 Měření mechanických vlastností pro konkrétní aplikaci

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na měření mechanických vlastností elektroizolačního materiálu. Tento materiál se používá na výrobu desek plošných spojů a jde o skleněnými vlákny vyztužený epoxidový laminát. Cílem tohoto experimentu bylo ověření působení navlhování na materiál v závislosti na době stárnutí. Z dodaných desek byly vytvořeny zkušební vzorky o velikost 50x12x1.5 mm pro měření metodou DMA (Obr. 16) a dále zkušební vzorky o velikosti 45x15x1.5 mm pro univerzální zkušební stroj (Obr. 17). Obě tyto metody se měřily v režimu tříbodového ohybu. Jednotlivé zkušební vzorky byly umístěny ve vlhkosní komoře, kde na ně působila 93 % vlhkost při teplotě 40 °C. U metody DMA byly zaznamenávány změny teploty skelného přechodu oproti dodanému stavu a dále se vyhodnocoval Youngův modul během stress – strain analýzy. Na univerzálním zkušebním stroji se hledala korelace výsledků mezi DMA a univerzálním zkušebním zařízením.



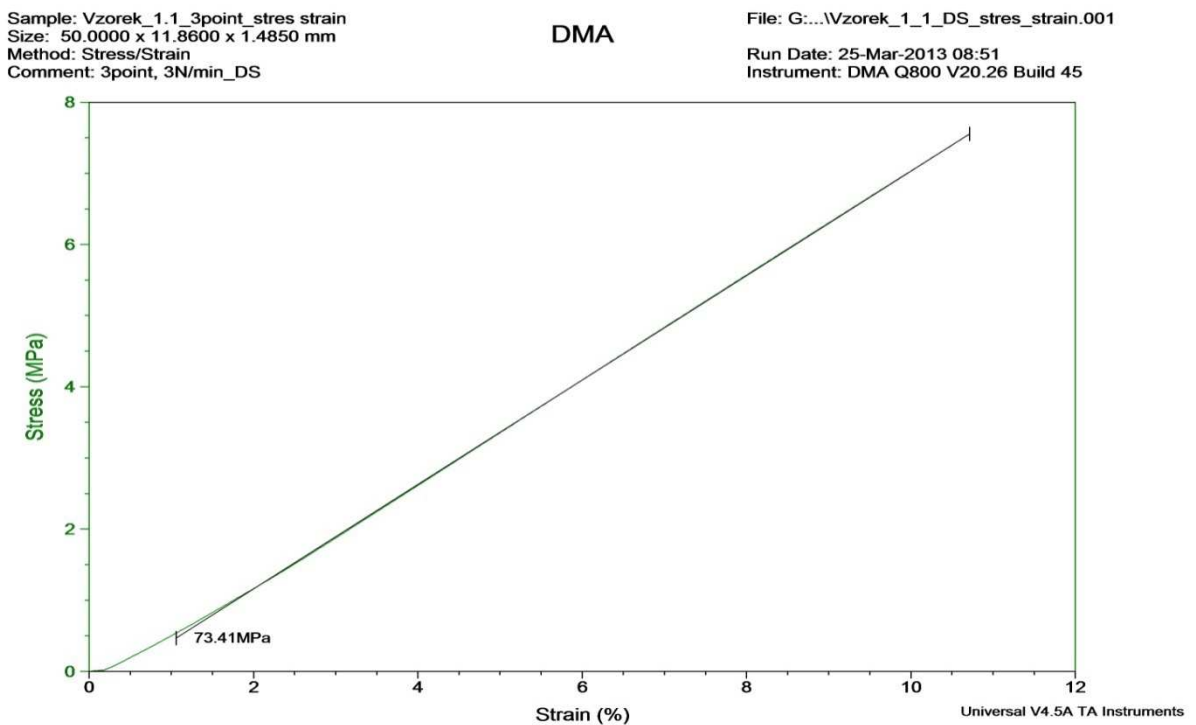
Obr. 16: TA Instruments Q800



Obr. 17: Labtest 3.030

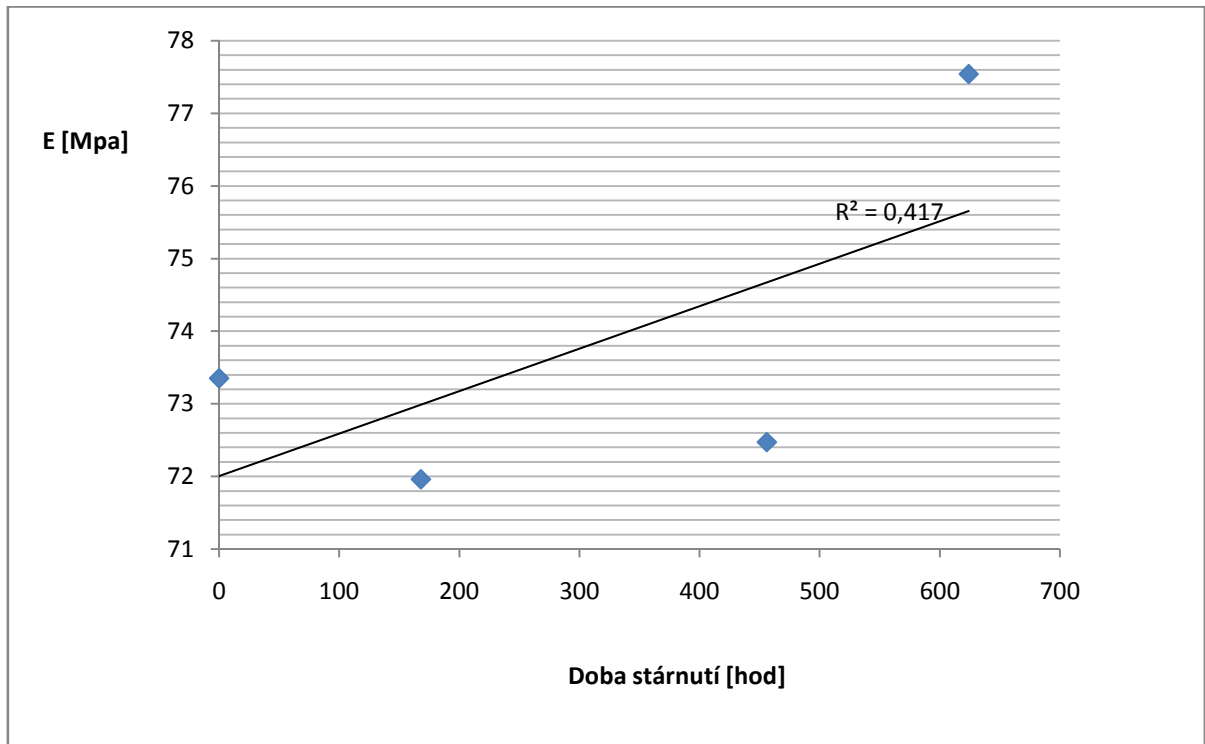
5.1 Měření pomocí DMA

Laboratorní přístroj TA Instruments Q800 má i vlastní vyhodnocovací software TA Universal Analysis, ve kterém se analyzují jednotlivá měření. Při analýze se definují požadované signály v závislosti na proměnné. Měření Youngova modulu se provádělo na laboratorním přístroji TA Instruments Q800. Jednotlivé vzorky byly umístěny do držáku pro měření tříbodového ohybu. Vzorky se podrobovaly stress – strain analýze (Obr. 18), kde působila na vzorek síla v rozmezí 0 – 18 N při teplotě 30°C a zaznamenávala se materiálová odezva. Síla lineárně vzrůstala rychlostí 3 N/min. Na Obr. 18 je uveden příklad výsledného průběhu pro vzorek 1_1.



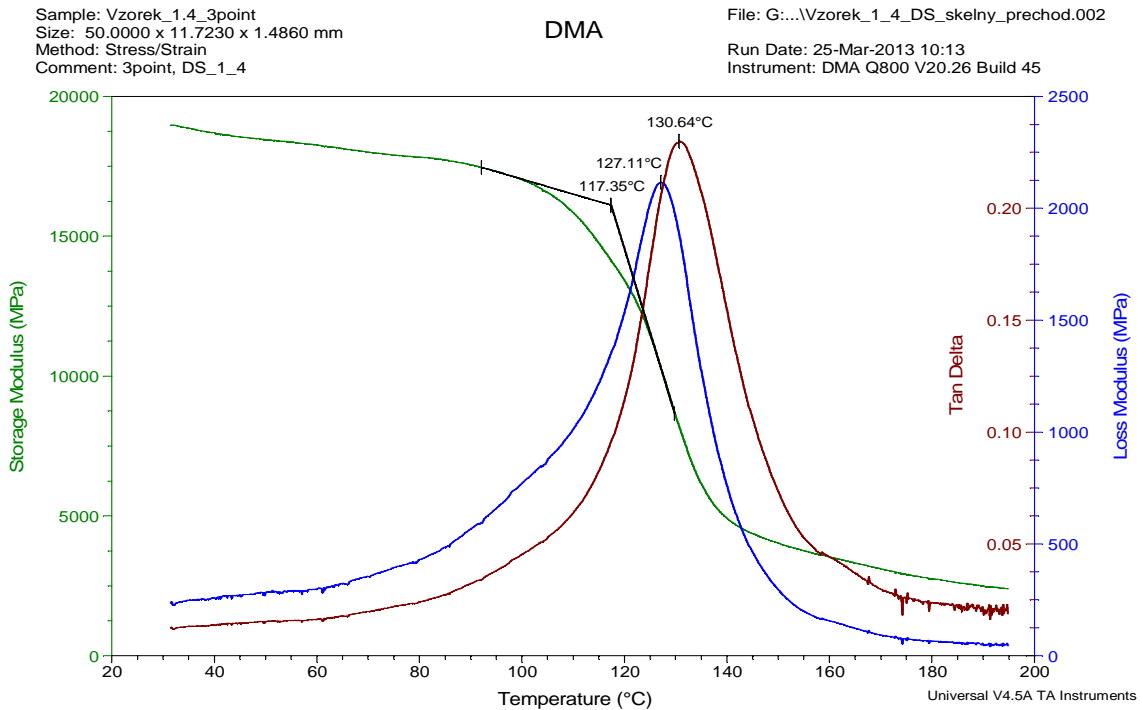
Obr. 18: Stress - strain analýza

Jednotlivá měření jsou zaznamenána na Obr. 19. Z grafu je patrné, že nelze prokazatelně určit tendenci vývoje Youngova modulu a proto bylo nutné použít doplňující měření skelného přechodu.



Obr. 19: Vývoj Youngova modulu

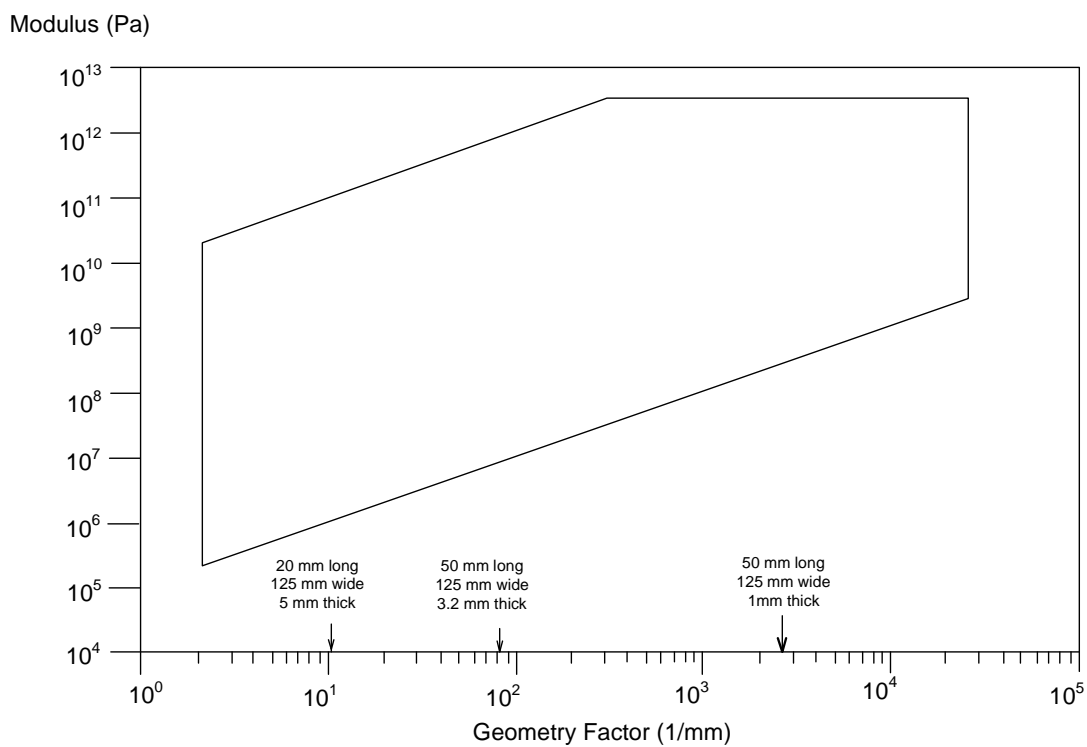
Vyhodnocování skelného přechodu (Obr. 20) se provádělo na základě měření pomocí metody DMA. K vyhodnocení této metody je možno použít tří různých parametrů: elastický modul, ztrátový modul a ztrátový činitel v závislosti na teplotě. Z hlediska vyhodnocení se použil ztrátový činitel, který představuje tlumící vlastnost materiálu. Materiál podléhal dlouhodobému navlhování a proto se dala předpokládat změna teploty skelného přechodu. Jelikož se analyzovaly mechanické vlastnosti, bylo by vhodnější využít pro hodnocení elastický modul. Protože však jeho hodnota může být s ohledem na ne zcela lineární počáteční základní linii tohoto modulu zcela jednoznačná, byl pro stanovení skelného přechodu využit parametr ztrátového činitele.



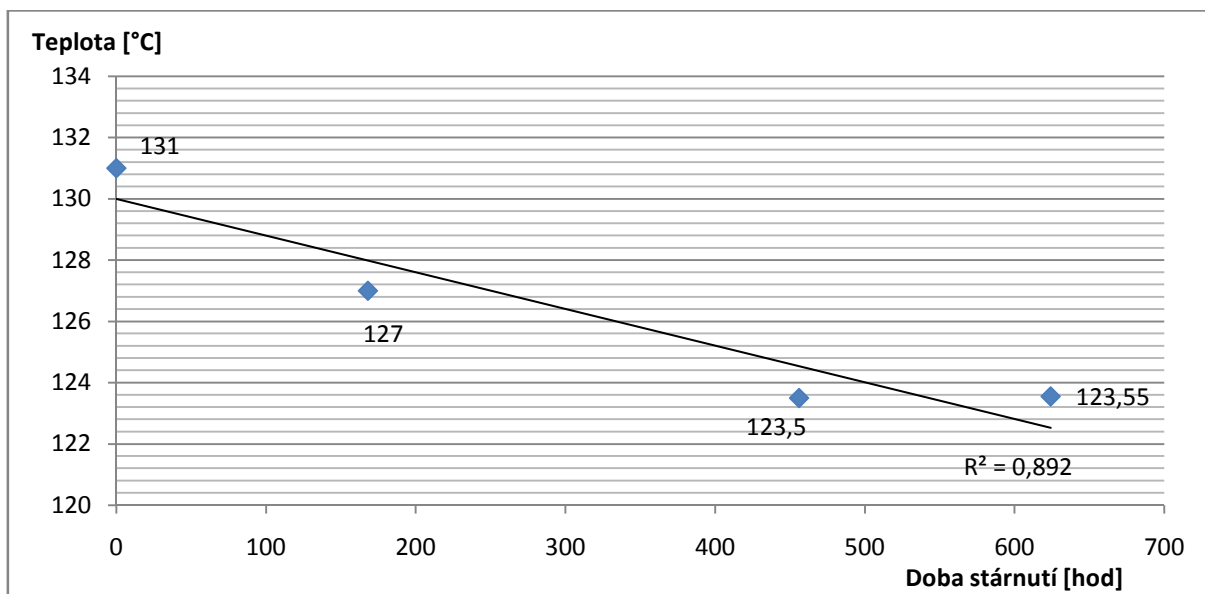
Obr. 20: Vyhodnocení skelného přechodu

Měření skelného přechodu se provádělo s četností $n = 3$, kde rozměry vzorků byly zvoleny na základě výpočtu geometrického faktoru (29), jenž určuje citlivost měřicího přístroje TA Instruments Q800. Hodnota vypočítaná dle vztahu (29) pak musela odpovídat umístění v grafu (Obr. 21). Při vyhodnocení se průměrovala hodnota naměřených vzorků a byla zaznamenávána do grafu (Obr. 22) v závislosti na době stárnutí. Za pomoci spojnice trendu je z grafu vyplývající, že hodnoty skelného přechodu klesají téměř s lineární tendencí. Teplota skelného přechodu, která byla v dodaném stavu 131 °C, se měnila ze začátku téměř lineárně a ustálila se na hodnotě 123,5 °C.

$$GF = \frac{L^3}{48I} \left[1 + \frac{12}{5} \cdot (1 + \nu) \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right] \quad (29)$$



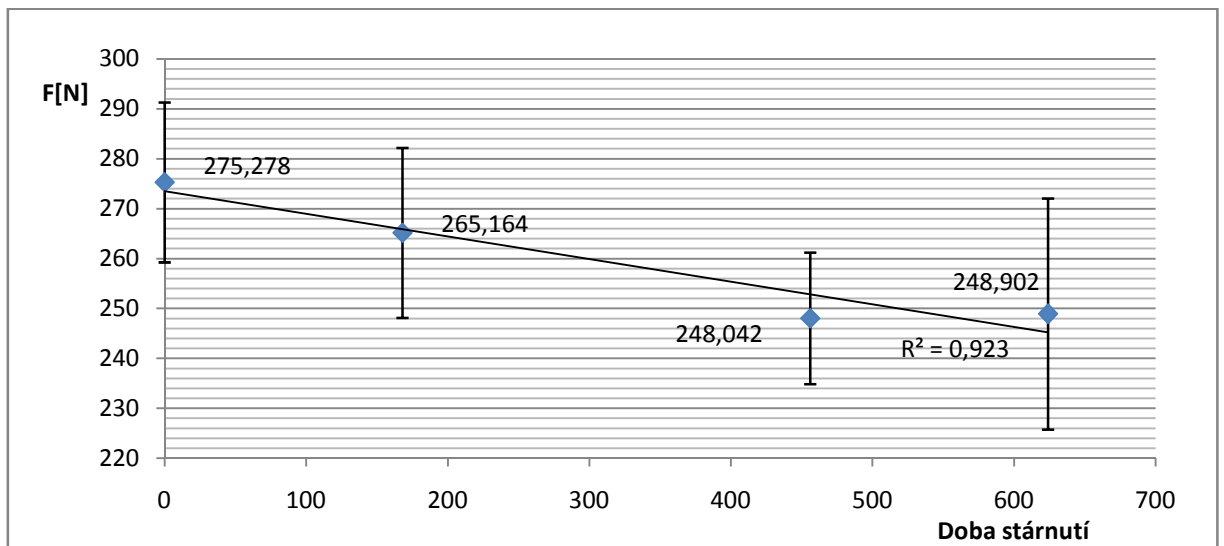
Obr. 21 Znáornění geometrického faktoru



Obr. 22: Vývoj teploty skelného přechodu

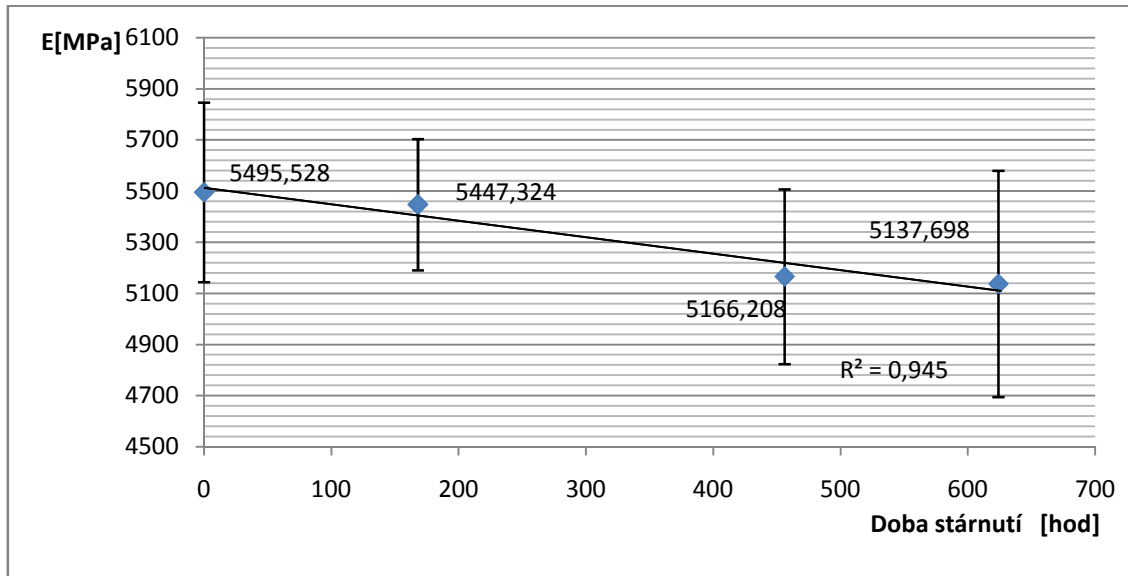
5.2 Měření pomocí univerzálního zkušebního stroje

Z makroskopického hlediska bylo provedeno měření na univerzálním zkušebním stroji v režimu třibodového ohybu. Tato metoda byla použita především pro vzájemnou korelaci dat Youngova modulu metodou DMA a laboratorním přístrojem Labtech 3.030. Rozměry vzorků, vzdálenosti podpěr a rychlost posunu byly stanoveny dle normy ČSN EN ISO 14125. Dále byla zjišťována maximální síla F_{\max} potřebná k deformaci vzorku o 80 %. Z hlediska navrhování vzorku se předpokládalo, že maximální síla potřebná k porušení vzorku bude mít klesající tendenci. Tento předpoklad se naplnil s tím, jak je patrné z (Obr. 23), že průměrné hodnoty jednotlivých měření v závislosti na stárnutí klesaly. U jednotlivých měření vznikaly rozptyly, což mohlo být způsobeno i mírnými odchylkami při ukládání vzorků na podpěry.



Obr. 23: Vývoj průměrné F_{\max} v závislosti na stárnutí

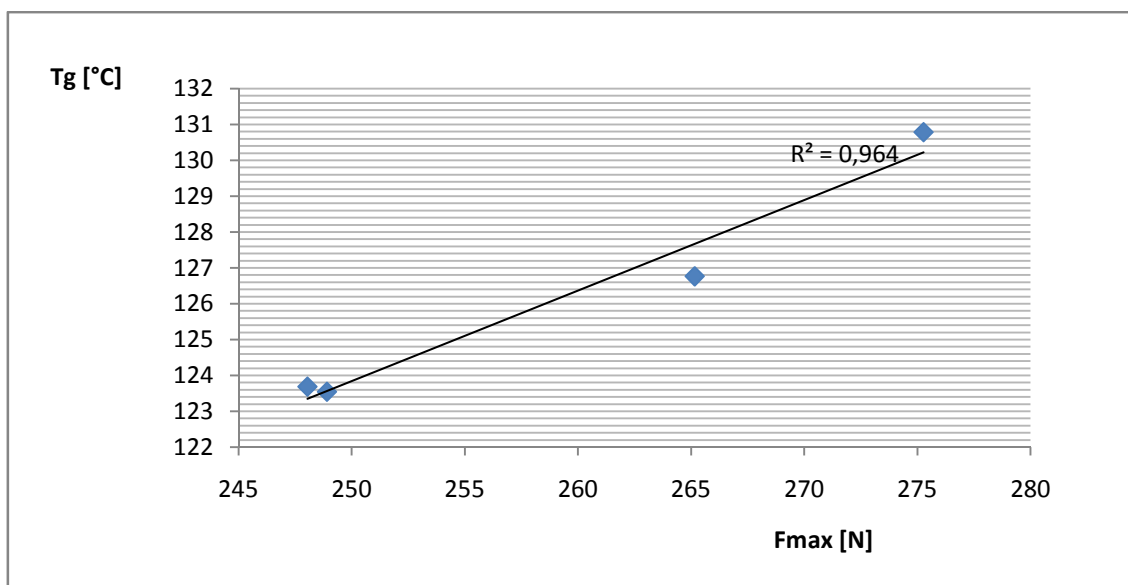
Vývoj Youngova modulu v závislosti na stárnutí (Obr. 24) byl měřen současně při měření F_{\max} . Z grafu je patrné, že křivka trendu a především hodnota spolehlivosti R^2 má podobnou velikost. Hlavní nevýhoda u měření na univerzálním zkušebním stroji byla především v rozdílech směrodatných odchylek. Variabilita dosahovala hodnot přibližně 6 %, čímž ještě splňovala podmínky koeficientu do 10 % a svědčila o malé variabilitě.



Obr. 24: Vývoj Youngova modulu v závislosti na stárnutí

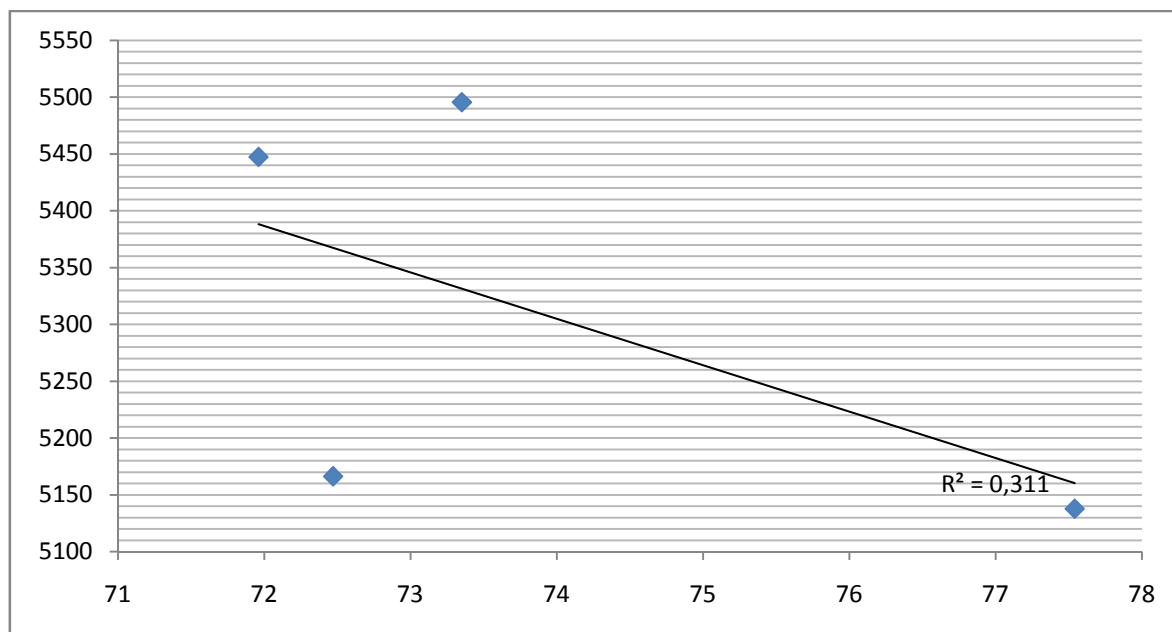
5.3 Korelace dat mezi DMA a univerzálním zkušebním strojem

Během experimentu byla snaha prokázat vzájemnou korelaci dat u změny teploty skelného přechodu a maximální síle potřebné k deformaci vzorku o 80 % na univerzálním zkušebním stroji. Z grafu je patrná vzájemná korelace hodnot (Obr. 25), kdy díky hodnotě spolehlivosti $R^2 = 0,964$ je možné předvídat hodnoty následujícího stavu za použití pouze jedné metody získávání dat. Z hlediska časové náročnosti trvalo získání hodnot z jednoho vzorku použitím metody DMA 1,5 hodiny, analýza vzorku na univerzálním zkušebním stroji trvala přibližně 2 minuty.



Obr. 25 Korelace hodnot mezi Fmax a teplotou skelného přechodu

Druhá korelace naměřených hodnot se předpokládala u vyhodnocení Youngova modulu v závislosti na době stárnutí. Zde je patrné (Obr. 26), že plánovaných hodnot nebylo dosaženo. Měřením DMA byly zjištěny hodnoty, které neprokazovaly závislost Youngova modulu na době stárnutí. Z tohoto důvodu nemohly hodnoty vykazovat možnost vzájemné korelace a určit spojnici trendu s její spolehlivostí.



Obr. 26 Závislost Youngova modulu měřením DMA a univerzálním zkušebním strojem

Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámení se se základními mechanickými vlastnostmi elektroizolačních materiálů. Pro měření konkrétní aplikace bylo nutné se seznámit nejen s jednotlivými metodami pro měření, ale i v následném dohledání potřebných informací v příslušných normách pro konkrétní aplikaci.

Analýza kompozitního materiálu probíhala z mikroskopického hlediska na měřicím přístroji TA Instruments Q800 a z makroskopického hlediska na univerzálním zkušebním stroji Labtech 3.030. U dynamické mechanické analýzy v režimu třífázového ohybu se měřila hodnota teploty skelného přechodu a vývoj Youngova modulu při stress – strain analýze. Na univerzálním zkušebním stroji v režimu třífázového ohybu se vyhodnocoval Youngův modul a maximální síla potřebná k deformaci vzorku o 80 %.

Během měření teploty skelného přechodu bylo zřejmé působení vlivu navlhování v závislosti na době stárnutí. Tento jev bylo možné vyhodnocovat i z hlediska klesající síly potřebné k deformaci vzorku.

Dle předpokladu byla zjištěna korelace hodnot teploty skelného přechodu v závislosti na maximální síle zjištěné na univerzálním zkušebním stroji. Díky téměř lineární závislosti je možné predikovat následující hodnoty za použití pouze jedné z těchto dvou metod. Druhá hypotéza byla předpokládána u vyhodnocení závislosti Youngova modulu a korelace hodnot mezi univerzálním zkušebním strojem a DMA. Bohužel tento předpoklad se nepodařilo potvrdit, neboť hodnoty u DMA vykazovaly náhodný charakter.

Seznam literatury

- [1] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [2] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [4] DUŠÁNEK, Václav. *Elektrotechnologie*. Trutnov: Střední průmyslová škola a střední odborné učiliště Trutnov, 2005.
- [5] KVÍTEK, Emil. *Materiály pro elektrotechniku*. Univerzita Pardubice: Fakulta dopravní Jana Pernera, 2007
- [6] MENTLÍK, Václav. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 133 s. ISBN 80-708-2227-9.
- [7] P. TRNKA, R. POLANSKÝ. Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír* [online]. [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/389/1/r0c1c13.pdf>
- [8] HASSDENTEUFEL, Josef a Karl KVĚT. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha, 1967, 857, [2] p.
- [9] Ministerstvo životního prostředí České republiky: Integrovaný registr znečišťování. *Fluorid sírový* [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://www.irz.cz/repository/latky/fluorid_sirovy.pdf
- [10] KAZELLE, Jiří. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*. Vysoké učení Technické v Brně, 2011.
- [11] Nezisková organizace Arnika. *Azbest* [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://arnika.org/azbest>
- [12] Ministerstvo životního prostředí České republiky: Integrovaný registr znečišťování. *Azbest* [online]. [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.irz.cz/repository/latky/azbest.pdf>
- [13] Katedra materiálu a strojírenské metalurgie: Strojní fakulta ZČU: Tepelné zpracování a slinování. *Keramické a kompozitní materiály* [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/keramika2.pdf>
- [14] MICROWAVE CERAMICS. *Keramické materiály a jejich použití v*

- elektrotechnice* [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.t-ceram.com/CSVTS-2006.pdf>
- [15] Vysoké učení technické v Brně: Chempoint. *Základní látky v lakových vrstvách skleněných negativů* [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/data/files/prezentace-paulusova-84.pdf>
- [16] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. *Mechanické zkoušení kovů* [online]. [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/teorie.htm
- [17] MASARYKOVA UNIVERZITA PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA. *Mechanické vlastnosti pevných látek* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/chemsekcce/c8870/pdf/Uloha12_mechan_vl.pdf
- [18] Vysoké učení technické v Brně: FAKULTA CHEMICKÁ. *Mechanické vlastnosti pevných látek* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha6.doc
- [19] Ústav materiálových věd a inženýrství v Brně. *Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: www.ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/5FM/FM2011.ppt
- [20] Vysoké učení technické v Brně: FAKULTA CHEMICKÁ. *Zkouška ohybem* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaeto/uloha9.doc
- [21] Jihočeská univerzita: Katedra technické výchovy. *VRUBOVÁ ZKOUŠKA HOUŽEVNATOSTI RÁZEM V OHYBU* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_tech/externi/kat_tech_2146/2.4.1_vrubova_zkouska_houzevnatosti_razem_v.doc
- [22] Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: Fakulta stavební. *Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.fast.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fast/206/cs/okruhy/resene-projekty/frvs-2011-2894/zkouska-razem-v-ohybu-metodou-charpy.pdf>
- [23] Střední průmyslová škola strojírenská a Jazyková škola Kolín. *Pružnost a pevnost* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/documents/MEC_kratochvil/PRU%C5%BDNOST/06_PRUZNOST_A_PEVNOST_Static%C3%A1%20zkou%C5%A1ka%20tahem.pdf

- [24] Ústav materiálových věd a inženýrství v Brně. *Zkoušení mechanických vlastností materiálů: zkouška tahem* [online]. [cit. 2013-02-21]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
- [25] Fyzikální olympiáda. *Mechanika pružného tělesa* [online]. [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>
- [26] Jihočeská univerzita: Katedra technická. *Statická zkouška ohybem* [online]. [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_tech/externi/kat_tech_2146/2.2.2_staticka_zkouska_ohybem.doc
- [27] Masarykovo univerzita: Katedra technické a informační výchovy. *Zkouška tvrdosti podle Brinella* [online]. [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: http://wrack.ped.muni.cz/prezentace_kat/brinell/
- [28] Ústav materiálových věd a inženýrství v Brně. *Zkoušení mechanických vlastností materiálů: zkouška tvrdosti podle Vickerse* [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
- [29] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 9788073002329.
- [30] Digital Library and Archives. *Dynamic Mechanical Analysis* [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-71498-94026/unrestricted/etd_Chapt_6.pdf
- [31] SONG JIANCHENG. Dynamic mechanical analysis of degradation of rotating machine composite insulation. *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001): 2001 Asian Conference on Electrical Insulation Diagnosis (ACEID 2001) : 33rd Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in Systems : November 19-22, 2001, Hotel Sungarden Himeji, Himeji, Japan*. Piscataway, New Jersey: IEEE Service Center, c2001. ISSN 4-88686-053-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=973777>
- [32] Thermal methods consultancy. *Introduction to dynamic mechanical analysis* [online]. [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://www.anasys.co.uk/library/dma1.htm>
- [33] Perkinelmer. *Introduction to DMA* [online]. [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74546GDE_IntroductionToDMA.pdf

- [34] Technická univerzita v Liberci: KATEDRA VOZIDEL A MOTORŮ. *Materiály ve strojírenství* [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/kap3.pdf
- [35] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE: Ústav materiálového inženýrství. *Vývoj, rozdělení a charakteristika technických materiálů* [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/1_uvod.pdf
- [36] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [37] Střední škola technická Žďár nad Sázavou. *Strojírenská technologie* [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://mail.sstzr.cz/web/download/cat1/strojirenska-technologie.pdf>
- [38] Vysoké učení technické v Brně: Fakulta chemická. *Základy makromolekulární chemie* [online]. [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: www.fch.vutbr.cz/~klucakova/web14.doc
- [39] Technická univerzita Ostrava. *Měď a její slitiny* [online]. [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://katedry.fmfi.vsb.cz/637/soubory/KOVYI-CuAlMg.pdf>
- [40] Mezipředmětové vztahy v projektové výuce: eProjekt. *Polystyren* [online]. [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: www.eprojekt.gjs.cz/Services/Downloader.ashx?id=1507
- [41] Výzkumná a vývojová síť v oblasti materiálů a technologií. *Polyvinylchlorid (PVC)* [online]. [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=483>
- [42] VANĚK, Vladimír. *MATERIÁLY A TECHNOLOGIE I: PLASTY*. Ostrava, 2005.
- [43] Vysoké učení technické v Brně. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474

Přílohy

Příloha A: Rozměry vzorků

	DMA [mm]				Trhačka [mm]			
	Vzorek	délka	šířka	tloušťka	Vzorek	délka	šířka	tloušťka
Dodaný stav (14.března)	1,1	50	11,86	1,485	1,1	45,5	14,97	1,497
	1,2	50	11,923	1,485	1,2	45,46	15,13	1,497
	1,3	50	11,876	1,496	1,3	45,21	14,547	1,492
	1,4	50	11,723	1,486	1,4	45	15,283	1,495
	1,5	50	11,846	1,495	1,5	45,2	15,687	1,498
	1,6	50	11,973	1,485				
168 hod 40 °C, 93 % vlhkost (jeden týden - 21.března)	2,1	50	12,81	1,495	2,1	44,81	15,757	1,498
	2,2	50	11,576	1,488	2,2	44,84	14,837	1,495
	2,3	50	12,2	1,489	2,3	45,22	15,01	1,495
	2,4	50	12,41	1,491	2,4	45,4	14,763	1,498
	2,5	50	12,413	1,497	2,5	45,52	15,56	1,492
	2,6	50	12,316	1,497				
456 hod 40°C, 93 % vlhkost (druhý týden - 2.dubna)	3,1	50	12,65	1,49	3,1	44,65	15,34	1,497
	3,2	50	12,526	1,501	3,2	45,32	14,75	1,497
	3,3	50	12,347	1,495	3,3	45,48	15,14	1,495
	3,4	50	12,84	1,495	3,4	45,72	15,15	1,494
	3,5	50	12,21	1,495	3,5	45,29	15,86	1,499
	3,6	50	11,68	1,494				
624 hod 40°C, 93 % vlhkost (třetí týden - 9.dubna)	4,1	50	11,48	1,5	4,1	45,27	15,7967	1,501
	4,2	50	11,7467	1,5007	4,2	45,66	14,9633	1,499
	4,3	50	12,4033	1,501	4,3	45,34	14,44	1,499
	4,4	50	12,47	1,499	4,4	45,36	14,9367	1,495
	4,5	50	12,3833	1,50467	4,5	44,58	14,6533	1,5
	4,6	50	12,01	1,504				

Příloha B: Naměřené hodnoty z univerzálního zkušebního stroje

	Číslo vzorku	Fmax	E	Průměr Fmax	Směrodatná odchylka Fmax	Průměr E	Směrodatná odchylka E
	N	MPa	MPa	N	N	MPa	Mpa
Dodaný stav (14. března)							
	1,5	276,69	5509,51	275,278	16,01996	5495,528	350,7358
	1,4	276,99	5587,24				
	1,3	277,74	5446,13				
	1,2	261,76	5232,45				
	1,1	283,21	5702,31				
168 hod 40 °C, 93 % vlhkost (jeden týden - 21.března)							
	2,5	260,15	5362,68	265,164	17,01885	5447,324	256,6597
	2,4	270,69	5439,48				
	2,3	252,6	5285,39				
	2,2	272,51	5580,02				
	2,1	269,87	5569,05				
456 hod 40°C, 93 % vlhkost (druhý týden - 2.dubna)							
	3,5	241,24	5117,73	248,042	13,18991	5166,208	341,6559
	3,4	245,29	5215,14				
	3,3	247,36	4970,44				
	3,2	247,36	5098,66				
	3,1	258,96	5429,07				
624 hod 40°C, 93 % vlhkost (třetí týden - 9.dubna)							
	4,5	234,32	4979,91	248,902	23,1381	5137,698	442,4244
	4,4	243,48	4890,3				
	4,3	247,96	5126,15				
	4,2	253,33	5239,6				
	4,1	265,42	5452,53				

Příloha C: Vyhodnocení skelného přechodu

Doba stárnutí [hod]	Směrodatná odchylka	
	Tg °C	Tg °C
0	130,79	0,77
168	126,77	0,18
456	123,69	0,18
624	123,55	0,52

Příloha D: Korelace dat Youngova modulu mezi DMA a univerzálním zkušebním strojem

Doba stárnutí hod	E Mpa	Průměr E Mpa
0	73,35	5495,528
168	71,96	5447,324
456	72,47	5166,208
624	77,54	5137,698

Příloha E: Korelace hodnot Fmax a teploty skelného přechodu

Doba stárnutí hod	Fmax N	Tg °C
0	275,278	130,79
168	265,164	126,77
456	248,042	123,69
624	248,902	123,55