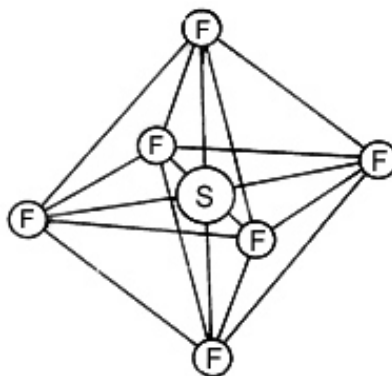
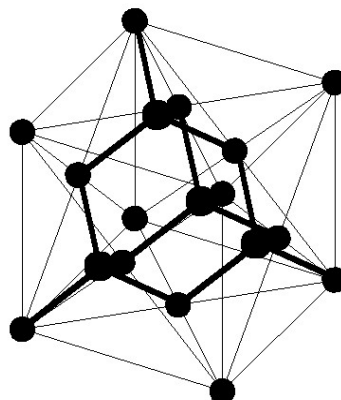
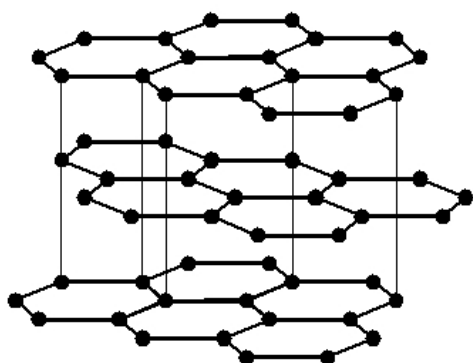


**STŘEDNÍ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ, OSTRAVA,
NA JÍZDÁRNĚ 30, p. o.**

ELEKTROTECHNICKÉ MATERIÁLY



OBSAH

1. Základní vlastnosti materiálů.....	4
1.1. Stavba látek.....	4
1.2. Rozdělení látek podle jejich elektrické vodivosti.....	5
1.3. Struktura materiálů.....	6
1.4. Charakteristické vlastnosti materiálů.....	7
1.5. Řízení vlastností materiálů.....	8
1.6. Druhy elektrotechnických materiálů.....	10
2. Elektricky vodivé materiály.....	10
2.1. Rozdělení a vlastnosti vodivých materiálů.....	10
2.2. Měď a její slitiny.....	12
2.3. Hliník (Al) a jeho slitiny.....	13
2.4. Ušlechtilé kovy.....	15
2.5. Wolfram.....	16
2.6. Elektrotechnický uhlík.....	16
2.7. Vodivé materiály pro zvláštní účely.....	17
2.8. Odporové materiály.....	19
2.9. Vodiče a kabely - druhy a značení.....	20
3. Izolanty.....	22
3.1. Rozdělení, vlastnosti a význam izolantů.....	22
3.2. Polarizace dielektrik a izolantů.....	24
3.3. Pevné anorganické izolanty.....	24
3.4. Pevné organické izolanty.....	26
3.5. Kapalné a plynné izolanty.....	32
4. Polovodiče.....	35
4.1. Vlastnosti polovodičů.....	35
4.2. Elektrická vodivost polovodičů.....	35
4.3. Polovodičové materiály.....	36
4.4. Zpracování polovodičů.....	38
4.5. Vytváření přechodů PN.....	40
5. Konstrukční materiály	42
5.1. Surové železo.....	42
5.2. Oceli.....	42
5.3. Litiny.....	44
6. Materiály na magnetické obvody	45
6.1. Rozdělení materiálů podle magnetických vlastností.....	45

6.2.	<i>Zobrazování magnetických polí</i>	46
6.3.	<i>Veličiny magnetického pole</i>	47
6.4.	<i>Magnetování feromagnetik</i>	48
6.5.	<i>Magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů.....</i>	48
6.6.	<i>Magneticky měkké ferity.....</i>	51
6.7.	<i>Řešení magnetických obvodů</i>	51
6.8.	<i>Energie magnetického pole</i>	55
6.9.	<i>Sílové účinky magnetického pole.....</i>	55

1. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

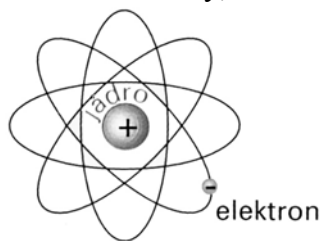
Každý materiál má určité fyzikální, chemické, technické nebo technologické vlastnosti. Materiály pro elektrotechniku musí splňovat především specifické požadavky, které vyžaduje jejich použití pro daný účel (například materiál na vodiče musí mít dobrou elektrickou vodivost, materiál na magnetické obvody musí mít potřebné magnetické vlastnosti, izolant má mít dobré elektroizolační vlastnosti, apod.). Vedle těchto specifických požadavků klademe ještě vysoké požadavky na kvalitu dalších vlastností materiálů, jako je například mechanická pevnost, tepelná odolnost, odolnost proti chemickým vlivům, časová stálost a další.

1.1. Stavba látek

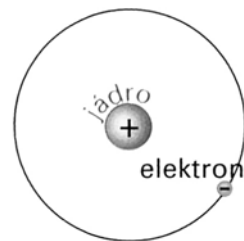
1.1.1. Stavba atomu

Všechny látky se skládají z atomů. Atomy jsou tak malé (průměr přibližně $1/10000 \mu\text{m}$), že je není možno pozorovat ani nejlepším mikroskopem. Přesto byly vytvořeny teoretické modely, např. Bohrovův model, který dobře představuje chování atomu. Podle Bohrova modelu se atom skládá z jádra a obalu. Jádro s průměrem asi 100 000 krát menším než obal, obsahuje protony a neutrony. Kolem jádra se pohybují velkou rychlostí elektrony, které tvoří obal atomu.

Protony jsou kladně nabitě elementární částice atomového jádra a nesou nejmenší možný elektrický náboj, tzv. elementární náboj ($e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), jejich hmotnost je $1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Neutrony jsou elektricky neutrální částí atomového jádra a jejich hmotnost je nepatrně větší než hmotnost protonů. Pokud obsahuje jádro



a) model atomu



b) zjednodušený model

více než jeden proton, drží neutrony jádro pohromadě, neboť protony jsou kladně nabitý a bez přítomnosti neutronů by se odpuzovaly velkou silou.

Elektrony jsou záporně nabitě elementární částice obalu atomu a nesou opačný elementární náboj než protony ($e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Elektron má asi 1836 krát menší hmotnost než proton, tedy $9,108 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Elektrony a protony jsou opačně nabitý, proto se přitahují.

Obal atomu je možno si představit jako jednotlivé vrstvy vložené do sebe. Například atomy Lithia, kovu s nejjednodušší stavbou, mají ve vnitřní vrstvě 2 elektrony a jejich vnější vrstva obsahuje 1 elektron. Jádro atomu lithia se skládá ze 3 protonů a 4 neutronů. Navenek se chová atom elektricky neutrálně, neboť náboj 3 protonů v jádře je vyrovnán nábojem 3 elektronů v obalu

Atomy se tedy chovají navenek neutrálně, mají-li stejné počty protonů i elektronů. Pokud atomu chybí elektrony (protonů je v atomu více) kladný náboj a nazývá se anion (aniont, kladný ion), pokud má naopak navíc elektrony (protonů je v atomu méně) má celkově záporný náboj a nazývá se kation (kationt, záporný ion). Lze užít označení ion, nebo iont, obojí je správné.

1.1.2. Molekuly a vazby mezi atomy

Nejjednodušší jsou jednoatomové molekuly, například u vzácných plynů nebo par kovů. Molekuly jsou většinou dvouatomové (kyslík, vodík). Při vzniku molekuly se uplatňují ve struktuře látek vazby. Vazby mohou být primární, sekundární a přechodné. Primární vazba je kovalentní, iontová nebo kovová, sekundární vazba je Van der Waalsova nebo vodíková a přechodná vazba je dipólová kovalentní nebo tzv. „slabá“ kovalentní.

Kovalentní vazba (homopolární) vzniká reakcí dvou atomů se stejnou nebo málo rozdílnou elektronegativitou, je to typická vazba atomů organických molekul u anorganických látek s krystalickou mřížkou složenou z atomů (diamant, křemík, germanium, karbid křemíku) při této vazbě je společná dvojice valenčních elektronů dvěma atomům.

Iontová vazba (heteropolární) vzniká předáním jednoho či více elektronů mezi atomy – atomy se mění na ionty s opačným znaménkem, je to typická vazba pro iontové krystaly (např. soli alkalických kovů – NaCl), nejsilnější při reakci prvků I. a VII. skupiny periodické soustavy (velký rozdíl elektronegativit)

Kovová vazba vzniká pohybem kladných iontů a volných elektronů

v celém objemu látky je to typická vazba kovových krystalů

Vodíková vazba vzniká mezi vodíkem a polární molekulou, iontem nebo polární skupinou vodík kovalentně vázán na silně elektronegativní prvek (např. dusík, kyslík)

Van der Waalsova vazba vzniká mezi molekulami, které mají kovalentními vazby mezi atomy, kde jsou elektrony předány mezi obaly molekul, je to typická vazba molekul organických látek. Je přibližně o dva řády slabší než kovalentní či iontová vazba

Dipólová kovalentní vzniká při přechodu mezi čistě iontovou a čistě kovalentní vazbou

„Slabá“ **kovalentní** vzniká při přechodu mezi kovalentní a kovovou vazbou

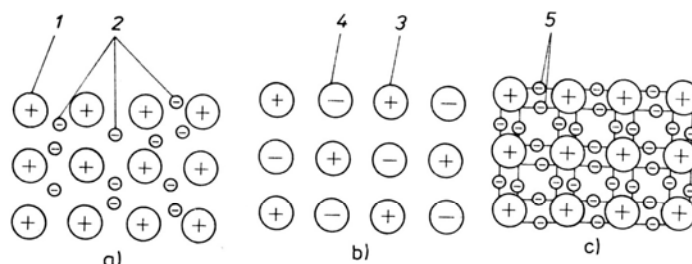
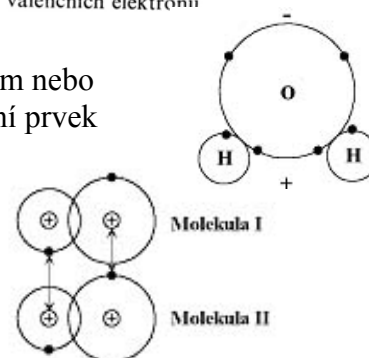


Schéma vazeb mezi atomy

a) vazba kovová: 1 – ion kovu, 2 – volné elektrony

b) vazba iontová: 3 – kladný ion, 4 – záporný ion

c) vazba kovalentní: 5 – dvojice valenčních elektronů



1.2. Rozdělení látek podle jejich elektrické vodivosti

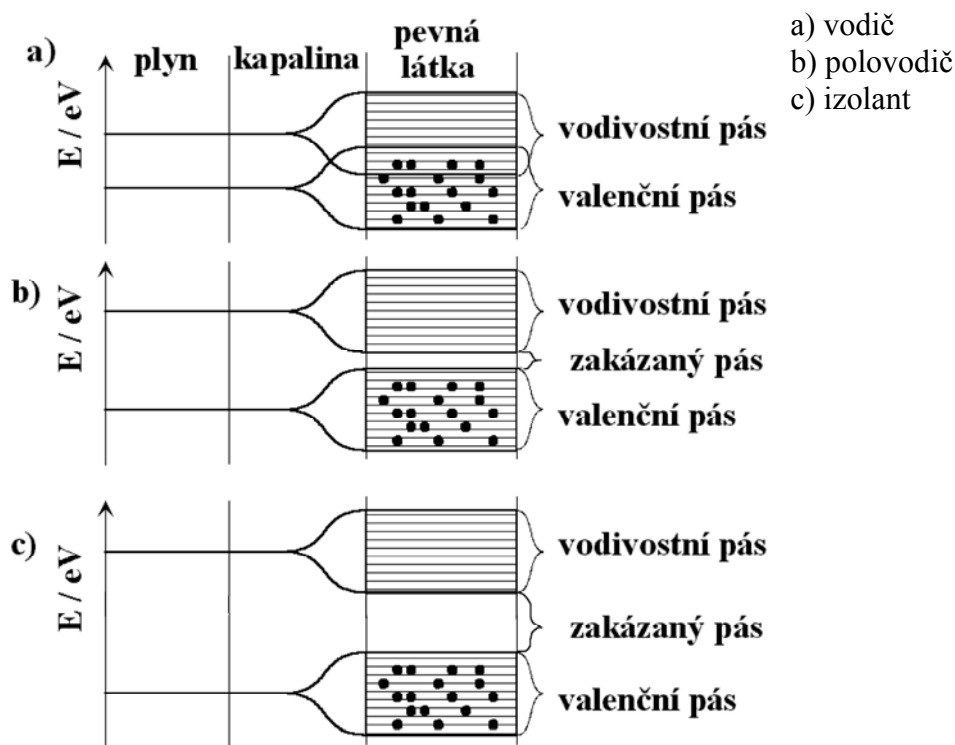
Rozdělení látek podle vodivosti vychází z tzv. pásové teorie vodivosti.

Energetické pásy znázorňují dovozené energetické stavy, v nichž se mohou vyskytovat elektrony v látce. Dovozené energetické pásy jsou od sebe odděleny zakázanými pásy. V látce se nemohou vyskytovat elektrony, které by měly energii příslušnou zakázaným pásům.

Z energetických pásů je důležitý valenční pás, který vznikl z hladiny valenčních elektronů, a pás s větší energií, tzv. vodivostní pás, který leží nad valenčním pásem a není obsazen žádnými elektrony. Vodivostní pás představuje oblast dovozených energií elektronů, při nichž jsou elektrony v látce volně pohyblivé, mohou přenášet elektrický náboj, a tak vyvolávat elektrický proud.

Vzájemná poloha valenčního a vodivostního pásu určuje rozdělení látek podle vodivosti na:

- **vodiče** – valenční pás je zcela zaplněn, případně se překrývá s vodivostním. Vedou elektrický proud, jejich konduktivita je $10^5 - 10^8 \text{ S.m}^{-1}$, patří sem například měď, hliník, stříbro, zlato a další.
- **polovodiče** – valenční a vodivostní pás jsou odděleny zakázaným pásem o šířce odpovídající energii menší než 3 eV. Elektrický proud vedou za určitých podmínek, jejich konduktivita je $10^{-6} - 10^5 \text{ S.m}^{-1}$, patří sem křemík, germanium
- **izolanty** – valenční a vodivostní pás jsou odděleny zakázaným pásem o šířce odpovídající energii větší než 3 eV (u dobrých izolantů až 10 eV). Nevedou elektrický proud (dokonalý izolant neexistuje), jejich konduktivita je $10^{-6} - 10^{-18} \text{ S.m}^{-1}$, patří sem například keramika, polystyrén, PVC, slída a další.



1.3. Struktura materiálů

Elektrotechnické materiály bývají pevné, kapalné i plynné. Pod pojmem struktura rozumíme vzájemné uspořádání částic, ze kterých se skládá materiál: atomy, ionty, molekuly, oblasti apod. Podle toho je třeba rozeznávat mikrostrukturu a makrostrukturu. Mikrostruktura je uspořádání základních stavebních částic materiálů – atomů, iontů a molekul. Jsou-li tyto částice uspořádány do určitých geometrických útvarů, hovoříme o krystalické struktuře. Jsou-li částice neuspořádané, jde o strukturu amorfni.

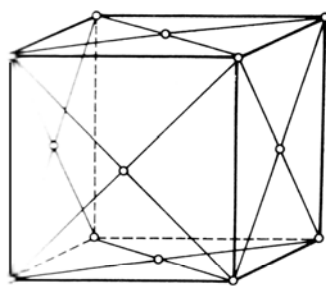
Makrostruktura je uspořádání oblastí v základním materiálu, jejichž rozměry jsou podstatně větší než rozměry atomů nebo molekul. Podle způsobu uspořádání rozlišujeme strukturu vláknitou, pórovitou, zrnitou apod.

Značná část elektrotechnických materiálů se vyskytuje v pevném skupenství. Pevné látky mají určitý objem a tvar, jejich vnitřní stavba je krystalická nebo amorfni. Krystalické látky mají určitou strukturu krystalů, tj. určitý způsob uspořádání a vzájemného spojení částic látky (atomů, iontů) v krystalech a vlastnosti látek do značné míry závisejí na tomto vnitřním uspořádání.

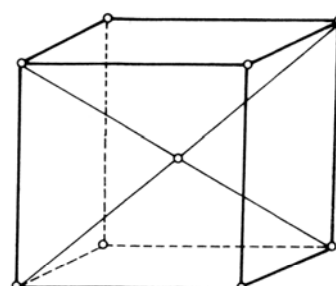
Je proto třeba objasnit základní pojmy související s krystalizací látek.

- *Krystalová buňka* (elementární buňka) je základní prostorový geometrický útvar (krychle, hranol atd.), který vytváří krystalickou strukturu látky. Částice látky (atomy, ionty) jsou umístěny v rozích (uzlech) i na spojnicích jednotlivých uzlů.
- *Krystalová mřížka* je pravidelná prostorová síť tvořená soustavou uzlů rozmístěných v prostoru. Skládá se z krystalových buněk.
- *Ideální krystal* je teoretický model látky; má pravidelně uspořádané krystalové buňky, tedy naprosto dokonalou krystalovou mřížku — bez nečistot, příměsí nebo jiných poruch.
- *Reálný krystal* má určitou pravidelnost v uspořádání krystalových buněk, jeho krystalová mřížka však není dokonalá. Vyskytují se v ní určité poruchy (např. některé částice chybějí nebo jsou přebytečné), které jsou příčinou různých fyzikálních jevů, z nichž mnohé se využívají v technické praxi.

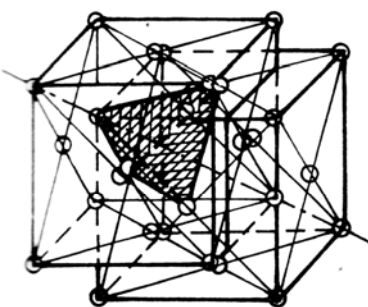
- *Krystalit* je soubor atomů (popř. iontů) seskupených stejně jako v krystalu, který je s okolními soubory spojen geometricky neuspořádanými atomy (ionty). Je to vlastně deformovaný krystal, který vznikl při nepravidelném růstu.
- *Polykrystalická látka* je složena z množství malých krystalitů. Její vlastnosti jsou nezávislé na směru působení; o takové látce říkáme, že je izotropní.



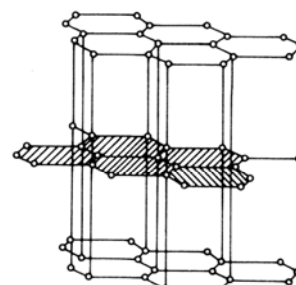
a



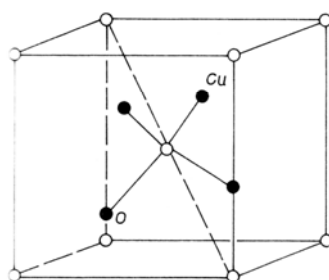
b



c



d



e

Různé typy krystalových mřížek
a) krychlová plošně středěná, b) krychlová prostorově středěná, c) diamantová, d) grafitová, e) mřížka oxidu měďného

- *Monokrystal* je druh reálného krystalu, jehož krystalová buňka se periodicky opakuje v celém objemu dané látky. Monokrystal může vzniknout jen při mimořádně příznivých podmínkách růstu krystalů (teplota, tlak, čistota atd.). Svými

vlastnostmi se přibližuje ideálnímu krystalu. Mechanické, elektrické, magnetické a jiné vlastnosti jsou v jednotlivých směrech rozdílné; říkáme, že krystal je anizotropní. Může vzniknout v přírodě (diamant, křemen, slída apod.) nebo ho lze vytvořit uměle z polykrystalické látky při vhodných technologických podmínkách. V elektrotechnické praxi se monokrystaly používají zejména v polovodičové technice.

1.4. Charakteristické vlastnosti materiálů

Každý materiál má vlastnosti (fyzikální, chemické), které určují jeho využití a podle kterých se materiály dělí. Takovou vlastnost, kterou lze vyjádřit kvantitativně (popř. ji měřit), nazýváme veličina a každá veličina má svoji jednotku. Vlastnost materiálu tedy vyjádříme číselným údajem a jednotkou příslušné veličiny (např. pevnost v tahu 350 MPa, bod tání 1083 °C, elektrický odpor 10,5 Ω).

U elektrotechnických materiálů zjišťujeme především tyto vlastnosti:

- *elektrické* – rezistivita, konduktivita, teplotní součinitel odporu, termoelektrické napětí, permitivita, elektrická pevnost atd.,
- *tepelné* – teplota tání, teplotní délkový součinitel, měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti atd.,
- *magnetické* – permeabilita, koercitivní síla, remanentní indukce, měrné ztráty, atd.,
- *mechanické* – pevnost v tahu, ohybu a tlaku, tvrdost atd.,
- *chemické* – odolnost proti kyselinám, zásadám, oxidaci atd.

Zároveň musíme myslet i na technologické zpracování materiálů (např. na tváření, mechanické opracování, tepelné zpracování) a na skupenství ve kterém se materiál nachází. Skupenství látky je určeno vzájemným vztahem jejích základních částic a při určité teplotě a tlaku může být látka pevná, kapalná, plynná, popř. plazma.

- *Pevné skupenství* – při dostatečně nízké teplotě jsou všechny látky v pevném skupenství (výjimkou je helium, na které se kromě nízké teploty musí působit také tlakem). Pevná látka má buď krystalickou, nebo amorfni strukturu. Částice pevné látky jsou pevně vázané a kmitají v okolí rovnovážných poloh. Vzájemná vzdálenost jednotlivých atomů je řádově 10^{-10} m.
- *Kapalné skupenství* – zahříváme-li pevnou látku, přejde při určité teplotě do kapalného skupenství, přitom se zruší pravidelnost krystalické struktury. Vzdálenost mezi částicemi se poněkud zvětší, síly mezi nimi jsou však natolik velké, že se nemohou vzdálit libovolně. Kapaliny proto mají stálý objem, ale vzhledem k malé soudržnosti molekul nemají tvarovou stálost (kapalina zaujme tvar nádoby). Kapaliny jsou jen velmi málo stlačitelné. Mají ve všech směrech stejné vlastnosti, říkáme, že jsou izotropní. Výjimku tvoří tzv. kapalné krystaly, u nichž se v důsledku některých význačných vlastností projevuje směrová vlastnost uspořádání částic tzv. anizotropie.
- *Plynné skupenství* – dalším zvyšováním teploty přechází látka do plynného skupenství a vzdálenost mezi atomy je podstatně větší (řádově 10^{-8} m). Plynné skupenství je charakterizováno neuspořádaným pohybem částic (molekul) bez pevné vzájemné vazby, s podstatným zvětšením objemu
- *Plazma* – zvyšuje-li se teplota i nadále, nastává disociace (rozklad) molekul a ionizace atomů a molekul. Tato ionizace probíhá v širokém rozsahu a vede ke vzniku nového skupenství látky, které nazýváme plazma. Plazmou rozumíme soubor elektricky nabitých a neutrálních částic bez pevné vzájemné vazby, který se v určitém, nepříliš malém objemu projevuje jako elektricky neutrální (nepolární). Plazma může vzniknout působením vysoké teploty (horká plazma), dále působením ionizačního záření nebo působením elektrického pole (studená plazma) apod. Nejznámější způsob získávání plazmy je ionizace elektrickým výbojem v plynech, tzv. elektrickým obloukem.

1.5. Řízení vlastností materiálů

Elektrotechnické materiály se používají v různých provozních podmínkách. S rozvojem elektroniky požadavky na náročnost těchto podmínek vzrůstají. Proto původně dostačující vlastnosti elektrotechnického materiálu již nemusí v náročnějších podmínkách vyhovovat. Je tedy třeba vlastnosti takového materiálu upravit nebo daný materiál nahradit jiným. Náhrada spojená s vývojem úplně nového materiálu není jednoduchá ani hospodárná záležitost. Účelnější bývá upravit vlastnosti daného materiálu tak, aby vyhovovaly požadovaným podmínkám. Záměrná úprava vlastností materiálu se označuje jako řízení vlastností. Jsou dvě metody řízení vlastností materiálů a to řízení vlastností změnou složení a řízení vlastností změnou struktury. Často se řídí vlastnosti materiálů souběžně změnou složení i struktury.

1.5.1. Řízení vlastností elektrotechnických materiálů změnou složení

Metoda řízení vlastností materiálů změnou složení je založena na vytváření materiálů kombinací několika složek. Vhodně zvoleným zastoupením jednotlivých složek lze vytvořit úplně nový materiál. Přitom nový materiál může mít i takové vlastnosti, které nemá žádná z výchozích složek. Příkladem jsou Heuslerovy slitiny, kdy několik neferomagnetických složek (Mn, Al, Cu) vytvoří feromagnetickou slitinu. Změnou složení je možné řídit všechny vlastnosti materiálů.

Nečistoty v elektrotechnických materiálech různých skupenství zakrývají jejich skutečné vlastnosti, a tak mohou omezovat i rozsah jejich použití. Proto, aby bylo možné řídit vlastnosti takového materiálu, je třeba jej nejdříve vhodnými technologickými postupy vyčistit. Teprve potom lze do vyčištěného materiálu záměrně vnášet příměsi. Velké nároky na čistotu výchozích látek jsou u polovodičů.

Řízení vlastností změnou složení je rozšířené u všech hlavních skupin elektrotechnických materiálů. U vodivých materiálů se změnou složení řídí rezistivita, teplotní součinitel odporu (odporové materiály), teplotní součinitel délkové roztažnosti (slitiny Fe-Ni), teplota tání (pájky), mez pevnosti v tahu (berylivý bronz) aj.

U polovodičů se druhem příměsí (akceptory, donory) řídí typ elektrické vodivosti. U organických izolantů se počtem základních jednotek (monomerů) ve stavbě makromolekulární látky (polymeru) řídí jejich fyzikální vlastnosti. U magnetických materiálů, např. křemíkové oceli, se přísadou křemíku řídí rezistivita oceli, a tím i ztráty vířivými proudy.

Při řízení vlastností elektrotechnických materiálů změnou složení se z technologických operací používá např. metoda pásmového tavení, slitinová technologie (slitiny kovů), difúzní technologie aj.

1.5.2. Řízení vlastností elektrotechnických materiálů změnou struktury

Metoda řízení vlastností materiálů změnou struktury je založena na takové záměrné změně jejich struktury, která vede k dosažení požadovaných vlastností. Změnou struktury se dá řídit většina vlastností látek s výjimkou např. teploty tání a měrné tepelné kapacity, které změna struktury neovlivňuje. Vlastnosti ovlivňované strukturou závisejí na dokonalosti krystalové mřížky, na mechanickém a tepelném zpracování. Tato metoda se tedy uplatňuje pouze u materiálů v pevném skupenství, nikoliv u kapalin a plynů. Řízení vlastností změnou struktury se využívá ve všech skupinách elektrotechnických materiálů.

U kovových materiálů spočívá řízení vlastností změnou struktury ve vytvoření krystalové mřížky v některých případech s co nejmenším počtem poruch, v jiných případech s co největším počtem poruch. Poruchy v krystalové mřížce kovu mají vliv zejména na mechanické vlastnosti.

Kovy s dokonalou krystalovou mřížkou mají teoreticky pevnost stonásobnou v porovnání s obvyklou pevností. Například pevnost čistého železa stanovená výpočtem vychází větší než 20 GPa, zatímco ve skutečnosti je jen asi 0,3 GPa. Tvářením za studena dochází k tzv. zpevnění materiálu např. dráty, tyče, pásy, plechy, trubky nebo různé profilované díly, u nichž se po stupně tvářením rozlišují stavy polotvrdé, tvrdý, pružinově tvrdý a dvakrát pružinově tvrdý.

Ohřevem zpevněného kovu se zmenšují nepravidelnosti v jeho mřížce, kov se zotavuje. Dosáhne-li teplota při ohřevu tzv. rekrytalizační teploty, dochází k rekrytalizaci, při které se začínají v místech největších poruch tvořit nová zrna, která zvyšováním teploty stále více narůstají. Například čistý wolfram následkem rekrytalizace křehne. Rekrytalizační teplota je u čistých kovů asi 40 % teploty tání, u slitin je vyšší.

U magnetických materiálů se řízení vlastností změnou struktury využívá u křemíkové oceli. Magnetické vlastnosti pásů z této oceli ovlivňuje orientace krystalů ve směru válcování.

U izolantů se řízení vlastností změnou struktury využívá u polymerů, mechanické vlastnosti polymerů ovlivňuje orientace makromolekul. Orientace způsobuje protažení makromolekul v jednom směru, v němž je pevnost materiálu podstatně vyšší, na rozdíl od příčného směru, v němž je pevnost menší. Orientace může být organickým látkám při zpracování udělena záměrně (výroba vláken, fólií a pásů) nebo při některých technologických procesech (vstřikování, vytlačování) vzniká samovolně.

U některých materiálů se může projevit po jejich zpracování anizotropie vlastností. Znamená to, že takový materiál má v různých směrech odlišné vlastnosti. Vyskytuje se anizotropie elektrická, mechanická, popř. magnetická.

1.6. Druhy elektrotechnických materiálů

V elektrotechnické praxi používáme velké množství materiálů, které vyrábí hutnický a chemický průmysl. Rozeznáváme tyto druhy elektrotechnických materiálů:

- vodivé materiály (vodiče),
- nevodivé materiály (izolanty, dielektrika, nevodiče),
- polovodivé materiály (polovodiče),
- magnetické materiály (magnetika).
- konstrukční materiály

Elektrotechnické materiály jsou mnohem dražší než běžné (např. strojírenské) materiály, protože mají podstatně větší čistotu. Je proto nezbytné s nimi dobře hospodařit a vrátit je po využití k opětovnému zpracování (měď a její slitiny, hliník a jeho slitiny, olovo, ušlechtilé kovy, magnetika atd.).

2. ELEKTRICKY VODIVÉ MATERIÁLY

2.1. Rozdělení a vlastnosti vodivých materiálů

Vodivé materiály používané v elektrotechnice bývají především pevné (kovy a nekovy), ale elektrický proud vedou i kapaliny a plyny. V pevných vodičích se o vedení proudu starají volné elektrony a v kapalinách a plynech ionty.

Na elektricky vodivé materiály je kladena spousta požadavků, především musí mít velkou konduktivitu, velký součinitel tepelné vodivosti, dobrou zpracovatelnost, snadná spojovatelnost, vyhovující mechanické vlastnosti a nízká cena.

K základním vlastnostem vodivých materiálů patří vlastnosti elektrické (elektrický odpor), tepelné (tepelná vodivost), magnetické, chemické a mechanické.

2.1.1. Elektrický odpor R

Elektrický odpor R vodiče závisí na jeho rozměrech, materiálu, na teplotě a dalších činitelích (skinefekt). Při dané teplotě je odpor vodiče určen jeho délkou l , jeho průřezem S (obsahem kolmého řezu) a rezistivitou ρ materiálu podle vztahu

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \text{ jednotkou elektrického odporu je Ohm } [\Omega].$$

Rezistivita materiálu udává elektrický odpor vodiče 1 m dlouhého o průřezu 1 m² při teplotě 20 °C a je uváděna v tabulkách, její jednotkou je $\Omega \cdot m$ (popř. $\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$).

Převrácená hodnota rezistivity je konduktivita γ , je tedy dána vztahem

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \text{ jednotkou je } S \cdot m^{-1}.$$

2.1.2. Závislost elektrického odporu na teplotě

Odpor vodiče závisí na teplotě. Ohřevem vodiče z teploty 20 °C na vyšší teplotu t se původní hodnota odporu vodiče R_{20} změní na hodnotu odporu R_t podle vztahu

$R_t = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20)]$, kde α je teplotní součinitel odporu a udává, o kolik se změní odpor vodiče 1 Ω změní-li se jeho teplota o 1 K. Jednotkou teplotního součinitele odporu je K⁻¹.

2.1.3. Termoelektrické vlastnosti

Jsou-li dva různé kovové vodiče spojeny na obou koncích a jsou-li jejich místa styku udržována na různých teplotách, vzniká v obvodu tzv. termoelektrické napětí následkem dvou různě vysokých kontaktních napětí obou míst styku. Takový obvod se nazývá termoelektrický článek.

Termoelektrické články se používají k měření teploty. Sestavují se z různých dvojic kovů, např. železo - konstantan.

2.1.4. Teplotní roztažnost

Ohřevem vodiče z teploty 20 °C na vyšší teplotu vzroste původní délka l_{20} vodiče na hodnotu l_v podle vztahu $l = l_{20} \cdot [1 + \alpha_l \cdot (v - 20)]$, kde α_l je teplotní součinitel délkové roztažnosti a udává číselně, o kolik se změní délka 1 m materiálu, zvýší-li se její teplota o 1 K. Jednotkou součinitele teplotní délkové roztažnosti je K^{-1} .

Teplotní délkové roztažnosti se využívá pro měření teplot a pro výrobu bimetalů.

2.1.5. Tepelná vodivost

Podmínkou dobré tepelné vodivosti, stejně jako dobré elektrické vodivosti, je přítomnost mnoha volných elektronů v kovu. Tepelná vodivost se hodnotí podle součinitele tepelné vodivosti λ , který udává množství tepla, které při ustáleném stavu projde za 1 s krychlí s hranou 1 m z dané látky mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl 1 K. Jednotkou součinitele tepelné vodivosti je $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Největší tepelnou vodivost mají čisté kovy vyznačující se velkou elektrickou vodivostí.

2.1.6. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti kovů se zjišťují nejčastěji zkouškou tahem. Zjišťují se tzv. mez pružnosti, mez kluzu a mez pevnosti.

Mez pružnosti σ_E je mechanické napětí, které po úplném odlehčení zkušební vzorku prakticky nezanechá trvalou deformaci. Vzhledem k obtížnému určování se stanoví mez pružnosti v tahu jako mechanické napětí $\sigma_{0,005}$, které způsobí trvalé prodloužení o 0,005 % původní délky.

Mez kluzu σ_K je nejmenší mechanické napětí, které způsobuje náhlý vzrůst deformace. U některých kovů se projevuje při zkoušce tahem zřetelně. U mědi a hliníku (obr. 8) ji však nelze zjistit. Proto se za mez kluzu v tahu stanoví napětí $\sigma_{0,2}$, které způsobí trvalé prodloužení o 0,2 % původní délky.

Mez pevnosti (pevnost) σ_P je největší smluvní mechanické napětí, dané poměrem největší dosažené síly k původnímu průřezu zkušební vzorku.

Jednotkou meze pružnosti, kluzu i pevnosti je Pa.

Další mechanickou vlastností je tzv. tažnost δ , která označuje trvalé poměrné prodloužení zkušební vzorku namáhaného tahem po přetržení. Materiál se považuje za křehký, je-li jeho tažnost menší než 5 % a za houževnatý, je-li jeho tažnost větší než 5%.

2.1.7. Magnetické vlastnosti

Magnetické vlastnosti jsou dány relativní permeabilitou materiálu μ_r . Je-li μ_r menší než 1 jedná se o diamagnetické materiály, je-li μ_r větší než 1 jde o paramagnetické materiály a je-li μ_r mnohem větší než 1 jde o materiály feromagnetické (např. měď je diamagnetická, hliník je paramagnetický a železo je feromagnetické).

2.2. Měď a její slitiny

2.2.1. Měď

Výroba mědi

Hutnicky z měďných rud lze získat měď s čistotou nanejvýš 99,7 % Cu (zbytek tvoří zlato, stříbro, kyslík a jiné nečistoty). Velmi čistá měď pro elektrotechnický průmysl tzv. elektrovodná měď se získává z hutnické mědi elektrolýzou, kdy se na katodě vylučuje měď o čistotě 99,92 až 99,94 %. Nečistoty přecházejí do elektrolytického kalu, odkud lze některé prvky (Au, Ag) získat další elektrolýzou.

Vlastnosti mědi

Čistá měď je kov červené barvy. Krystalizuje v krychlové, plošně středěné soustavě. Hustota mědi je $8\,960\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, bod tání mědi je $1083\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Elektrovodná měď má konduktivitu podle množství nečistot (čím více nečistot tím je konduktivita menší), proto byla definována tzv. vzorná elektrovodná měď a ta má konduktivitu $58\text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$, což odpovídá rezistivitě $0,017\,24\text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$. Příměsemi se barva mědi mění do žluta až do běla. Měď je dobře tvárná, a to za studena i za tepla. Lze ji snadno táhnout, protlačovat, kovat a válcovat. Při tváření však dochází k deformaci krystalové mřížky a tím stoupá tvrdost a pevnost v místě tváření, navíc se zvětšuje její rezistivita a zmenšuje se její tažnost. Tyto vlastnosti znesnadňují další tváření, proto se používá mezioperační žíhání při teplotě 600 až 650 $^{\circ}\text{C}$ ve vodní páře, v dusíku, nejčastěji však ve vodíku. Měď se dobře zpracovává za tepla; nejlépe se tváří při teplotách v rozmezí 600 až 900 $^{\circ}\text{C}$.

Měď je chemicky odolná proti působení vody a alkálií, ale škodlivě na ni působí kyseliny dusičná, sírová a chlorovodíková, a také síra a rtuť. Měď se podle prostředí pokrývá na povrchu vrstvou oxidů, uhličitánů nebo sulfidů, a dostává tak nahnědlou až nazelenalou barvu a proto se proti působení prostředí povrch mědi chrání pocínováním, poniklováním, postříbřením apod.

Měď se vyrábí s různou pevností v tahu, jako tzv.:

- měkká (190 až 240 MPa),
- polotvrdá (250 až 300 MPa),
- tvrdá (310 až 440 MPa).

Tvrdá měď se používá např. pro výrobu kontaktů vn přístrojů, lamel komutátorů nebo vn přípojníc zapouzdřených rozvodů, polotvrdá měď se používá například na výrobu profilových vodičů nebo instalačních vodičů větších průřezů a měkká měď se používá především pro výrobu izolovaných vodičů (s plným i slaněným jádrem) používaných pro výrobu vinutí elektrických strojů a přístrojů nebo pro elektrické instalace a rozvody. Měď se také používá pro výrobu plošných spojů nebo jako příměs do práškové metalurgie. Z celkového objemu výroby mědi je cca 55 % používáno pro výrobu měděných výrobků a cca 45 % na výrobu slitin.

2.2.2. Slitiny mědi

Měď se dá velice dobře slévat s jinými kovy, čímž se zlepšují některé vlastnosti mědi jako např. pevnost, houževnatost, tvárnost apod., ale vždy se zmenšuje její konduktivita. Slitiny mědi se zinkem nazýváme mosazi a slitiny s jinými kovy pak bronz.

Mosazi

Mosazi jsou slitiny mědi (od 55 % výše) se zinkem, popř. ještě s dalšími kovy. Podle složení a způsobu zpracování rozlišujeme mosazi tvářené a slévarenské.

Tvářené mosazi obsahují 58 až 96 % Cu, zbytek je Zn. Mosazi s obsahem 80 % Cu a více se nazývají tombaky. Jsou dobře tvárné za studena, vyznačují se velkou tažností a dobrou

pevností. Používají se na např. výrobu objímek žárovek, částí nn spínačů, nebo další elektroinstalační materiál.

Slévárenské mosazi mívají obsah mědi 58 až 63 %. Jsou to slitiny vhodné k odlévání armatur a různých součástí (ložiska, části čerpadel apod.).

Bronzy

Bronzy jsou původně slitiny mědi s cínem, ale dnes i slitiny s hliníkem, niklem, křemíkem, berylliem apod. Složení bronzů podstatně ovlivňuje jejich elektrické, mechanické a technologické vlastnosti.

*Cínové bronz*y obsahují až 20 % cínu. Jako desoxidant se někdy přidává fosfor (např. 0,3 %); takový bronz se nazývá fosforový. Cínové bronzy jsou (podle složení) určeny jednak k tváření, jednak na odlitky.

*Hliníkové bronz*y obsahují (kromě mědi) až 10 % hliníku. Používají se na výrobu součástek odolných proti korozi při vyšších teplotách.

*Křemíkové bronz*y obsahují až 5 % křemíku. Vyznačují se velkou houževnatostí; používají se na pružiny v přístrojích.

*Beryliové bronz*y jsou slitiny mědi, které obsahují až 2,5 % beryllia a další přísady. Svou pružností se téměř vyrovnají oceli a jsou přitom lépe elektricky vodivé, mají velkou odolnost proti korozi a proti opotřebení. Protože je beryllium drahé, používají se jen k výrobě nejnáročnějších součástek, např. na elektrody bodových a švových svářeček, na pružiny, kterými prochází elektrický proud, na nástroje, které při nárazu nesmějí jiskřit.

*Niklové bronz*y. Přidáním niklu do mědi se zvětšuje její odolnost proti korozi. Slitina mědi se 45 % niklu se nazývá konstantan. Tato slitina má minimální teplotní součinitel odporu ($\alpha = 0,00001 \text{ K}^{-1}$) a používá se pro výrobu rezistorů nebo v termočláncích. Slitina mědi se 30 % niklu se nazývá nikelin a také se používá se pro výrobu rezistorů.

Nízkolegované měděné slitiny (příměsí tvoří maximálně 2 %)

Cu Te P - používá se pro trolejová vedení

Cu Cd - používá se pro vidlice a zásuvky

Cu Ni Si – pouzdra diod a tranzistorů

2.3. Hliník (Al) a jeho slitiny

2.3.1. Hliník

Hliník je druhý nejrozšířenější prvek v zemské kůře (8 %). K výrobě se ze všech rud hodí nejlépe bauxit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) a kryolit (Na_3AlF_6). Z bauxitu se nejprve pálením získá velmi čistý oxid hlinitý (Al_2O_3), k němu se dodá přídavek kryolitu (usnadňuje tavení). Při průmyslové elektrolýze této směsi o teplotě asi 950°C se na katodě vylučuje elementární hliník, na grafitové anodě vzniká kyslík, který ihned reaguje s materiálem elektrody a vzniká toxický plynný oxid uhelnatý (CO). Získáme tím elektrovodný hliník o čistotě 99,5% (podstatně větší čistoty se dosáhne elektrolytickou rafinací 99,99%). Výroba hliníku je drahá, neboť k výrobě 1 tuny hliníku je třeba 4 tun bauxitu a 15 MWh elektrické energie, je proto třeba hliníkem šetřit a vracet ho v podobě sběrné suroviny do výroby.

Čistý hliník je stříbřitě šedý kov s hustotou 2700 kg.m^{-3} , s bodem tání 658°C , rezistivitou $0,027 \Omega.\text{mm}^2.\text{m}^{-1}$, což odpovídá konduktivitě 37 MS.m^{-1} . Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 229 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ jej řadí k dobře tepelně vodivým materiálům.

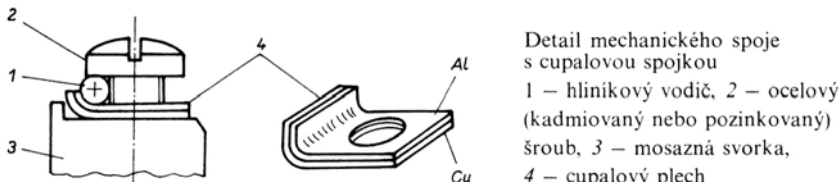
Hliník je tedy dobrým vodičem elektřiny i tepla (po stříbře a mědi). Na vzduchu se hliník pokrývá pevnou nevodivou vrstvou ($1\mu\text{m}$) oxidu hlinitého (Al_2O_3), která jej chrání před dalšími povětrnostními vlivy (vrstva oxidu se dá zvětšit tzv. eloxováním asi na $20 \mu\text{m}$ - vzniká dobře izolovaný vodič). Hliník lze dobře tvářet za studena i za tepla kovááním,

lisováním, válcováním nebo tažením. Z hliníku se válcují vodiče, fólie a různé profily. Trískové obrábění je obtížné, neboť hliník se maže a tvoří dlouhé, měkké třísky. Z kyselin narušuje hliník pouze HCl, avšak alkalické roztoky jej také leptají. Oproti mědi je hliník lehký, měkký, ohebný, ale málo pevný. Vlivem tlaku hliník pomalu „teče“, hliníkové vodiče utažené ve svorkách a pod šrouby se postupně rozmáčknou a uvolní, což může být příčinou vzniku elektrického oblouku a následně požáru.

Při pájení (měkkými i tvrdými pájkami) je nutno použít tavidlo, které odleptá ochrannou vrstvičku oxidu hlinitého, aby pájka mohla proniknout až k vlastnímu kovu. Při svařování (plamenem, odporově, obloukově, tlakem za studena nebo ultrazvukem) je opět potřeba použít tavidlo nebo se svařuje v ochranné atmosféře argonu.

V elektrotechnice nachází hliník uplatnění jako vodič (rozvodné lišty, vodiče kabelů a v kombinaci s ocelí vzdušné vedení, tzv. AlFe lana), jako opláštění kabelů, jako vinutí velkých transformátorů, jako klece rotorů asynchronních motorů nakrátko, jako fóliové elektrody kondenzátorů atd. Používá se též k výrobě žebrovaných chladičů výkonových polovodičových prvků, k výrobě různých krytů a nosných částí přístrojů apod.

Při styku hliníkových vodičů s měděnými součástkami (vodiči) vzniká za vlhka galvanický článek, čímž dochází k elektrochemické korozi spoje. Ve vlhkém prostředí tedy nelze přímo spojovat hliníkové vodiče s měděnými, ale je třeba použít tzv. cupalové spojky nebo podložky.



2.3.2. Slitiny hliníku

Podle použití rozlišujeme elektrovodné a konstrukční slitiny hliníku.

Elektrovodné slitiny hliníku

Aldrey Al + Mg + Si +, Fe (podíl přísad je celkem kolem 1 %), tvářením a vhodným tepelným zpracováním (vytvrzováním) se z něj vyrábějí dráty, jejichž mez pevnosti dosahuje až 360 MPa při konduktivitě 32 MS.m⁻¹.

Jareal Al+ Zn (0,15%)+ Mg, Si, Fe (cca 1%) lze použít na vodiče venkovního vedení a tam, kde teplota nepřekročí 80 °C. Při vyšších teplotách totiž nastává rekrystalizace, čímž se zhoršují mechanické vlastnosti získané tepelným zpracováním

Cond-Al Al+ Mg, Fe (až 1 %)+malé množství Si. Jeho mez pevnosti dosahuje maximálně 120 MPa při konduktivitě 33 MS.m⁻¹, je však velmi odolný proti tečení (až do teploty 140 °C), proto se používá na vinutí velkých točivých strojů.

Konstrukční slitiny hliníku

Dural Al+Cu (4%)+Mg (0,6 %)+Mn (0,6%), hustota slitiny je kolem 2800kg. m⁻³, vodivost asi 28 MS.m⁻¹ mez pevností v tahu 180 až 240 MPa, vytvrzením se mez pevnosti zvýší na 360 až 410 MPa.

Superdural obsahuje podobné přísady jako dural, má však větší obsah Mg. Vytvrzením a tvářením za studena lze dosáhnout meze pevnosti až 580 MPa.

Konstrukční slitiny hliníku našly široké uplatnění všude tam, kde záleží na hmotnosti výrobku při zachování velké pevnosti, například v letectví.

Silumin Al+Si (13%), používá se na odlévání koster elektrických strojů.

2.4. Ušlechtilé kovy

Za ušlechtilé kovy považujeme *stříbro Ag, zlato Au a platinové kovy* (platina Pt, iridium Ir, osmium Os, palladium Pd, rhodium Rh, ruthenium Ru). Oproti jiným kovům se vyznačují stálostí na vzduchu a odolností proti chemickým vlivům. Každý z nich má svoje specifické vlastnosti, které se využívají v elektrotechnických součástkách.

2.4.1. Stříbro

Stříbro je bílý, lesklý kov, který má ze všech kovů nejmenší rezistivitu ($\rho = 0,0164 \mu\Omega\cdot\text{m}$) a největší součinitel tepelné vodivosti ($\lambda = 418 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), jeho hustota je $10490 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Je velmi tvárné, lze je snadno zpracovat i na velmi tenké dráty a fólie. V elektrotechnice se stříbro používá na dráty tavných pojistek, na kontakty, jako složka tvrdých pájek, k chemickému nebo galvanickému stříbření povrchu různých kovů (většinou mědi), jako elektroda v elektrochemických článcích Ag-Cd atd. Nanese-li se stříbrný lak na keramiku a poté se keramika vypálí, vznikne tenká stříbrná elektroda keramického kondenzátoru. Stříbro se velmi dobře nanáší na skleněné a jiné materiály napařováním ve vakuu.

Slitiny stříbra

Klenotnické slitiny Ag+Cu (10%)

Dentální slitiny Ag+Pd (až 50%) nebo Hg+Ag+Cu+Sn (tzv. amalgán)

Stříbrné pájky Ag+Sn+Cu+Zn vyznačují se vysokou elektrickou vodivostí, tvrdostí a relativně vysokým bodem tání, slouží jako spojovací materiál pro konstrukci plošných spojů a pro tzv. pájení natvrdo.

2.4.2. Zlato

Zlato je lesklý kov žluté barvy, jeho rezistivita je třetí nejmenší ($\rho = 0,022 \mu\Omega\cdot\text{m}$), má dobrou tepelnou vodivost ($\lambda = 318 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), jeho hustota je $19300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zlato je velmi tvárné, tepáním lze získat fólie tloušťky dokonce $0,1 \mu\text{m}$ a tažením dráty s průměrem od $5 \mu\text{m}$. Po platině je zlato chemicky nejodolnější kov, z běžných anorganických kyselin reaguje pouze s lučavkou královskou, v níž se rozpouští za vzniku tetrachlor zlatitého aniontu $[\text{Au}(\text{Cl})_4]^-$. V alkalickém prostředí se zlato rozpouští v přítomnosti kyanidových iontů (za přítomnosti kyslíku), přičemž vzniká komplexní kyanozlatnan $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. Na vzduchu nevytváří žádné oxidy (má stále lesklý povrch), což je významné pro použití zlata na elektrické kontakty. Zlato se používá v mikroelektronice jako vodič k propojení polovodičových čipů s vnějšími přívody integrovaných obvodů, zajišťuje dlouhodobou a bezproblémovou vodivost důležitých spojů v počítači (např. kontakty mikroprocesoru) k napařování spojů v polovodičových součástkách, přidává se do slitin pro kontakty a pájky a plátují se jím kontakty. Pozlacené vodivé plošky jsou odolné proti atmosférickým vlivům a snadno se pájí.

Slitiny zlata

Ryzí zlato (99,99 % Au) je velmi měkké, proto se nejčastěji používá ve slitinách s Ag, Cu, Pd, Pt, Ni. Tím se zvětšuje jeho tvrdost, pevnost i rezistivita a zmenšuje se jeho chemická odolnost. Obsah zlata se pak udává buď v tisícinách (promile), nebo v karátech (čistě 100% zlato má 24 karátů, 50% zlato má 12 karátů apod.).

2.4.3. Platinové kovy

Platina je šedobílá, lesklá a ze všech kovů chemicky nejodolnější. Proto ji považujeme za nejušlechtlejší, a tím i nejdražší kov. Její hustota je $21450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Je dobře tvárná, lze z ní zhotovit i fólie tloušťky $2,5 \mu\text{m}$ a dráty průměru od $15 \mu\text{m}$. Pro svou velkou rezistivitu ($0,1 \mu\Omega\cdot\text{m}$) se zařazuje mezi odporové materiály. Platina se využívá jako jeden z vodičů termoelektrických článků. Z platinových drátů se vyrábějí odporové teploměry pro regulační

*obvody a odporové topné články laboratorních pecí. Z platiny a jejích slitin se vyrábějí kontakty pro velmi náročné přístroje. Vzhledem k platině se stanovují termoelektrické potenciály kovů.

U dalších *platinových kovů* uvedme alespoň jejich základní vlastnosti a použití. Všechny tyto kovy mají stříbrný lesk a vysoký bod tání.

Palladium se používá do slitin na kontakty a jako tvrdá pájka.

Rhodium vytváří povrchy se zvláštním zrcadlovým leskem, mimořádně odolné proti atmosférickým vlivům. Používá se na antény radarů.

Iridium je obzvláště tvrdý kov, používá se do slitin (hlavně s platinou) na termoelektrické články pro měření teploty do 2 000 °C a na kontakty.

Osmium má ze všech prvků největší hustotu (22500 kg.m⁻³). Přidává se do slitin, které mají být zvláště odolné proti otěru. Ve slitinách s wolframem se používá k výrobě vláken do žárovek.

Ruthenium se využívá ve slitinách s platinou nebo palladiem, které mají velkou odolnost proti otěru.

2.5. Wolfram

Wolfram má ze všech kovů nejvyšší teplotu tání (3400 °C), jeho hustota je 19250 kg.m⁻³. Při metalurgické výrobě wolframu se obvykle nejprve mechanicky separují těžké frakce rudy a výsledný koncentrát se taví s hydroxidem sodným (NaOH). Tavenina se louží vodou, do níž přechází vzniklý wolframan sodný (Na₂WO₄). Okyselením tohoto roztoku vypadává sraženina hydratovaného oxidu wolframového WO₃. Čistý wolfram pak získáváme redukcí oxidů vodíkem při vyšších teplotách ($\text{WO}_3 + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{W} + 3 \text{H}_2\text{O}$). Kováním za tepla jeho hrubozrnná struktura se mění ve vláknitou, což umožňuje táhnout dráty (rovněž za tepla) diamantovými průvlastky průměru až 10 μm. Na vzduchu se při teplotě nad 400 °C tvoří na povrchu tenká vrstva oxidů, při teplotě nad 700 °C se wolfram pokrývá žlutým oxidem wolframovým WO₃, který při teplotách nad 1 000 °C sublimuje. Wolfram tedy při vyšších teplotách potřebuje ochrannou atmosféru.

Wolfram je velmi používaný kov ve vakuové technice, vyrábějí se z něho přímo žhavené katody vysílacích elektronek, žhavicí vlákna nepřímě žhavených katod elektronek, vlákna žárovek, elektrody zářivek, mřížky vysílacích elektronek apod. Dále se z wolframu vyrábějí topná tělesa elektrických odporových pecí s vakuovým nebo vodíkovým prostředím. Používá se rovněž jako jeden z vodičů v termoelektrických člancích pro měření teplot nad 2 000 °C. Impregnováním pórovitého wolframu roztavenou mědí vznikne nepravá slitina (pseudoslitina), které měď dává velkou elektrickou a tepelnou vodivost a wolfram zase velkou tvrdost, odolnost proti elektrickému oblouku, opotřebení a spečení, proto je výborným materiálem k výrobě tepelně velmi namáhaných elektrických kontaktů (např. pro bodové svářečky). Wolfram se velice často také používá v práškové metalurgii k výrobě opalovacích kontaktů.

2.6. Elektrotechnický uhlík

Elektrotechnický uhlík není čistý prvek uhlík (C), ale materiál vyrobený zvláštními technologickými postupy z uhlíkatých a jiných surovin. K výrobě elektrotechnického uhlíku se používají tyto suroviny:

- uhlíkaté látky: koks, přírodní grafit, saze, antracit,
- pojiva: dehet, přírodní pryskyřice,
- kovové prášky: Cu, Ag, Zn, Sn, Pb,
- přísady: parafin, draselné vodní sklo a různé jiné chemikálie.

Suroviny se rozemelou na jemné prášky, dokonale smíchají a lisují na požadovaný tvar.

Výlisky se pak vypalují při teplotách 1 200 °C až 1 400 °C; přitom dochází k určitým

fyzikálním a chemickým změnám, jejichž výsledkem je tvrdý pórovitý materiál s velkou rezistivitou. Z hlediska struktury je to amorfni materiál obsahující jemné krystality uhlíku C v neuspořádaných shlucích. V elektrotechnické praxi se využívá pro svoje specifické vlastnosti: chemickou odolnost, žáruvzdornost, odolnost proti opalování, dobrou kluznost.

Z elektrotechnického uhlíku se dalším vypálením při teplotě vyšší než 2 700 °C získává tzv. elektrografit. Při tak vysoké teplotě shoří všechny nečistoty a získá se velmi čistý šesterečný uhlík a z krystalitů vzniknou šupinky, tím se zlepši elektrická i tepelná vodivost, kluznost a chemická stálost. Elektrická a tepelná vodivost se může ještě zlepšit impregnací roztavenými kovy (Cu nebo Ag).

Vhodnou kombinací uhlíkatých látek, pojiv, kovových prášků a dalších přísad lze získat široký sortiment materiálů s nejrůznějším uplatněním v technické praxi. Výhodou uhlíkových výrobků je nízká cena oproti ceně výrobků z kovových materiálů.

Elektrotechnický uhlík se používá například pro výrobu sběracích kartáčů elektrických strojů, sběračů proudu z trolejového vedení, pro membrány a náplň mikrofonů, do varistorů (napětově závislých odporů) v bleskojistkách, na kontakty a podobně.

2.7. Vodivé materiály pro zvláštní účely

Mezi vodivé materiály pro zvláštní účely patří například materiály na kontakty, na dvojkovy, na termočlánky, na pájky, na tavné vodiče pojistek a mnoho dalších.

2.7.1. Materiály na kontakty

Spínací kontakty vypínačů, právě tak jako kluzné kontakty reostatů a potenciometrů, musí vyhovět různým požadavkům, a proto speciální materiály používané na jejich výrobu musí splňovat tyto podmínky:

- velká měrná elektrická vodivost
- velká tepelná vodivost
- vysoký bod tání, vysoký bod varu
- malý otěr
- malé ztráty opalováním
- malý sklon ke spékání kontaktů
- dostatečná pevnost a tvrdost
- odolnost proti chemickým vlivům

Tyto náročné požadavky nesplňuje žádný z čistých kovů, proto se používá velká spousta slitin, nepravých slitin a slinutin, které se blíží požadovaným vlastnostem potřebným pro konkrétní druh kontaktů. Příklady použití materiálů jsou v následující tabulce:

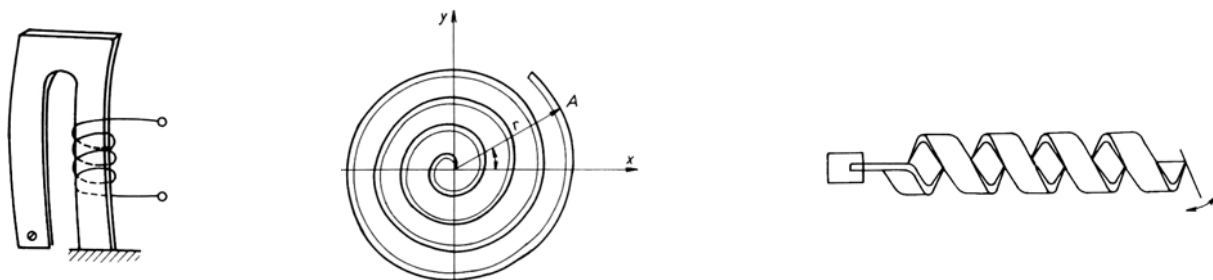
Oblast použití - příklady použití	Složení materiálů
Rychlé spínání napětí (nepatrných proudů) - mikrospínače	Ag, Au, Pt, Rh, Ag+Ni, Ag+Pd, Pt+Ir
Kontakty pro spínání malých proudů (výkonů) - pomocné spínače - přístrojové Spínače - programovatelné spínače - regulátory	Cu+Ag, Ag+Pd, Ag+SnO ₂ , Pd+Cu Pt, Pt+Ir
Kontakty pro spínání středních proudů (výkonů) - stykače - jističe - nízkonapětové výkonové spínače	Cu+Zn, Ag+Cu, Ag+SnO ₂ , Ag+Zn Cu+Ag, Pt+Ir, nebo postříbřená měď
Kontakty pro spínání středních proudů (výkonů) - vysokonapětové výkonové vypínače	Ag+Cu, nebo postříbřená tvrdá měď

Kontakty s velkou odolností proti opalování - vysokonapětové výkonové spínače	slutiny W+Ag nebo W+Cu
Posuvné a kluzné kontakty - kartáče elektrických točivých strojů - trolejové sběrače elektrických lokomotiv	Elektrotechnický C, Ag+C, Cu+C

2.7.2. Materiály na dvojkovy

Dvojkovy jsou materiály vytvořené spojením dvou různých kovů nebo slitin rozdělují se na dvojkovové vodiče (například Cupal – Cu a Al nebo AlFe vodiče či lana Al plášť pro dobrou vodivost Fe jádro pro mechanickou pevnost), ohybové dvojkovy (skládá se ze dvou vrstev různých kovů nebo slitin pevně spojených, které mají rozdílný teplotní součinitel délkové roztažnosti) a dvojkovové kontakty (například Cu kontakt potažený plátkovým stříbrem nebo zlatem).

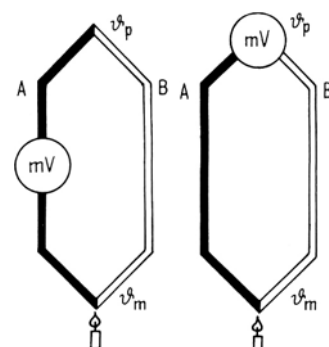
Ohybové dvojkovy se tedy skládají ze dvou materiálů s různou teplotní délkovou roztažností (α_l), přičemž aktivní materiál má α_l co největší (bývá to Ni, slitina Ni-Fe s 20% Ni, slitina Cu-Ni), zatímco pasivní materiál má α_l co nejmenší (např. slitina Invar - 36 až 42% Ni + Fe, nebo tzv. Superinvar, který je slitinou 31% Ni + 5% Co + 64% Fe). Jestliže tento dvojkov na jedné straně upevníme a ohřejeme, vlivem rozdílu teplotních součinitelů roztažnosti se jeden z materiálů roztahuje více a druhý méně pak se druhý konec dvojkovu se ohne. Průhyb pásku závisí na druhé mocnině jeho délky, proto se snažíme vytvořit pásek velké délky, ale malých celkových rozměrů (toho se dosáhne vhodným tvarem).



2.7.3. Materiály na termoelektrické články

Termoelektrický článek je tvořen dvěma kovovými dráty nebo tyčemi z odlišných materiálů, které jsou na obou koncích vodivě spojeny. Na těchto spojích vzniká kontaktní potenciál závislý na teplotě. Při určitém rozdílu teplot obou konců termoelektrického článku lze mezi těmito konci naměřit termoelektrické napětí o velikosti několik mikrovoltů až milivoltů. Velikost tohoto napětí závisí na rozdílu teplot měřicího a porovnávacího konce a na materiálech, ze kterých je článek zhotoven. Závislost napětí termoelektrického článku na teplotě je téměř lineární.

V technické praxi se využívají termoelektrické články vyrobené kombinací Cu / Konstantan, Fe / Konstantan, NiCr / Ni, PtRh / Pt.



2.7.4. Materiály na pájky

Pájky jsou kovy a slitiny, které se používají v roztaveném stavu ke spojování kovových částí pájením. Princip pájení spočívá v tom, že roztavená pájka smočí povrch kovů určených ke spojení, proniká (difunduje) pod povrch ohřátých kovů a po ochlazení a ztuhnutí je pevně spojí, přičemž nedojde k natavení spojovaných kovů. Po materiálech na pájky požadujeme, aby měli především velkou mechanickou pevnost spojů, odolnost spojů proti korozi, dobrou

tepelnou a elektrickou vodivost, dobrou smáčivost a nízkou teplotu při pájení. Podle teploty tavení rozlišujeme pájky na snadno tavitelné (pod 220 °C), měkké (220 až 500 °C) a tvrdé (nad 500 °C).

U *snadno tavitelných* pájek teplota tavení bývá v rozsahu zpravidla od 60 °C do 220 °C.

Nejčastěji se používají slitiny Pb + Bi + Sn + Cd, In + Cu + Ag, In + Cu + Au, pro zvláštní účely se používají např. pájka Ga+Sn (20 °C) nebo pájka Ga+In (16 °C).

Měkké pájky jsou většinou slitiny Sn + Pb vhodné k pájení mědi, mosazi, oceli, zinku a olova, přičemž obsahem cínu v rozmezí 55 % až 99 % se mění teplota tavení. K pájení hliníku se používají pájky Sn + Zn, dalšími druhy pájek jsou Pb + Sb nebo Pb + Ag + Cu.

Tvrde pájky se rozdělují na:

- mosazné pájky (slitiny Cu + Zn) - pájení mědi, bronzu, mosazi, oceli a litiny.
- stříbrné pájky (buď čisté stříbro, nebo slitiny Ag + Cu, Ag + Cu + Zn, s obsahem stříbra 15 až 85%) - pájení niklu a jeho slitin, mědi a jejich slitin a ušlechtilých kovů.
- hliníkové pájky (slitiny s velkým obsahem Al a s přísadou Si dalších kovů) - pájení hliníku.
- zlaté pájky, platinové pájky, palladiové pájky; kromě složek uvedených názvu obsahují ještě další kovy, např. Cu, Ni, Mn, Ag.

Materiály na tavné vodiče pojistek

Tepelným účinkem nadproudu nebo zkratového proudu se přetaví tavný vodič pojistky (drátek, pásek), a tím přeruší obvod.

Kovy na tavné vodiče musí mít velkou konduktivitu a nízký bod tání, mají být odolné proti oxidaci a nemají se rozstříkovat, nýbrž vypařit. Tavné drátky nebo pásy se vyrábějí ze stříbra, postříbřené mědi, ale i z hliníku, zinku nebo slitin s nízkým bodem tání.

2.8. Odporové materiály

Patří sem nejen materiály pro výrobu rezistorů a topných odporů, ale rozsah použití zahrnuje i potenciometry, techniku tenkých vrstev na tělíscích rezistorů, odporové prvky v integrovaných obvodech, měřicí odpory a mnoho dalších využití.

S růzností použití odporových materiálů jsou také různé požadavky na jejich vlastnosti, například mezi *elektrické* vlastnosti patří velká rezistivita, malý teplotní koeficient odporu, velká proudová zatížitelnost, mezi *mechanické* především dobrá opracovatelnost, dobrá tažnost, mezi *tepelné* pak malá teplotní roztažnost, dobrá tepelná odolnost, dobrá pájitelnost, nebo vysoký bod tání a mezi *chemické* požadavky řadíme především odolnost proti korozi.

K nejdůležitějším materiálům pro výrobu odporů, potenciometrů a topných vodičů patří slitiny mědi s niklem (konstantan, nikelin – viz kapitola měď a její slitiny nebo slitiny mědi s menším obsahem niklu – 2, 6 12 %). Pro výrobu drátových odporů velkých hodnot a pro topné spirály se používá například NiCr (80% Ni + 20% Cr) nebo různé slitiny železa.

Nejenom kovy se používají pro výrobu rezistorů, nekovové odporové materiály se používají se v rozsahu teplot 1 350 °C až 2 500 °C, mají podstatně větší rezistivitu než kovové odporové materiály. Vyráběné rezistory se lisují do tvaru tyčí nebo trubek z práškových materiálů a spékají se.

Silit je směs karbidu křemičitého, křemíku a přísad. Výrobky ze silitu lze použít při teplotách do 1 600 °C. Obchodní názvy jsou např. globar, quarsilit, crusilite aj.

Uhlíkové vrstevné rezistory lze použít pro teploty do 2 500 °C. Jejich výhodou je velká přetížitelnost a odolnost proti proudovým nárazům. Pro výrobu masivních rezistorů se používá např. směs práškového uhlíku s izolantem, který zároveň tvoří pojivo.

Spékané materiály, vzniklé spékáním prášku kovů W, Mo, Ta, Th s oxidy kovů, např. Al₂O₃ nebo ZnO, lze je použít do teplot 2 600 °C.

Rezistory a potenciometry se dnes také často vyrábějí z tzv. *vodivého plastu*, což je vodivý prášek (Cu, Ag) smíšený s izolačním termoplastem a za vysoké teploty slisovány na potřebný tvar.

Hodnota rezistivity odporového materiálu musí být taková, aby mohl mít rezistor s požadovanou hodnotou odporu i vhodné geometrické rozměry, které na jedné straně umožňují vyzářit ztrátové teplo, a na druhé straně se rezistor musí vejít do vymezeného prostoru.

2.9. Vodiče a kabely - druhy a značení

Z vodivých materiálů se vyrábějí vodiče ve formě drátů, pásů, trubek nebo lan a to jak izolovaných tak i holých.

Vodiče pro vinutí elektrických strojů a přístrojů se izolují nejčastěji laky, vodiče pro instalační vedení do 1000 V se izolují nejčastěji PVC izolacemi, vodiče pro vn vedení bývají holá nebo izolovaná PVC izolací, kabely obsahují vodiče izolované PVC a jejich plášť bývá též z PVC. Vodiče pro provoz ve vyšších teplotách se izolují silikonovými izolacemi atd. Izolované i neizolované vodiče se často značí barvami pro jejich identifikaci.

2.9.1. Barevná značení izolací izolovaných vodičů, holých vodičů a přípojníc:

Stejnoseměrná soustava:

kladný pól	tmavě červená	střední	světle modrá
záporný pól	tmavě modrá	ochranný	zelená / žlutá

Střídavá soustava:

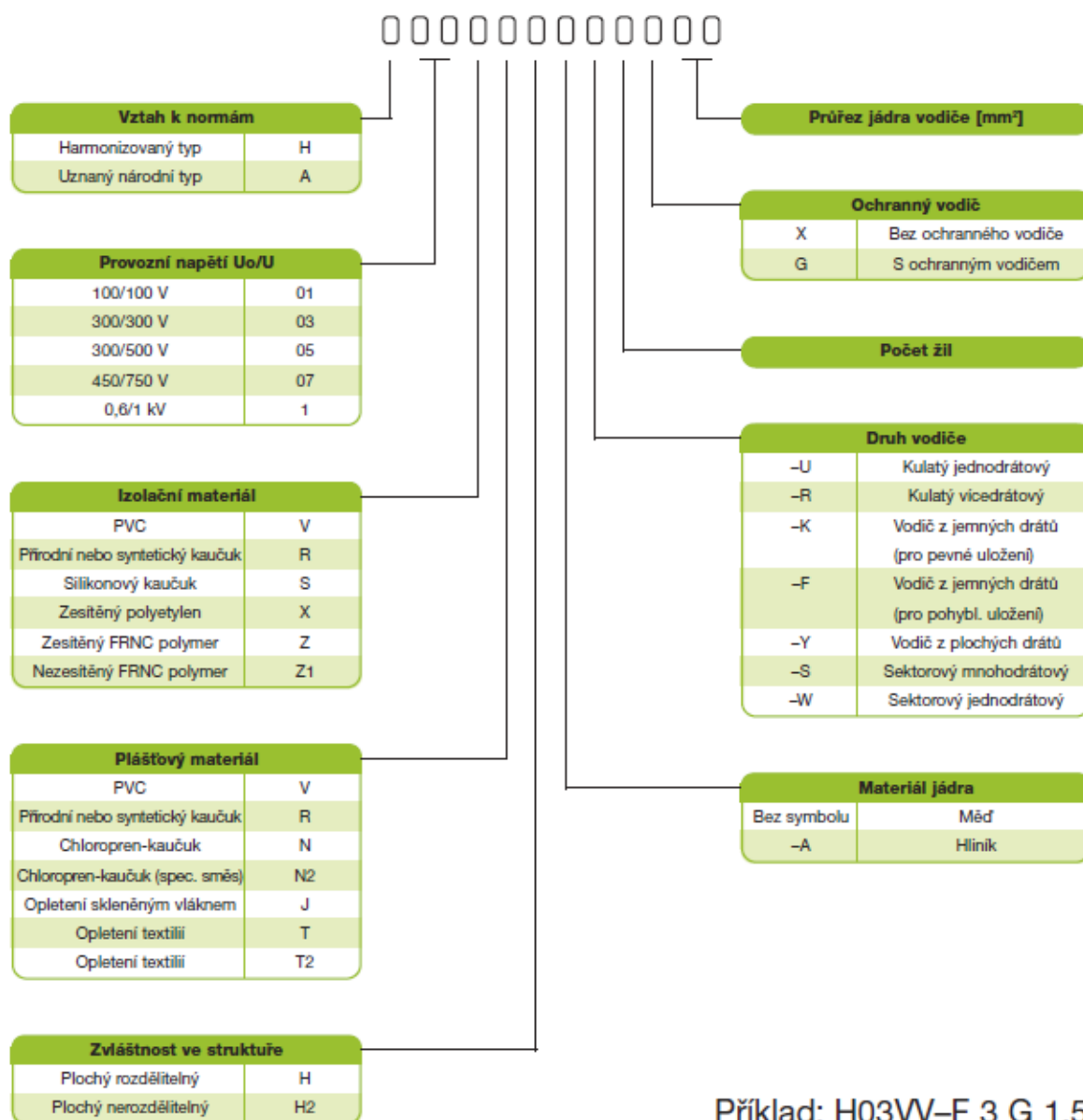
	izolované	holé
1. fáze	černá, hnědá a šedá	oranžová (popř. s doplňkovým označením)
2. fáze		
3. fáze		
střední	světle modrá	
Ochranný vodič a vodič ochranného pospojování	zelená / žlutá	

Doplňkové označení k oranžové barvě se použije, je-li třeba rozlišit vodiče jednotlivých fází. Přednostně se provede úzkými příčnými černými pruhy a to jedním pruhem pro 1. fázi, dvěma pruhy pro 2. fázi a třemi pruhy pro 3. fázi.

Elektrická trakční zařízení:

- provozovaná ss proudem, mají holé vodiče a přípojnice označeny barvami stejnosměrné soustavy
- zařízení provozovaná 1f proudem
 - vodič připojený ke kolejovému vedení (odváděcí vedení) **žlutá**
 - vodič připojený k trakčnímu vedení (napájecí vedení) **fialová**

2.9.2. Značení vodičů a kabelů podle ČSN 34 7409



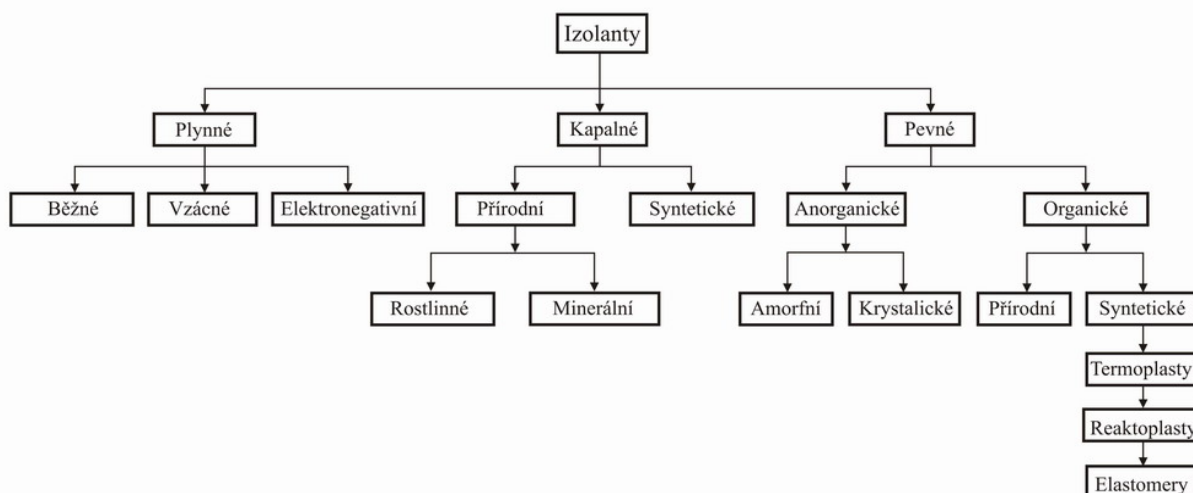
Příklad: H03VV-F 3 G 1,5

3. IZOLANTY

3.1. Rozdělení, vlastnosti a význam izolantů

Izolační materiály jsou látky s velmi velkým elektrickým odporem, zabraňují nežádoucímu průchodu elektrického proudu, např. jako izolace elektrických vodičů proti sobě navzájem a proti uzemněné kostře nebo izolace zabraňující dotyku živých částí pod napětím.

Izolační materiály se dělí podle skupenství na plynná, kapalná a pevná a ty se dále dělí podle složení, struktury a výroby (viz obr.).



Izolanty se dále dělí podle tepelné odolnosti do tříd.

Teplotní třída izolace	Y	A	E	B	F	H	C
Maximální teplota izolace $\vartheta_{\max}$ [°C]	90	105	120	130	155	180	>180

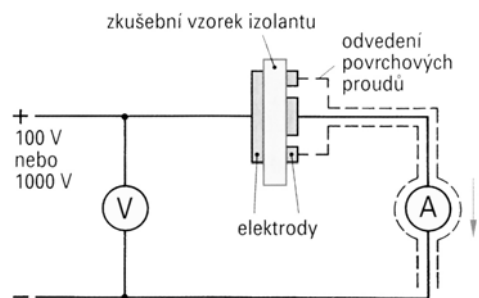
Použitelnost izolantů je závislá na jejich elektrických, teplotních a mechanických vlastnostech. Výběr dále závisí na odolnosti izolantu proti vlivům okolí a na zpracovatelnosti do potřebného tvaru.

3.1.1. Elektrické vlastnosti izolantů

K elektrickým vlastnostem izolantů patří měrný elektrický průchozí odpor, povrchový odpor, odolnost proti elektrickému oblouku, vytváření povrchových vodivých cest (svodu) a průrazná (napěťová) pevnost. K důležitým elektrickým vlastnostem izolantů při jejich použití jako dielektrik kondenzátorů nebo izolace v kabelů patří poměrná permitivita a ztrátový činitel, resp. jakost.

Měrný průchozí odpor ρ_p může být definován jako odpor krychle o hraně 1 cm mezi dvěma protějšími stranami v $\Omega \cdot \text{cm}$ (příklady viz tabulka). Měří se na vzorku materiálu ve tvaru destičky, přičemž musíme zajistit, aby kruhové elektrody byly chráněny před sběrem povrchového proudu (plazivých proudů). Průchozí odpor většiny izolantů klesá s narůstající teplotou - izolanty by měli mít co nejvyšší odpor.

Měrný průchozí odpor izolantů ρ_p v $\Omega \cdot \text{cm}$ ($1 \Omega \text{ cm} = 0,01 \Omega \text{ m}$)			
dřevo	10^9	silikonová pryskyřice	10^{15}
porcelán	10^{11}	sklo	10^{14}
polyamid	10^{12}	slída	10^{17}
fenolformaldehydová pryskyřice (bakelit)	10^{12}	PVC	10^{16}
epoxidová pryskyřice	10^{16}	polystyren	10^{16}
polyesterová pryskyřice	10^{11}	polyetylen	10^{15}
		polytetrafluoretylen	10^{18}



Povrchový odpor R_p charakterizuje izolační vlastnosti povrchové vrstvy izolantu a měří se v Ω . Povrchový odpor se může zmenšovat nepříjemnými vnějšími vlivy, jakými jsou například vlhkost a usazování nečistot.

Odolnost proti elektrickému oblouku, který se vytvoří např. ve vlhkém vzduchu nad povrchem izolátoru, je pro trvanlivost izolantů velmi důležitá. Odolnost izolantu se testuje mezi dvěma elektrodami tak, že je vyvolán a udržován elektrický oblouk a pak jsou zkoumány změny na povrchu izolantu. Izolant přitom nesmí ani vzplanout, ani se nesmí roztavit.

Elektrická pevnost E_p izolantu je maximální intenzita elektrického pole, při které ještě nedojde k průrazu, tj. k průchodu elektrického proudu. Průrazná pevnost se většinou zjišťuje na vzorku materiálu o tloušťce 1 mm (viz tabulka). Průrazná pevnost závisí na teplotě izolantu a na časovém průběhu napěťového testovacího pulzu. U izolantů požadujeme co nejvyšší elektrickou pevnost desítky až stovky $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

Průrazná pevnost E_p v kV/mm			
vzduch	2,1	silikonová pryskyřice	20–70
fenolformaldehydová pryskyřice	20	sklo	10–40
porcelán	35	slída	30–70
polyamid	50–60	PVC	20–50
epoxidová pryskyřice	35	polyetylen	70–100
polyesterová pryskyřice	10, 15	polytetrafluoretylen	20–40

Povrchové proudy (plazivé proudy) tečou vodivými cestami vytvořenými nečistotami na povrchu izolantu. Nečistoty mohou při zkratech a obloucích zuhelnatět a vytvořit pak vodivé cesty ve tvaru úzkých stop (proužků), nazývaných též povrchové svody. Odolnost proti povrchovým proudům je právě odolnost proti vzniku povrchových svodů (např. při úderu blesku může povrchový zkrat vytvořit na povrchu zaprášeného vlhkého izolátoru vodivou uhlíkovou cestu).

Odolnost proti vzniku svodů na povrchu izolantu se testuje na vodorovném povrchu vzorku zkoušeného izolantu mezi dvěma elektrodami přitlačenými na povrch. Na testovaný povrch kape vodivá kapalina (např. 0,1% roztok chloridu amonného NH_4Cl) a při střídavém napětí 100 až 600 V a maximálně 50 kapkách je měřen elektrický proud. Je-li hodnota měřeného proudu větší než 0,5 A déle než 2 sekundy, je povrch považován za narušený povrchovým proudem. Vytváření povrchových svodů je v praxi významné na deskách plošných spojů a na izolátorech vysokonapěťových vedení rozvodů a spínačů.

Poměrná permitivita dielektrika (izolantu) ϵ_r udává, kolikrát se zvětší kapacita vzduchového kondenzátoru, nahradíme-li vzduch mezi elektrodami zmíněným dielektrikem.

U izolantů je žádoucí malá permitivita (3–4, max. 10) a u dielektrik kondenzátorů je naopak žádoucí permitivita velká. Permitivita některých látek se mění s kmitočtem napětí (např. polyvinylchlorid).

Ztrátový činitel $\tan \delta$ je činitelem ztrát v dielektriku vzhledem k jalovému výkonu.

Ztrátový činitel je udáván pro určitý kmitočet a je dán vztahem: $\tan \delta = \frac{R_v}{2\pi f C}$ a způsobuje

tepelné ztráty. Pro kondenzátory i vysokofrekvenční kabely je třeba volit dielektrikum s malým ztrátovým činitelem řádově $10^{-1} - 10^{-4}$.

Jakost dielektrika Q je dána převrácenou hodnotou ztrátového činitele $Q = \frac{1}{\tan \delta}$.

3.1.2. Fyzikálně mechanické a tepelné vlastnosti izolantů

Na izolační materiály máme samozřejmě i požadavky mechanické a tepelné, jako například velkou pevnost v tahu a ohybu, velkou rázovou houževnatost, malou nasákavost, navlhavost a smáčivost, malý součinitel délkové a objemové roztažnosti a mnoho dalších.

3.2. Polarizace dielektrik a izolantů

Vložíme-li izolant do elektrického pole, působí na něj toto pole silami, které v atomu posunou částice s náboji na různé strany atomu, a tím dojde k tzv. polarizaci atomu. Polarizací se

v dielektriku

z jednotlivých atomů

vytvářejí tzv.

dipóly (elektron obíhá

jádro po eliptické dráze

tak, že se co nejvíce

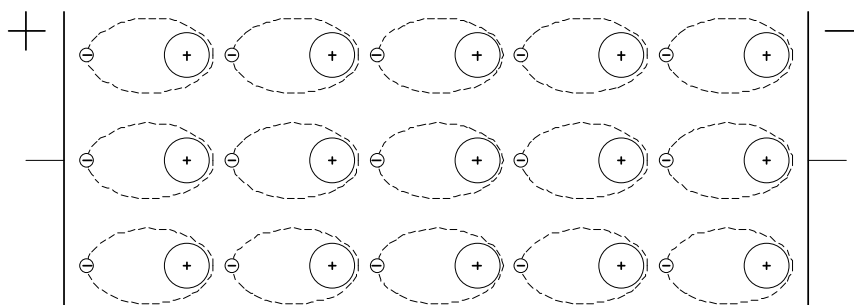
přibližuje kladné

elektrodě). Vlivem

polarizace všech atomů

materiálu a tedy

i povrchových atomů jeví se polarizované těleso jako elektricky nabitě.



3.3. Pevné anorganické izolanty

3.3.1. Rozdělení pevných anorganických izolantů

Pevné anorganické izolanty se rozdělují podle struktury na amorfní (skla) a krystalické resp. polykrytalické (azbest, slída, keramika).

3.3.2. Amorfní anorganické izolanty

Obecné vlastnosti:

- sklovitá (neuspořádaná) struktura
- silně polární látky
- malá povrchová rezistivita
- vysoká elektrická pevnost
- modifikace vlastností složením a přísadami
- variabilita druhů skel (křemičité, borité, olovnaté atd.)
- určitou uspořádanost tvoří kyslíkokřemíkové tetraedry u křemičitého skla

Sklo

Je průhledné bezbarvé tvrdé a křehké. Jeho izolační vlastnosti závisí na teplotě.

V elektrotechnice používáme tzv. technická skla složená převážně ze sklovitých oxidů (SiO_2 , B_2O_3) + dalších prvků, které dotváří charakteristické vlastnosti skla (Na, K, Ca) – vzniká tím například křemičitan sodnovápenatý nebo křemičitan dráselnovápenatý. Ze skla se vyrábějí baňky žárovek, výbojek, elektronek a obrazovek, trubice zářivek a světlovodná vlákna. Podle

použití se rozdělují skla na nízko ztrátová, zátavová, obyčejná (alkalická), skleněná vlákna, skleněné pájky. Podle aplikace se pak dělí na konstrukční skla, skla pro vn techniku (borosilikátové sklo), skleněná vlákna (hlinitoborosilikátové sklo) a skleněné pájky

3.3.3. Krystalické anorganické izolanty

Azbest nebo též **osinek**

Je vláknitou odrůdou hadce nebo serpentinu (chryzolit), tvořeného vodnatým křemičitanem hořečnatým, nebo též vláknitou odrůdou amfibolové břidlice, která navíc obsahuje křemičitan vápenatý, případně ještě další křemičitany, hlavně křemičitan železitý. Chryzolit se roztěpuje v hedvábně lesklá vlákna, užívaná ke tkaní nespalitelných látek. Azbest je nehořlavý, je poměrně odolný proti kyselinám i jiným chemikáliím, proti vysokým teplotám, oxidaci nebo korozi, je ale lámavý a po delším zahřátí křehký. Chryzolitový prach je velkým nebezpečím pro plíce, protože po vdechnutí ulpí dlouhodobě v plicích a může vyvolat rakovinu. Z tohoto důvodu již není používán a je zde nahrazován skleněnými, keramickými nebo akrylátovými vlákny, polypropylenem nebo polyakrylonitrilem.

S chryzolitem je možno se ještě setkat v žáruvzdorných azbestocementových tvárnících. A amfibolový azbest se používá zejména na kyselinovzdorné výrobky.

Slída

Jedná se buď o muskovit (slída draselná) nebo flogopit (slída hořečnatá), které se liší v podstatě jen zabarvením. Slída krystalizuje v jednoklonných šestibokých tabulkách a dá se dokonale štípat v perleťově lesklé a pružné průhledné lupínky. Je odolná proti vysokým teplotám (používala se na okénka dvířek kamen) a má velmi dobré vlastnosti jako izolant, tedy především velkou elektrickou pevnost. Štípaná slída se používá jako dielektrikum kondenzátorů nebo jako izolace, např. mezi lamelami komutátorů elektrických točivých strojů nebo mezi výkonovým tranzistorem a tělesem chladiče.

Materiál na bázi slídy se označuje jako mikanit (podle anglického slova mica = slída).

Mikanit je vyroben vysokotlakým slisováním jednotlivých plátů slídy s pryskyřičným pojivem. Mikanit se v elektrotechnice využívá například jako nosič topných spirál, nebo k izolaci mezi jednotlivými vinutími elektrických strojů.

Keramika

Jedná se o polykrystalické materiály s variabilním složením a vlastnostmi, základ jedné skupiny tvoří nejčastěji oxid hlinitý, oxid křemičitý a vody. Vyrábějí se slinováním (slisováním na prach rozemletých přísad) při teplotě nižší než je teplota tavení přísad, po kterém následuje vypálení.

Druhá skupina keramických materiálů je tvořena zejména jílem, kaolínem, nebo mastkem, které se vytvarují ve formách na požadovaný tvar a poté se vypálí v peci.

Všechny keramické materiály jsou odolné vůči vysokým teplotám i rychlým změnám teploty, vůči vlhkosti, chemickým vlivům a ionizujícímu záření, jsou žáruvzdorné, mají stabilní fyzikální i chemické vlastnosti, ale jsou křehké, značně smršťivé při spékání, jejich povrch je porézní (musí se glazovat). V elektrotechnice se keramické materiály používají například na výrobu izolátorů a součástek silnoproudé elektrotechniky, součástek odolných vůči náhlým změnám teploty, jako konstrukční materiál pro vf techniku, jako dielektrika vf kondenzátorů, jsou základem pro výrobu čipových odporů, trimrů, termohlav inkoustových tiskáren nebo pro výrobu základových desek integrovaných obvodů větších rozměrů.

Dle chemického složení se keramiky rozdělují na:

- silikátové – směs krystalických oxidů kovů + silikáty se skelnou fází (porcelány, kameniny)

- bez silikátové – sloučeniny nebo pevné roztoky oxidů kovů (feroelektrika, piezoelektrika, polovodiče)
- oxidové – jeden žáruvzdorný oxid kovu, jejich teplota tání je $2000 \div 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$, jsou tvrdší než ocel, jsou chemicky odolné, teplotně stabilní a odolné proti teplotním šokům (tyto materiály je možno řezat jen diamantovými nástroji nebo laserem) (Al_2O_3 , MgO , BeO , ThO_2 , UO_2)
- bez oxidové – vysokotavitelné sloučeniny (karbidy, nitridy, oxidy, silicidy, sulfidy aj.).

Použití silikátových keramik

- porcelán – izolátory pro elektrická vedení, průchodky, kabelové koncovky
- kamenina – výrobky komplikovaných tvarů a velkých rozměrů, velké izolátory, nosiče odporových drátů apod.
- steatit – podpěrné izolátory, průchodky a izolační součásti nn a vn
- pro silnoproud – podpěry, průchodky vn, výkonové transformátory
- ultraporcelán – konstrukční součásti s velkou mechanickou pevností
- korundová keramika – vakuová elektronika, vf technika

Bez silikátové keramiky

- Feroelektrika – jedná se o látky se spontánní polarizací, která dosahuje v elektrickém poli vysokých hodnot, polarizace ale klesá s rostoucí teplotou a při dosažení Curieovy teploty zaniká (BaTiO_3 – kondenzátorová keramika)
- Pyroelektrika – jejich polarizace v blízkosti Curieovy teploty strmě klesá, používají se na teplotní (infračervené) detektory (sloučeniny na bázi PbZrO_3 , BaTiO_3 , LiNbO_3)
- Piezoelektrika – u nich je elektrická polarizace vyvolána pružnou deformací (a naopak polarizací dochází k deformacím), používají se pro výrobu aktivních prvků v elektroakustických měničích, rezonátorech v oscilátorech (krystal křemene SiO_2 , Seignettova sůl, LiNbO_3 , LiTaO_3)

Poznámka: většina feroelektrických látek je zároveň piezoelektrikem

3.4. Pevné organické izolanty

Jedná se o sloučeniny uhlíku, vodíku, kyslíku a dalších prvků, jsou to látky nízkomolekulární nebo vysokomolekulární, jejich mechanické vlastnosti jsou většinou závislé na teplotě a jejich elektrické vlastnosti často závislé na vlhkosti materiálu. Jsou buď přírodní a syntetické.

3.4.1. Přírodní organické izolanty

Podle původu se dělí na živočišné (šelak, hedvábí), rostlinné (kalafuna, jantar, kopál, dřevo, bavlna, len, kaučuk) a zpracované přírodní suroviny (deriváty celulózy, papír, pryž). Podle charakteru se dělí na protein plasty (vláknité, globulární), pryskyřice (rostlinné, živočišné), pryže (vulkanizovaný kaučuk), materiály na bázi celulózy (celulóza a její deriváty, papír, lepenka, bavlna, len, dřevo), vosky (včelí vosk, parafin, ozokerit, cerezín), bitumeny (asfalt) a kompaundy (směsi bitumenů, vosků, pryskyřic a dalších látek)

Protein plasty se dále dělí na vláknité (jsou ve vodě nerozpustné, fibrin - hedvábí, keratin - peří, vlasy, nehty, kolagen - spojovací tkáň, myosám - svalovina) a globulární (jsou ve vodě rozpustné, kazein - mléko, albumin - krev, zein - tkáň).

Přírodní pryskyřice jsou buď rostlinné (kalafuna, jantar, kopál) nebo živočišné (šelak). *Kalafuna* je ze smoly jehličnatých stromů, je nejlevnější, nejrozšířenější, zahříváním měkne, chladem křehne, používá se při pájení, jako přísada do elektroizolačních laků, do tmelů pro vakuovou techniku apod.

Jantar je nejtvrdší fosilní pryskyňce, jeho rezistivita je $10^{15} \div 10^{17} \mu\Omega\cdot\text{m}$, teplota tání kolem 250 °C, elektrická pevnost 200 kV/cm, používá se k izolování přívodů velmi citlivých měřicích přístrojů.

Kopály jsou fosilní nebo čerstvé pryskyřice tropických jehličnatých stromů, jsou buď tvrdé (bod měknutí kolem 130 °C) nebo polotvrdé (bod měknutí od 75 °C), používají se jako přísada k olejovým lakům.

Šelak jedná se o pryskyřici vylučovanou samičkami Červce kopálového, je žluté až červenohnědé barvy, používá se jako pojivo pro mikanity a mikafolia;

Pryže

Vyrábějí se z latexu, mléka kaučukových rostlin a z vulkanizačního činidla (síra, peroxidy, selen, telur, aj.) tzv. vulkanizací, kterou se mění vlastnosti přírodního kaučuku, především se zvyšuje mechanická pevnost, odolnost proti vysoké a nízké teplotě nebo odolnost proti rozpouštědlům.

Materiály na bázi celulózy

Celulóza a její deriváty, jedná se o glukózový polysacharid $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, je to silně polární látka, má velké dielektrické ztráty a permitivitu, je nerozpustná ve vodě a v některých chemikáliích, ale snadno navlhá, celulóza se používá do elektroizolačních laků a na výrobu textilních izolantů. Deriváty celulózy jsou buď acetáty celulózy, ty se používají na výrobu izolačních pásek nebo na pláště vodičů, nebo étery celulózy a ty se dělí na ve vodě rozpustné, které se používají jako pojiva do nátěrů, lepidla, na impregnaci elektrotechnického papíru a textilu a ve vodě nerozpustné, které se používají jako nátěrové hmoty

Elektrotechnický papír se vyrábí na papírenských strojích nejčastěji z buničiny ze smrkového nebo jedlového dřeva v tloušťkách od 5 μm do 0,18 mm, vlastnosti papíru hodně závisí na vlhkosti, neboť papír má vysokou savost. Elektrická pevnost je závislá na struktuře, hustotě, povrchu a tloušťce, zvětšuje se napuštěním olejem, impregnací různými pryskyřicemi nebo lakováním. Elektrotechnický papír se používá pro silnoproudé, slaboproudé a elektrolytické kondenzátory, pro výrobu tvrzeného, lakovaného a polepovacího papíru.

Elektrotechnické lepenky se vyrábějí na speciálních strojích jako nehlazené (obyčejné) s matným povrchem nebo jako lesklé s hlazeným nebo leštěným povrchem. Lesklé lepenky o tloušťce 0,1-0,6 mm se používají k izolaci drážek elektrických točivých strojů (hlazený, leštěný povrch se při ohybu nesmí porušit). Matné lepenky se používají jako izolace mezi vrstvami a jednotlivými vinutími transformátorů a k výrobě kostříček malých transformátorků.

Vosky

Přírodní vosky jsou složité organické sloučeniny živočišného, rostlinného nebo minerálního původu. Mají bílou až žlutou barvu, jsou charakteristické krystalickou strukturou a při ohřevu přecházejí náhle z pevného skupenství do kapalného. Jejich bod tání bývá poměrně nízký (do 100 °C), mají malou mez pevnosti v tahu a malou navlhavost, málo propouštějí vodní páru.

Rozdělují se na nepolární (parafín, ozokerit, cerezín), které se získávají jako produkt při odparafinování minerálních olejů, mají malou relativní permitivitu, malý činitel dielektrických ztrát a velkou rezistivitu a slabě polární (včelí vosk, karnaubský vosk).

Parafín se vyrábí v několika druzích, které se navzájem liší bodem tání (48 až 60 °C).

V elektrotechnice se používají jen druhy s vyšším bodem tání. Parafín při delším ohřevu nad 130 °C ztrácí vlivem oxidace dobré izolační vlastnosti. Jeho nevýhodou je velká smrštitost při tuhnutí (o 11 až 15 %), nízký bod tání a značná křehkost. Používá se k impregnování

kondenzátorů pro nízké napětí s papírovým dielektrikem, které pracují při teplotách pod 55 °C, a jako složka impregnačních materiálů.

Ozokerit je přírodní směs pevných vysokomolekulárních uhlovodíků s nečistotami (asfalteny). Vyskytuje se v horninách v oblastech, kde ropná ložiska pronikají na zemský povrch. Z těchto hornin se vytahuje horkou vodou a čistí přetavením. Ozokerit se proto (ovšem nesprávně) nazývá zemní vosk. Především se používá jako surovina k výrobě cerezínu. Při ohřevu do teploty 120 °C se jeho vlastnosti nemění, taví se v rozmezí teplot 65 až 95 °C. Zpracovává se na kompaundy používané při výrobě a spojování kabelů.

Cerezín je bílá až žlutá voskovitá látka získaná např. rafinací ozokeritu, která při teplotách 45 až 90 °C měkne až ke skápnutí, při tuhnutí se smršťuje mnohem méně než parafin. Používá se k výrobě svíček, v kosmetickém průmyslu atd. V elektrotechnice je vhodný jako zalévací látka např. pro povrchovou úpravu radiotechnických transformátorů.

Včelí vosk je tuhá látka světlehnědé barvy, zrnitého lomu, která se získává vytavením včelích plástů, jeho elektrické vlastnosti velmi závisí na čistotě. Používá se k lepení cívek pro vf techniku a jako složka různých kompaundů.

Karnaubský vosk je tvrdý a křehký a má světležlutou až hnědozelenou barvu. Vytváří se v podobě práškového povlaku na listech voskové palmy, která roste v rovníkové oblasti jižní Ameriky. Používá se jako přísada do jiných typů vosku k zvětšení jejich tvrdosti a zvýšení teploty měknutí.

Bitumeny (uhelné živice)

Jsou amorfní látky tmavohnědé až černé barvy, složené z vysokomolekulárních uhlovodíků, vznikají přeměnou tuků, vosků a pryskyřic, při nízkých teplotách jsou křehké a mají lasturovitý lom. Podle původu se dělí na syntetické, které se získávají jako zbytky po frakční destilaci ropy a přírodní v podobě asfaltových jezírek. Přírodních asfaltů, označované jako asfaltity mají nízký obsah popela, vysokou teplotu měknutí a velmi dobré elektroizolační vlastnosti, jsou velmi levné a snadno zpracovatelné. Používají se především k výrobě asfaltových laků a barviv, k přípravě kompaundů nebo elektroizolačních laků, zalévají se jimi nádoby kondenzátorů, koncovky a spoje kabelů nebo průchodky.

Kompaundy

Připravují se z bitumenů, vosků, laků a dalších látek, jsou to zalévací, impregnační nebo lepicí prostředky, které neobsahují rozpouštědla ani jiné těkavé látky a jsou schopny jednotlivě a bez pórů vyplňovat prázdné prostory v izolačních systémech, zabraňují ionizaci vzduchu v mezerách a vnikání vlhkosti do vláknitých, kombinovaných a vrstvených izolantů nebo celých izolačních systémů.

3.4.2. *Syntetické organické pevné izolanty* (umělé hmoty neboli plasty)

Nejdůležitějšími základními surovinami pro výrobu umělých hmot jsou ropa a zemní plyn. Umělé hmoty jsou lehké, odolné proti vodě, elektricky nevodivé, tepelně dobře izolující a chemicky odolné.

Podle chování plasty rozdělujeme na termoplasty, reaktoplasty (termosety) a elastomery.

Termoplasty - za tepla se stávají tvárné, plastické a lze je beztržkově přetvářet, vstříkovat do forem nebo svařovat. Jsou opakovaně tepelně tvarovatelné a při přechodu zpět do původní teploty se vrací do původního stavu. Při teplotách <0 se však stávají křehkými.

Reaktoplasty (termosety) - teplem nejdříve měknou a při dosažení vytvrzovací teploty dojde k jejich vytvrzení a tyto látky se stávají tvrdými a pevnými – tato

změna je nevratná. Reaktoplasty jsou po vytvrzení nerozpustné, netavitelné, lze je třískově obrábět, ale jsou křehké a obtížně recyklovatelné. Při překročení nejvyšší provozní teploty ztratí pevnost a rozpadnou se, při velmi vysoké teplotě zuhelnatí nebo shoří. Jedná se nejčastěji o umělé pryskyřice, které se připravují jako dvousložkové. Po smíchání složek (základní hmoty a tužidla) je třeba touto směsí vyplnit nachystanou formu a směs během několika minut nebo desítek minut za vývinu tepla ztvrdne.

Elastomery - jsou elastické i při vyšších teplotách. Skládají se z dlouhých polymerových řetězců, které se při vulkanizaci (vpravení síry do chemické struktury elastomeru - vytvoří se tzv. sírné můstky) propojí v síť. Ta pak může být pružná (1-2% S) až velmi pevná (35% S).

Syntetické organické pevné izolanty jsou tvořeny makromolekulami, což jsou útvary z velkého počtu kovalentně vázaných atomů tvořících řetězce, vznikají spojováním nízkomolekulárních jednotek tzv. monomerů. Vyrábějí se některým z druhů polyreakce: polymerací, polykondenzací nebo polyadicí. Podmínkou pro vznik makromolekuly je vytvoření alespoň dvojnásobné vazby mezi základními stavebními prvky (C, H, O, N, F, Cl, Si).

Polymerace – je to řetězová reakce, při které vznikají sloučeniny s násobnými vazbami. Polymer má stejné chemické složení jako monomer, ale jeho molekulová hmotnost roste lavinovitě. Stupeň polymerace to je poměr hmotnosti polymeru ku hmotnosti monomeru.
Polymerace má tři stupně:
- iniciace - rozběh řetězové reakce - začínají se otvírat vícenásobné vazby uhlíku
- propagace - růst řetězce - uvolňuje se reakční teplo, které musí být odváděno
- terminace - ukončení růstu řetězce

Polykondenzace – je to ve srovnání s polymerací pomalá stupňovitá reakce, při které dochází k odštěpování nízkomolekulárních reakčních zplodin (H_2O , amoniak, HCl). Polykondenzát má jiné chemické složení než monomer a to buď homogenní, nebo heterogenní.

Polyadice – je to speciální případ polykondenzace, kdy dochází k postupné adici monomeru a vznikají polymery s heteroatomy v řetězci. Chemické složení polyaduktu je stejné jako monomeru. Polyadicí nedochází k odštěpení vedlejších produktů.

Vlastnosti a použití některých plastů

Termoplasty

Látka	Vlastnosti	Použití
Polyvinylchlorid (PVC)	hustota 1,35 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 80°C, bezbarvý, průhledný, odolný kyselinám, zásadám i rozpouštědlům, lepitelný, svařitelný, nejrozšířenější, první ve světě	izolace vodičů a kabelů, elektroizolační účely pro nn, vn do 10 kV při nízkých kmitočtech (trubky, krabice, ...) izolační pásy, fólie (měkčený PVC), zásuvky, instalační přístroje
Polyetylen (PE)	hustota 0,92 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 110°C, bezbarvý až mléčný, voskovitý, svařitelný, nelepitelný	izolace vodičů a kabelů (hlavně pro vf — techniku), fólie, tvarovatelné díly, smršťovací obalové fólie, ochranné povlaky kovů; izolace elektronických přístrojů, výlisky pro vf techniku
Polystyren (PS)	hustota 1,1 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 90°C, sklovitě čirý, leštitelný, tvrdý, křehký, lepitelný, odolný proti zředěným kyselinám a louhům	tlačítka, šablony pro kreslení, kryty elektrických přístrojů, průzory (průhledné kryty), výlisky, polotovary, vlákna, pásy, fólie; nátěrové látky pro vf techniku, pěnový polystyren pro výplně přepravních obalů
polyamid (PA) (silon, nylon)	hustota 1,14 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 150°C, rohovitý (neprůhledný), mléčně bílý, hladký, pevný, tvrdý, odolný proti roztržení, svařitelný navlhavý - za vlhka se zhoršují elektrické vlastnosti	ovládací knoflíky, zásuvky, pouzdra přístrojů, nosné části izolačních krytů, sekundární izolace, konstrukční materiál, hmoždinky, ochranné helmy
polytetrafluoretylen (PTFE)	hustota 2,2 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 250°C, voskovitý, nelepitelný, velmi hladký, odolný proti většině chemikálií (asi chemicky nejodolnější plast), nepolární	izolování vodičů a kabelů (ve vf technice), výroba izolátorů, povrch domácích přístrojů, izolační hadice, desky plošných spojů, teflon

Termosety

epoxidová pryskyřice (EP)	hustota 1,2 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 150°C, tvrdá, houževnatá, dobře zatéká do formy, dá se dobře lepit, chemicky stálá	zalévací pryskyřice pro elektromotory, kabelové spojky a vícevrstvé desky plošných spojů, kryty přístrojů
fenolformaldehydová pryskyřice (PF)	hustota 1,25 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 130°C, tvrdá, křehká, odolná proti povrchovým svodům, tmavé zbarvení	pojiva, lepidla, tmely, technické pryskyřice, desky plošných spojů, kostřičky cívek, svorkové lišty, části vypínačů
nenasyčená polyesterová pryskyřice (UP)	hustota 1,2 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 150°C, tvrdá až měkká, houževnatá, čirá, dobře zatéká do formy, lepitelná	krabice pro odbočky a vypínače, skelné lamináty, lisovací směsi, zalévací hmota, pouzdra a kryty magnetofonové a video pásy, diskety,

polyuretanová pryskyřice (PUR)	hustota 1,25 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 100°C, tvrdá až měkká, elastická, zpěnovatelná, dobře přilnavá	lepidla a laky, pěna pro izolace chladniček, zalévací pryskyřice, skříně rozhlasových a televizních přijímačů
melamin-formaldehydová pryskyřice (MF)	hustota 1,5 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 120°C, tvrdá, houževnatá při rázech, odolná proti povrchovým svodům, stálá na světle, křehká	vypínače, zásuvkové a odbočovací krabice, držadla žehliček, lepidla, laky a pojiva, díly pro autoelektriku
silikonová pryskyřice (SI)	hustota 1,9 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 300°C, tvrdá až měkká, resp. elastická velmi malá nasákivost vodou, stabilní v oleji, chemicky inertní, adhezivní, velká elektrická pevnost, odolná proti záření	impregnace vinutí motorů a transformátorů, uložení elektronických prvků, hmota pro odlévání, izolanty, pojivo vrstvených izolantů

Elastomery

styren-butadienový kaučuk (SBR) a butadienový kaučuk (PB)	hustota 15 kg/dm ³ , nejvyšší provozní teplota 70°C, černí barvy, výborná tažnost	technická pryž k opláštění vodičů a kabelů a k zalévání vidlic přírodních šňůr
chloroprenový kaučuk (CR)	nejvyšší provozní teplota 100°C, dobrá odolnost proti zředěným kyselinám i proti povětrnostním vlivům, dá se jen obtížně zapálit	k opláštění pohyblivých kabelových přívodů se středním mechanickým namáháním
silikonový kaučuk (SI)	nejvyšší provozní teplota 180°C, jsou odolné proti ultrafialovému záření a ozonu, málo navlhají, jsou nehořlavé, mají velkou elektrickou pevnost	jako zalévací hmoty, lepidla

Rozdělení plastů podle vzniku

<i>Polymerace</i>		<i>Polykondenzace</i>		<i>Polyadice</i>
polyetylen	PE	polyamidy	PA	epoxidy EP
polystyren	PS	polykarbonáty	PC	polyuretany PUR
polyvinylchlorid	PVC	fenoplasty	PF, CF	
polypropylen	PP	siloxany	SI	
polyizobutylen	PIB	polyestery	SP, UP	
polymethylmetakrylát	PMMA	polyimidy	PI	
polytetrafluoretylen	PTFE			

3.5. Kapaln  a plynn  izolanty

3.5.1. Kapaln  izolanty

Vodivost v kapalinách je v t sinou způsobena ionty nečistot a p r m   . Velmi často to bývají rozpt len  k pičky vody, kter  se už v slab m elektrick m poli chovají jako voln  nosiče náboje a způsobují tak p r chod elektrického proudu. Ve velmi silných elektrických polích jsou nosiči proudu elektrony vznikl  nárazovou ionizací. N kter  kapaliny jsou ho lav  (popř. v bu n ), a proto je při jejich pou iv n  třeba zachovávat pravidla bezpečnosti při p rac , dan  bezpe nostn mi předpisy. Mezi obecn  vlastnosti kapalných izolantů pat i vysok  elektrick  pevnost, dobr  tepeln  vodivost, plnění p r  a dutin

Kapaln  izolanty se rozdělují na izolační oleje, syntetick  kapaliny a elektroizolační laky

Izolační oleje

Ty se rozdělují podle jejich původu na rostlinn  a miner ln .

Rostlinn  oleje – jedná se o směsi esterů, glycerin  a nenasycených mastných kyselin, pat i sem nap říklad ricinov  olej (nevysychá), kter  se pou iv  v papírových stejnosměrných kondenzátorech, ln n  olej (vysychá), pou iv  se jako p r sada do elektroizolačních laků

Minerální oleje – získávají se vhodnou rafinací z lehkých olejů vzniklých při destilaci ropy. Tyto oleje jsou ho lav , při provozu stárnou, a proto se musí pravideln  přezkušovat jejich elektrick  vlastnosti. Stabilita elektrických vlastností se zlepšuje různými inhibitory (antioxidanty). Je-li to nutn , musí se olej regenerovat,  im  se olej zbavuje nečistot a oxidačních produktů, a získá p vodn  chemick  a fyzik ln  vlastnosti. Dnes se z této skupiny pou iv j  jen oleje transform torov .

Transform torov  oleje - jsou to světle  lut , m lo visk zn  a téměř neutr ln  kapaliny, zpravidla aktivovan  proti oxidaci. Obzvláště nep r zniv  na dielektrick  vlastnosti a na elektrickou pevnost působí navlhnutí oleje. Při zvv   en  teploty se zv    uje jeho vodivost a to vede ke zv    en  ztrátového činitele $\tan \delta$ a opět ke sn  en  jeho elektrick  pevnosti. Nejčastěji se pou iv  olej vyroben  na bázi chlorovaných uhlovodíků, kter  se pou iv  nejen jako izolační a chladicí náplň transformátorů, ale i ve sp n  ich, silových kondenzátorech či jiných vn za izen ch.

Syntetick  kapaliny

S ohledem na nevýhody ropných izolačních olejů (navlhavost, hořlavost atd.) se často pou iv j  syntetick  kapaln  izolanty, kter  dosahují lepších vlastností a jsou především neho lav .

Silikonov  oleje - jsou  ir  tekutiny s velmi roz  lnou viskozitou podle druhu a podle způsobu p r pravy. Netuhnou ani při teplotách okolo -60°C . Při vysokých teplotách se z nich neodpařují t kav  látky, takže jsou nezap ln  a neho lav  (asi do 500°C). Trval  tepeln  odolnost silikonových olejů je 150 až 200 $^{\circ}\text{C}$. Jejich chemick  netečnost vyl  uje oxida n  stárnutí a možnost koroze jimi konzervovaných izolantů a kovů. Odpuzují vodu a zabr n j  navlhání pórovitých materiálů. Jsou zdravotn  ne avadn . Jejich relativn  permitivitu ovlivňuje viskozita ($\epsilon_r = 2,2$ až 3), ztr tov  činitel bývá rádu 10^{-3} a  10^{-4} a jejich elektrick  pevnost bývá v rozmezí 20 až 30 kV.mm⁻¹. Pou iv j  se v transformátorech velkých výkonů, v tepeln  velice namáhaných za izen ch a v kondenzátorech.

Polybutyleny - jsou odoln  proti oxidaci a slunečnímu z  en , pou iv j  se jako náplň kabelů nebo impregnace sv tkov ch kondenzátorů.

Elektroizolační laky

Mají velký význam při výrobě elektrotechnických zařízení, která obsahují vinutí (točivé stroje, transformátory, tlumivky, cívky atd.). Laky mají funkci elektrickou (vytvářejí povrchovou izolační vrstvu na vodičích a vyplňují mezery ve vinutí, čímž zabraňují vnikání vlhkosti a vzduchu), funkci mechanickou (zlepšují soudržnost a pevnost izolace a její odolnost proti mechanickému poškození), funkci chemickou (chrání izolační systém proti působení vzdušného kyslíku, proti olejům, chemickým výparům, prachu apod.) a funkci tepelnou (zvětšují tepelnou vodivost izolace, a tím zlepšují odvod tepla - zlepšují chlazení). Lak je vlastně roztok filmotvorných složek (popř. ještě dalších přísad) v rozpouštědlech. Po odpaření těkavých rozpouštědel vznikne souvislá vrstva (lakový film) tloušťky od několika setin až do několika desetin milimetru. Hlavní složka laku, filmotvorná látka, bývá tvořena přírodními nebo syntetickými pryskyřicemi, termoplasty, vysychavými rostlinnými oleji, asfalty atd. Tyto filmotvorné složky jsou rozpuštěny v organických rozpouštědlech (benzín, alkohol, xylen, terpentýn, kresoly, ethylacetát).

Mezi důležité vlastnosti laků patří obsah sušiny, což je souhrnný název pro složky, které zůstanou po odpaření rozpouštědla – udává se v procentech.

Podle použití se elektroizolační laky rozdělují na laky na vodiče (tzv. smalty; jsou dobře přilnavé, ohebné a chemicky odolné), impregnační laky (mají malou viskozitu a velkou tepelnou vodivost), povrchové laky (dobře přilnou k izolantu, vzniklý film je hladký a souvislý), lepivé laky (jsou dobře lepivé i při vyšších teplotách), termolepivé laky (na lakovaných drátech vytvářejí termoplastický film a po navinutí cívky a jejím ohřátí se jednotlivé závity slepí a cívka pak tvoří kompaktní celek).

Podle chemického složení rozlišujeme laky z přírodních pryskyřic (lihové laky), laky z vysychavých olejů (olejové laky) a laky ze syntetických pryskyřic a polymerů (syntetické laky).

Lihové laky - filmotvornou složkou jsou přírodní pryskyřice. Hlavním zástupcem těchto laků jsou šelakové laky, které mají význam při výrobě slídových izolantů.

Olejové laky - filmotvorná složka olejových laků je kombinací vysychavých rostlinných olejů s přírodními pryskyřicemi nebo se syntetickými pryskyřicemi. Jsou vhodné jako povrchové laky.

Syntetické laky - filmotvorná složka je tvořena nejčastěji reaktoplasty, někdy také termoplasty s velkou tepelnou odolností. Podle této složky rozlišujeme syntetické laky polystyrenové, polyvinylchloridové, polyvinylacetátové, polyamidové, polyesterové, epoxidové, polyurethanové, silikonové a polyimidové.

3.5.2. Plynné izolanty

Plyny se skládají z elektricky neutrálních částic volně vyplňujících celý prostor. Všechny nosiče náboje v plynu jsou natolik silně vázané, že plyn samotný nemá schopnost vést elektrický proud. Působí-li na částice plynu různé záření nebo elektrické pole, způsobí ionizaci plynu, takže plyn povede elektrický proud. Takto vzniklé volné nosiče náboje (ionty) se v elektrickém poli urychlují a přitom dochází ke srážkám s neutrálními molekulami a tato energie může neutrální molekulu rozštěpit na elektron a kladný iont. Tím prudce narůstá četnost srážek a vzniká stále větší počet iontů a volných elektronů – tzv. nárazová ionizace. Vznik nárazové ionizace vede vzápětí k průrazu plynného izolantu.

Mezi obecné vlastnosti plynných izolantů patří malá relativní permitivita ($\epsilon_r \approx 1$), nulové dielektrické ztráty, schopnost regenerace, rovnoměrné vyplnění prostoru, zvětšení elektrické pevnosti při zvýšení tlaku a snížení elektrické pevnosti se zvýšením teploty.

Plynné izolanty se používají tam, kde není velké elektrické namáhání nebo kde vyžadujeme malé dielektrické ztráty

Plynné izolanty dělíme na běžné plyny, vzácné plyny a tzv. elektronegativní plyny.

Použití běžných plynů

Vzduch - je nejběžnější a nejdostupnější plyný izolant. Je to směs dusíku (75 %), kyslíku (23 %) a dále argonu, oxidu uhličitého, vodní páry a nepatrných dílů neonu, helia, kryptonu a xenonu. Elektrická pevnost vzduchu závisí na tloušťce vrstvy; při vzdálenosti elektrod 10 mm je asi $3,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$. V průmyslových prostředích je vzduch velmi znečištěný, což zhoršuje jeho dielektrické vlastnosti. Používá se především jako izolace mezikontaktní dráhy většiny spínačů na nízké napětí a u tlakovzdušných vn vypínačů a jako izolace venkovního holého vedení.

Vodík - má ze všech plynů největší tepelnou vodivost. Jeho elektrická pevnost je však velmi malá (asi $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$). Vodík má čtrnáctkrát menší hustotu než vzduch, takže klade pohyblivým se částem mnohem menší aerodynamický odpor. Používá se k chlazení velkých turboalternátorů, protože dobře odvádí ztrátové teplo a dochází k menším aerodynamickým ztrátám, takže lze zvětšit výkon stroje. Jeho nevýhodou je, že ve směsi se vzduchem tvoří třaskavou směs.

Dusík - je chemicky stálý a netvoří výbušnou směs, ve stlačeném stavu se používá zejména k plnění vysokonapěťových kabelů, kondenzátorů a menších transformátorů. Technický dusík se získává frakční destilací kapalného vzduchu. Kapalný dusík se využívá v kryotechnice jako součást chladicího systému supravodivých kabelů.

Oxid uhličitý - je těžší než vzduch, používá se ve stlačeném stavu jako dielektrikum kapacitních normálů a někdy jako náplň ve výbojkách.

Použití vzácných plynů

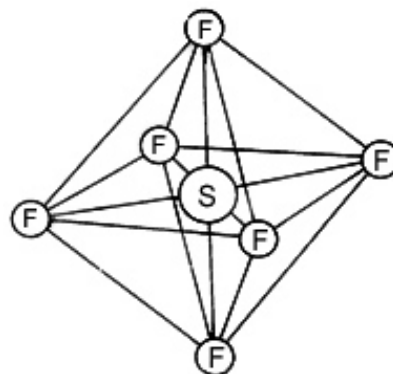
Vzácné plyny se na Zemi vyskytují jen ve velmi malém množství. Patří mezi ně helium, neon, argon, krypton a xenon. Tyto netečné (inertní) plyny se vyznačují tím, že vnější orbity jejich atomů jsou plně obsazeny elektrony (VIII. skupina periodické tabulky prvků), takže se nemohou chemicky slučovat s ostatními prvky.

Používají se především v osvětlovací technice, jako náplň výbojek nebo jako příměs ve výbojkách či žárovkách. Kapalně helium se také často používá v kryogenní technice (například k chlazení supravodivých kabelů nebo elektromagnetů)

Použití elektronegativních plynů

Jedná se uměle vyráběné plyny s obsahem chloru nebo fluoru, dnes je to především fluorid sírový.

Fluorid sírový SF_6 je bezbarvý bez zápachu, nehořlavý a nejedovatý. Patří k nejtěžším plynům (asi 5 x těžší než vzduch), patří k nejstabilnějším chemickým sloučeninám, protože molekula SF_6 má souměrnou strukturu charakterizovanou šesti kovalentními vazbami. Kolem atomu síry, umístěného v těžišti molekuly, je seskupeno šest atomů fluoru a výsledkem této struktury je velká chemická stabilita i při vysokých teplotách. Na izolační stav SF_6 mají kromě vlhkosti vliv tlak plynu, tvar elektrod, nečistoty elektrod, drsnost elektrod, nečistoty plynu, vliv vloženého izolantu, doba a tvar přiloženého napětí a taky homogenita pole. Používá se ke zhašení oblouku v plynotlakých vn vypínačích, k izolaci všech prostor vn zapouzďených rozvaděčů, ve vlnovodech a koaxiálních kabelech.



4. POLOVODIČE

4.1. Vlastnosti polovodičů

Polovodiče jsou látky, které jsou z hlediska rezistivity na rozmezí mezi vodiči a nevodiči. Mají tyto charakteristické vlastnosti:

- jejich rezistivita bývá v rozmezí od $10^{-6} \Omega \cdot m$ do $10^8 \Omega \cdot m$ a velice závisí na čistotě polovodiče. Už nepatrným množstvím příměsí se rezistivita změní o několik řádů (zatímco u vodičů nanejvýš o jeden řád),
- polovodiče mají záporný teplotní součinitel odporu ($\alpha_R < 0$), takže se stoupající teplotou se jejich elektrický odpor snižuje,
- průchodem proudem se nemění chemické ani strukturální vlastnosti polovodičů (přenos náboje je zprostředkován elektrony),
- při teplotách blízkých teplotě 0 K se polovodiče stávají nevodiči (izolanty),
- vlastnosti polovodičů lze v širokém rozmezí ovlivňovat složením a strukturou.

Podle chemického složení rozlišujeme polovodičové prvky (např. Ge, Si, Se) a polovodičové sloučeniny (dvousložkové neboli binární, např. GaAs, a trojsložkové neboli ternární).

Podle struktury dělíme polovodiče na krystalické (Ge, Si) a amorfní (oxidy, sulfidy atd.).

V praxi mají největší význam krystalické polovodiče, přesněji řečeno jejich monokrystaly (čistý polovodičový materiál).

4.2. Elektrická vodivost polovodičů

U polovodičů rozlišujeme vlastní a nevlastní (příměsovou) vodivost.

Vlastní polovodiče

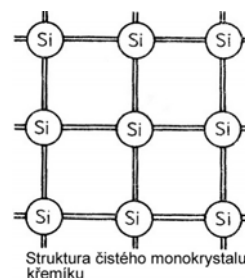
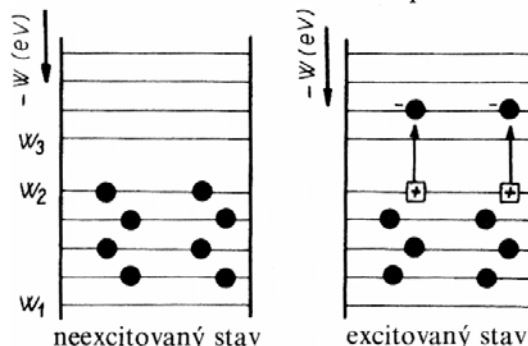
Pro vysvětlení vlastní vodivosti polovodiče vycházíme z absolutně čistého monokrystalu, jehož pásové schéma je na obr. (neexcitovaný stav) při teplotě blízké 0 K. Valenční pás je plně obsazený a ve vodivostním pásu nejsou žádné elektrony. Zvýšíme-li teplotu tohoto polovodiče, dojde k tzv. excitaci neboli vybuzení a elektrony přejdou do vyšších energetických hladin, přičemž elektrony některých atomů získají takovou energii, že mohou překonat zakázaný pás a dostat se do vodivostního pásu (viz obr. excitovaný stav). Tyto elektrony pak způsobují tzv. elektronovou vodivost neboli vodivost typu N (negativní vodivost).

Tím, že elektron opustil původní energetickou hladinu, zůstane na této hladině místo bez elektronu, které se projevuje jako místo s kladným nábojem a nazývá se díra. Působením elektrického pole, teploty, světla apod. může do díry přeskočit jiný elektron, což se projeví stejně, jako by se díra přemístila do polohy, kterou původně zaujímal přeskakující elektron. Postupným přeskakováním elektronů se tedy díra posouvá polovodičem a vzniká tak tzv. vodivost děrová neboli vodivost typu P (pozitivní vodivost).

Polovodič, který je dokonale čistý a má stejný počet elektronů i děr, se nazývá vlastní polovodič.

Typickými krystalickými polovodiči jsou germanium a křemík

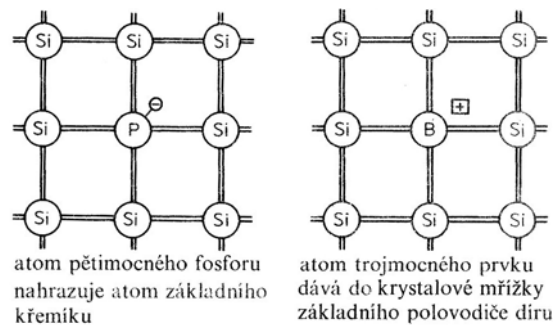
Pásové schéma absolutně čistého polovodiče



Nevlastní polovodiče

Nevlastní polovodič vzniká mírným znečištěním monokrystalického čistého polovodiče příměsemi (na jeden atom příměsí asi 10^3 až 10^9 atomů vlastního polovodiče). Křemík (nebo

germanium) vytváří kovalentní krystaly se čtyřmi vazebnými elektrony, a jestliže přidáme ke křemíku jako příměs některý pětímocný prvek, např. fosfor (P), astat (As), nebo antimon (Sb), nahradí atomy fosforu některé atomy křemíku v mřížce. Čtyři z pěti jeho valenčních elektronů nahradí vazbu valenčních elektronů atomu křemíku, pátý valenční elektron zůstane jen slabě vázaný, neboť se neúčastní kovalentní vazby.



Působí-li na krystal stejnosměrné elektrické pole, pohybují se tyto elektrony ke kladnému pólu a takto získaný polovodič se nazývá nevlastní polovodič typu N.

Atom pětímocného prvku (v našem případě P) tu plní funkci dodavatele elektronů, proto se tato příměs nazývá donor (z latinského dono = darovat).

Jestliže ke křemíku přidáme příměs trojmocného prvku, např. bóru (B) nebo india (In), nahradí atomy bóru některé atomy křemíku v krystalové mřížce a ve vazbě bude chybět jeden elektron. Toto místo má charakter kladného náboje (je tu nedostatek elektronů) a takové místo se nazývá díra. Po vložení krystalu do stejnosměrného elektrického pole přeskočí vazebný elektron nejbližšího atomu na místo díry, tím vznikne další díra na místě, kde se původně nacházel tento elektron, tento děj se stále opakuje, takže v celkovém pohledu se jeví jako pohyb díry směrem k zápornému pólu. Díry tedy způsobují tzv. děrovou vodivost a takový polovodič se nazývá nevlastní polovodič typu P.

Atom trojmocného prvku (v našem případě B) přijímá do své chybějící vazby elektron z vlastního polovodiče a tato příměs dostala název akceptor (z latinského accepto = přijímat). Je třeba si uvědomit, že díra jako částice vlastně neexistuje, pouze byla zavedena ve fyzice polovodičů jako fiktivní částice, neboť elektrický proud v pevné látce mohou způsobovat pouze elektrony. Přesto ale hovoříme o proudu děr, o injekci děr, o rekombinaci děr apod. Náboje v polovodičích se tedy přenášejí nosiči náboje tedy elektrony a dírami. Nevlastní polovodič však vždy obsahuje oba typy nosičů náboje (vlivem nečistot). Ty nosiče, jejichž koncentrace v polovodiči převažuje, se nazývají většinové neboli majoritní (z latinského major = větší). Ty, které jsou v polovodiči v menšině, se označují názvem menšinové neboli minoritní (z latinského minor = menší). Výslednou vodivost polovodiče a její typ určují vždy nosiče majoritní. V polovodiči typu N jsou tedy majoritní nosiče elektrony a minoritní díry, v polovodiči typu P pak je tomu naopak (díry jsou majoritní, elektrony minoritní).

4.3. Polovodičové materiály

Jako základní polovodiče se používají prvky ze IV. skupiny periodické tabulky prvků.

Křemík(Si) - jeho nevýhodou je, že se nevyskytuje čistý, ale chemicky vázaný v různých sloučeninách a proto je výroba křemíku s polovodičovou čistotou velice složitá. Jeho bod tání je $1\,415\,^{\circ}\text{C}$, je značně chemicky reaktivní (zpracovává se v ochranné atmosféře z vodíku, nebo argonu). Krystalizuje v krychlové soustavě a jeho krystalová mřížka je plošně středěná. Šířka zakázaného pásu je 1,12 eV. Křemíkové polovodičové součástky mohou pracovat při teplotách až do $200\,^{\circ}\text{C}$, proto se křemík stal nejpoužívanějším polovodičovým materiálem. Vyrábějí se z něj diody, tranzistory, tyristory, více přechodové spínací obvody, integrované obvody, fotovoltaické články, mikroprocesorové čipy a mnoho dalších polovodičových výrobků.

Germanium(Ge) - získává se z minerálů, v nichž se však nachází ve velice malé koncentraci (sirné zinkové rudy, sirné rudy olovnato-měďnato-zinečnaté a některé

druhy uhlí). Jeho bod tání je 958 °C. Germaniové polovodičové součástky mohou pracovat jen do teploty 75 °C. Krystalizuje v krychlové soustavě s plošně středěnou mřížkou. Šířka zakázaného pásu je 0,71 eV. Používá se k výrobě vf diod, detekčních diod, tunelových diod, tranzistorů, fotodiod detektorů jaderného záření apod.

Selen(Se) - je chemický prvek, u něhož se projevuje polovodivost jen tehdy, vykrytalizovali v šesterečné soustavě (tzv. šedý selen). Šířka zakázaného pásu je asi 1,8 eV. Dříve to byl nejdůležitější polovodič používaný na selenové usměrňovače (historicky nejstarší polovodič), dnes se používá jen v omezené míře na výrobu usměrňovačů, fotoelektrických článků, expozimetrů, nebo v xerografii,

Jako polovodiče se též používají sloučeniny dvou prvků z různých skupin periodické tabulky prvků.

Typ A^{III}B^V - vyrábějí se tedy ze dvou prvků, přičemž jeden je ze III. skupiny prvků (B, Al, Ga, In) a druhý je z V. skupiny prvků (N, P, As, Sb), jedná se nejčastěji o arsenidy, fosfidy, nebo antimonidy. Arsenid Galia (GaAs) součástky z GaAs mohou pracovat s frekvencemi až do 100 GHz a do teploty 450 °C, šířka zakázaného pásu je 1,43 eV. Používá se k výrobě tranzistorů, diod a polovodičových součástek pro velmi vysoké frekvence (např. Gunnova dioda). Arsenid india (InAs) má nízký bod tání (525 °C), šířka zakázaného pásu je jen 0,45 eV, používá se k výrobě laserů, magnetických Hallových sond, zdrojů a snímačů infračerveného záření. Další polovodivé sloučeniny jsou fosfidy: GaP, InP (lasery, světelné diody, luminiscenční součástky), antimonidy: InSb (Hallové sondy), AlSb (sluneční články)..

Typ A^{II}B^{VI} - z prvků II. (Zn, Cd, Hg) a VI. (S, Se, Te) skupiny, jejich použití je například pro konstrukce heterostrukturálních laserů a detektorů záření v daleké infračervené oblasti

Typ A^{IV}B^{VI} - PbS, PbSe, PbTe, použití v optoelektronice

Typ A^{IV}B^{IV} - SiC, použití na napěťově závislé odpory – tzv. varistory, světlo emitující diody v celém oboru viditelného světla

typ A₂^VB₃^{VI} - Bi₂Te₃, Bi₂Se₃, použití pro výrobu termoelektrických článků

Další skupinu polovodičů tvoří oxidy, karbidy a sulfidy některých kovů

CuO₂ (Oxid měďný) - dnes se používá v omezené míře k výrobě fotoelektrických článků a usměrňovačů, termistorů s negativním teplotním součinitelem

NiO, Fe₃O₄, Mn₂O₃, Co₂O₃ - se používají jako materiály pro termistory

BaTiO₃ (keramika baryum titanátová) - rezistory s pozitivním teplotním koeficientem, kondenzátorové keramiky

SiC (karbid křemičitý) se využívá v polykrystalickém stavu (lisovaný a vypalovaný) k výrobě varistorů (tj. rezistorů s napěťově závislým odporem).

PbS (sulfid olovnatý) vrstvy citlivé na světlo pro fotorezistory.

Chování polovodičů můžeme pozorovat také u některých organických látek a to jak u přírodních (hemoglobin, chlorofyl) tak u syntetických:

- lineární polymery obsahující dvojné konjugované vazby
- polymery s koordinačním typem vazby prostřednictvím kationtů kovů
- příčně vázané polymery,

kteřé se používají například na termistory, termoelektrické články, nebo fotorezistory.

Existují také amorfní polovodiče, které mají z větší části kovalentní vazby (podíl iontové vazby max. 9 %), jedná se sloučeniny více prvků ze III., IV., a V. skupiny As-Te-Si-Ge; As-Te-Ga-Ge; As-Te-Ge; As-Se-Te; As-Te-Tl. Používají se na přípravu skelných vláken, pro CO a CO₂ lasery, zpozdovací linky v ultrazvukové technice, paměťové a spínací součástky. Patří sem také amorfní vrstvy křemíku dotované vodíkem, používané pro výrobu solárních článků.

4.4. Zpracování polovodičů

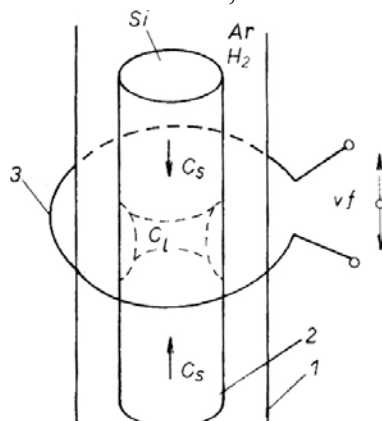
Materiály pro polovodičové součástky musejí mít extrémní čistotu tzv. polovodičovou čistotu. Znamená to, že v polovodiči může být podíl nečistot nanejvýš $1:10^{12}$ (v případě křemíku) nebo $1:10^9$ (v případě germania). Chemicky zpracované Ge a Si zdaleka nedosahují polovodičové čistoty, proto se musí vyčistit pásmovou (zonální) rafinací. Čistota polovodičů se pak kontroluje měřením jejich rezistivity.

4.4.1. Metoda pásmového tavení (pásmová rafinace)

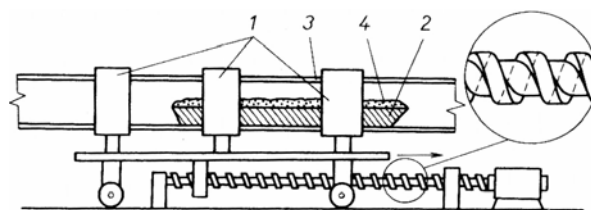
Princip této metody vychází z rozdílné rozpustnosti nečistot v pevném a v kapalném stavu základního materiálu. V kapalném stavu se udržuje jen úzké pásmo ingotu (tzv. zóna) a roztavené pásmo se pomalu posouvá podél celé délky ingotu. Nečistoty z pevné fáze se hromadí v roztaveném pásmu (zóně) a pohybují se spolu s ním. Když zóna projde celým ingotem, zůstane na jeho konci největší koncentrace nečistot. Tato část ingotu se po ztuhnutí odstraní. Průchod zóny se několikrát opakuje, aby se dosáhlo požadované čistoty polovodiče. Metoda pásmového tavení se využívá při čištění germania, křemíku i dalších prvků, přičemž k roztavení zóny se nejčastěji používá vysokofrekvenčního ohřevu.

Rafinace germania metodou pásmového tavení

Germanium určené k rafinaci je vloženo do lodičky z velmi čistého grafitu nebo z křemenného skla, umístěné v křemenné



Princip pásmového tavení křemíku
1 – trubka z křemenného skla,
2 – ingot křemíku (polykrystalický),
3 – závit (cívka) pro vf ohřev



Zařízení k rafinaci germania pásmovým tavením
1 – indukční cívky pro vf ohřev, 2 – lodička,
3 – trubka z křemenného skla, 4 – ingot germania

trubce s ochrannou atmosférou (vodík, argon nebo dusík). Podél trubky se posouvá soustava indukčních cívek, které vytvářejí v germaniu vysokofrekvenčním ohřevem roztavenou zónu (popř. několik zón za sebou). Pro dosažení polovodičové čistoty je třeba, aby germaniem prošlo deset až dvacet roztavených zón. *Rafinace křemíku metodou pásmového tavení*

Pásmové tavení křemíku je obtížnější. Křemík má vysoký bod tání a v roztaveném stavu je velmi reaktivní, takže ho nelze umístit do lodičky. Proto se křemík rafinuje

metodou visuté zóny (letmé zóny). Křemíkový ingot se za oba konce upevní ve svislé poloze do kovového zvonu se skleněným průzorem. Vysokofrekvenčním ohřevem indukční cívkou se v ingotu vytváří roztavená zóna, jejíž tvar je udržován jednak působením povrchového napětí kapaliny, jednak elektrodynamickými silami danými rozložením závitů cívky. Tyto síly zabrání skanutí taveniny z pohybující se zóny. Nečistoty se shromažďují v roztavené zóně, a tím se stahují k jednomu konci ingotu. Průchod zóny probíhá několikrát po sobě, až se dosáhne požadované čistoty. Křemík se rafinuje buď v ochranné atmosféře, nebo ve vakuu.

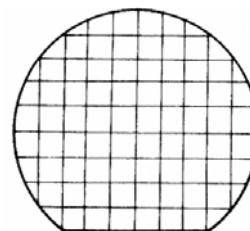
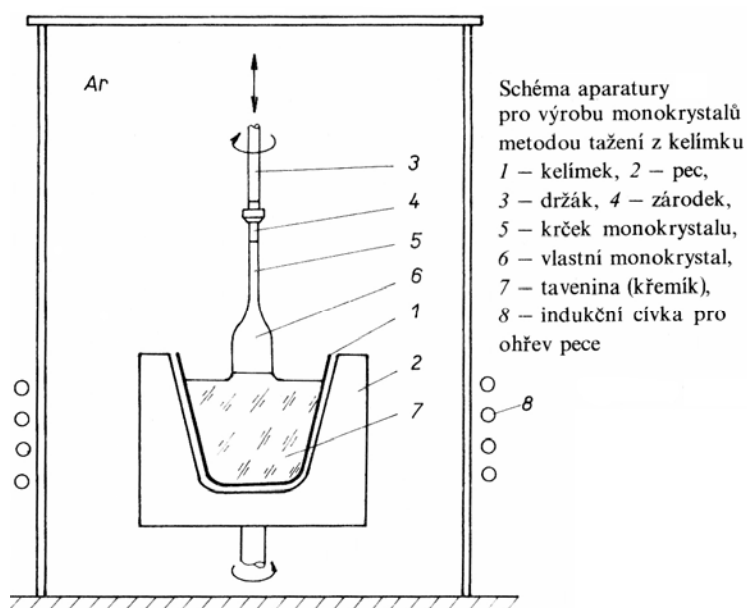
4.4.2. Výroba monokrystalů křemíku

Vyčištěné křemíkové tyče mají polykrystalickou strukturu. Polovodičová technika však vyžaduje monokrystalický křemík s určitou předem danou koncentrací příměsí a s příměsovou (nevlastní) vodivostí určitého typu. V současné době se monokrystaly vyrábějí převážně metodou tažení z kelímku (metodou Czochralského).

V kelímku 1 z velmi čistého křemenného skla, umístěném v elektrické vysokofrekvenční peci 2, je roztavený křemík. Na držáku 3 je upevněn monokrystalický zárodek 4, jehož dolní plocha má vhodnou krystalografickou orientaci. Tato plocha se smočí v tavenině 7 a pak se držák se zárodkem začne zvedat za současného otáčení kolem osy. Kelímek se rovněž otáčí (avšak opačným směrem) a jeho pohybem se promíchává tavenina. Při vysouvání držáku tavenina tuhne a přitom se v ní zachovává krystalografická orientace daná zárodkem. Tím na zárodku narůstá monokrystal křemíku 5, 6. Celé zařízení k tažení monokrystalů je umístěno v ochranné atmosféře argonu nebo ve vakuu.

Požadovaného typu vodivosti se dosahuje vnášením příměsí donorů nebo akceptorů, tzv. dotováním. Dotuje se buď z plynné fáze (přísadou plynů obsahujících potřebné prvky), nebo z kapalně fáze (přísadou potřebných prvků do taveniny).

Vyrobené monokrystaly křemíku mají válcový tvar o průměru 60 až 100 mm na koncích jsou zúžené, mohou dosahovat délky až 1 m. Konce se odříznou a válec se obrousí do kruhového průřezu. Optickými metodami se pak válec krystalograficky orientuje a rovnoběžně s osou válce se vybrousí orientační ploška. Dalším krystalografickým orientováním se zjistí roviny řezů a ingoty se rozřežou na desky (plátky) tloušťky 0,5 až 1 mm. Na nařezaných deskách se nejprve po obou stranách odstraní tzv. lapování povrchové vrstvy poškozené při řezání, pak se jedna strana leští jemnými leštícími prášky a omývá se speciálně vyčištěnou (deionizovanou) vodou a nakonec se desky čistí v organických rozpouštědlech.



Plátek z monokrystalu křemíku s vyznačenými rýhami pro dělení na jednotlivé čipy (dole je patrná orientační ploška)

Pomocí orientační plošky jsou na desce rýhováním odděleny jednotlivé čipy, na její vyleštěné straně se poté vytvářejí polovodičové struktury a nakonec se desky rozlámou na jednotlivé čipy.

4.5. Vytváření přechodů PN

Při vytváření přechodů PN na polovodičových deskách je třeba dosáhnout toho, aby vedle sebe vznikly dvě oblasti opačného typu vodivosti. Destička polovodiče má zpravidla vodivost určitého typu, protože již při tažení monokrystalu se do taveniny přidává příměsový prvek (akceptor nebo donor). Zbývá tedy vytvořit v desce oblast s jiným typem vodivosti, což v praxi znamená vnést do této oblasti v dostatečné koncentraci příměs opačného typu.

4.5.1. Slitinová technika

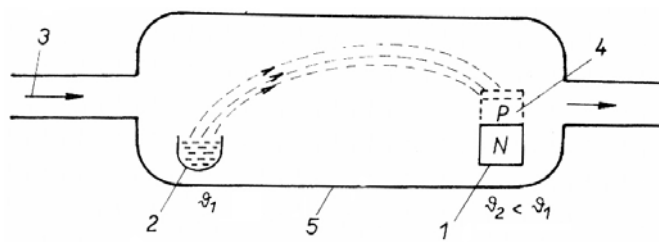
Na desku z monokrystalického polovodiče N se s pomocí masky umístí akceptor (In, As apod.), přičemž maska zajišťuje správnou polohu příměsového materiálu na základní polovodičové desce. Zahřátím v peci se pak příměs roztaví a vytvoří slitinu se základním polovodičem. Tento způsob je dnes již zastaralý a neproduktivní.

4.5.2. Difúzní technika

Difúze znamená samovolný pohyb částic z místa jejich větší koncentrace do místa jejich menší koncentrace působením tepelného pohybu a dalších vlivů. Podle skupenství difundující látky rozeznáváme difúzi z pevné fáze a difúzi z plynné fáze. Při difúzi z pevné fáze se na desku s vodivostí N napaří (přes masku) vrstvička kovu obsahujícího akceptorový prvek, destička se pak tepelně zpracuje při teplotě asi o 100 až 200 °C (menší než bod tání polovodiče) a atomy akceptoru difundují do základního materiálu, kde vytvoří oblast vodivosti P. Difúze z plynné fáze je založena na tom, že základní polovodič určité vodivosti je (přes masku) vystaven působení plynného prostředí, které obsahuje atomy příměsi opačného typu. Tyto atomy narážejí na povrch základního materiálu, difundují do něj, a tím v něm vytvářejí oblast opačné vodivosti, než jakou má základní materiál.

4.5.3. Epitaxe (epitaxní růst)

Využívá se reakce polovodiče (germania, křemíku) s halogeny (jodem nebo chlorem) a vzniklé halogenidy (jodidy GeI_2 , SiI_2 nebo chloridy GeCl_4 , SiCl_4) se při teplotě v_1 vypařují z nádoby 2 a v proudu nosného plynu 3 přecházejí na druhý konec pracovního prostoru, kde jsou umístěny destičky polovodiče s určitým typem vodivosti (N), udržované na teplotě $v_2 < v_1$. Nad povrchem zárodků se halogenidy rozkládají a uvolněné atomy polovodiče (Ge nebo Si) se usazují. Plyny (páry) mohou obsahovat příměsi donorů nebo akceptorů, aby usazená vrstva získala vodivost opačného typu (P), než má zárodek.



Princip epitaxního vytváření přechodu PN z plynné fáze

1 – destička polovodiče, 2 – nádoba s halogenidy,
3 – nosný plyn, 4 – vrstva polovodiče vytvořená na destičce,
5 – trubka z křemenného skla

Výhodou epitaxního růstu je především to, že v polovodiči lze vytvářet přechody s libovolným průběhem koncentrace příměsí, přičemž lze dodržet stejnou krystalografickou orientaci narostlých vrstev jako zárodku. Kombinací s jinými technikami (difúzí, sléváním, iontovou implantací) lze vytvářet i velmi složité struktury - integrované obvody.

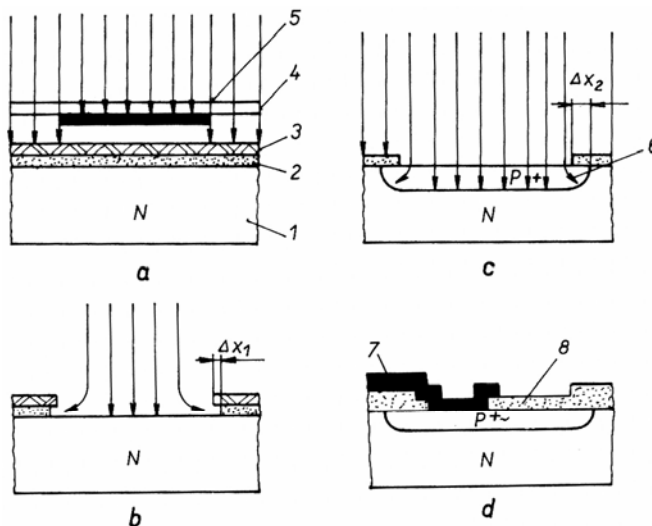
4.5.4. Planární technika

Název je odvozen od skutečnosti, že povrch destičky s vytvořenou polovodičovou strukturou zůstává přibližně rovinný (planární). Na destičce z monokrystalického křemíku s vodivostí N se oxidací vytvoří vrstva SiO_2 , která chrání křemík před působením vnějších vlivů. Před vytvářením polovodičových přechodů je třeba nejprve odstranit vrstvu SiO_2 v těch místech,

která mají být podrobena difúzi příměsí a k tomu slouží tzv. fotolitografický postup. Na povrch oxidu se nanese vrstva světlo citlivého laku (fotorezistu), který se ozáří ultrafialovým zářením přes vhodnou masku, ozářené části fotorezistu zpolymerují čímž se stanou odolnými proti rozpuštění ve vývojce a v leptadlech a neozářené části fotorezistu se vymyjí, a tak se odhalí povrch oxidu. Potom následuje vyleptání oxidu v kyselině fluorovodíkové a vzniklým otvorem mohou difundovat příměsí (akceptory) do základního

monokrystalického materiálu, kde vytvoří oblast s vodivostí P. Potom, se zhotoví ohmický kontakt (např. napařením hliníku) a obnažená plocha destičky, nyní s vodivostí P, se znovu pokryje vrstvou SiO_2 .

Planární technika je vhodná zejména pro křemíkové polovodičové součástky - bipolární i unipolární tranzistory, monolitické integrované obvody atd.



Vytváření přechodu PN planární technikou

- a) osvit ultrafialovým zářením přes masku: 1 – křemíková destička s vodivostí N, 2 – vrstva SiO_2 , 3 – vrstva fotorezistu, 4 – maska, 5 – část masky nepropouštějící ultrafialové záření;
b) působení leptadla (HF): Δx_1 – šířka podleptaného okraje fotorezistu;
c) difúze boru: 6 – vytvořená oblast P, Δx_2 – šířka oblasti P zasahující pod fotorezist;
d) zhotovení hliníkového kontaktu: 7 – hliníkový kontakt, 8 – znovu vytvořená vrstva SiO_2

4.5.5. Iontová implantace

Podstatou iontové implantace je vstřelování iontů příměsí do polovodiče, přičemž ionty jsou urychleny působením vysokonapětového elektrického pole a maskou se implantují do přesně ohraničené části krystalu. Implantace probíhá při pokojové teplotě ve vakuu a trvá několik sekund až několik minut. Tato technika se využívá pro speciální diody, vysokofrekvenční tranzistory, sluneční články apod. Lze jí vytvářet i velmi strmé přechody (např. varikapy) a pasivační vrstvy.

5. KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY

Nejpoužívanější konstrukční materiály v průmyslu jsou oceli a litiny, které se vyrábějí ze surového železa.

5.1. Surové železo

Surové železo se vyrábí ve vysokých pecích redukcí kyslíku pomocí koksu ze železných rud. Mezi nejdůležitější železné rudy patří hematit neboli krevet (Chemický oxid železitý Fe_2O_3), magnetit neboli magnetovec (Fe_3O_4), limonit neboli hnědel (přibližně $2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2\text{O}$) a siderit neboli ocelek (FeCO_3).

Surové železo není pro svou malou pevnost v tahu a křehkost použitelné jako konstrukční materiál. Nepříznivé mechanické vlastnosti jsou způsobeny dalšími prvky obsaženými v surovém železe (C, S, P, Si), především uhlík má velký vliv na mechanické vlastnosti a proto se jeho obsah musí v železe snižovat, čímž se vyrábějí litiny a oceli.

5.2. Oceli

Výrobu oceli ze surového železa nazýváme zkujňování, které spočívá ve spálení přebytečného uhlíku (na obsah pod 1,7%), síry, fosforu a křemíku.

Zkujňování se provádí profukováním roztaveného surového železa kyslíkem v konvertorech nebo v elektrických pecích. Účinkem kyslíku dojde k intenzivnímu hoření, přičemž nejdříve dojde ke spálení oxidu uhelnatého a poté i ke spálení dalších příměsí, které se odplaví ve formě strusky.

Mechanické vlastnosti ocelí se navíc v elektrických pecích zušlechťují příměsemi, jako jsou chrom, nikl, molybden, vanad apod. Různé příměsi dávají oceli požadované vlastnosti, jako jsou tvrdost, pružnost, pevnost, odolnost proti vodě nebo kyselinám...

5.2.1. Rozdělení ocelí

Oceli rozdělujeme podle složení na uhlíkové a slitinové, podle způsobu zpracování na oceli k tváření a oceli na odlitky a podle použití na oceli konstrukční a oceli nástrojové.

Uhlíkové oceli mají své vlastnosti (pevnost, houževnatost, opracovatelnost, tvárnost) ovlivněny pouze množstvím uhlíku (ostatní příměsi jsou v obvyklých množstvích – cca desetiny procent Mn, P, S, Si).

Vlastnosti **slitinových ocelí** jsou ovlivněny nejen množstvím uhlíku, ale především tzv. legurami, tedy příměsemi. Podle převládající přidané příměsi pak i ocel nazýváme – máme oceli chromové, manganové, křemíkové, vanadové, chromvanadové, ...

Oceli se také rozdělují do tříd, které se dle norem označují pěti čísly (XX XXX) přičemž první dvě čísla jsou odděleny a označují konkrétní třídu (viz tabulka):

Třída oceli	Charakteristika ocelí ve třídě
10	oceli konstrukční nelegované s předepsanými mechanickými vlastnostmi, zpravidla nezaručené chemické složení
11	oceli konstrukční nelegované s předepsanými mechanickými vlastnostmi a obsahem C, P, S
12	oceli ušlechtilé uhlíkové s předepsaným obsahem C, Mn, Si, P, S, aj.
13	oceli ušlechtilé slitinové, nízkolegované prvky: Mn, Si, Mn + Si, Mn + V
14	oceli ušlechtilé slitinové, nízkolegované prvky: Cr, Cr + Al, Cr + Mn, Cr + Si, Cr + Mn + Si

15	oceli ušlechtilé slitinové, nízkolegované prvky: Mo, Cr + Mo, Cr + V, Cr + W, Mn + Mo, Cr + V + W, Cr + Si + Mo + V a další kombinace těchto prvků
16	oceli ušlechtilé slitinové, nízko a středně legované prvky: Ni, Cr + Ni, Ni + V, Cr + Ni + V, Cr + Ni + W, Cr + Ni + Mn, Ni + V + W, Cr + Ni + V + W
17	oceli ušlechtilé slitinové, středně a vysoce legované prvky: Cr, Ni, Cr + Mn, Cr + Si, Cr + Ni + Ti + Al, Cr + Ni + V + W + Mn a další kombinace uvedených prvků (jsou to oceli korozivzdorné, žáruvzdorné, žárupevné, speciální)
19	oceli nástrojové uhlíkové a slitinové - uhlíkové – nelegované s předepsaným obsahem C, Mn, Si, P, S - slitinové – nízko, středně a vysoce legované prvky Cr, V, W, Mo, Ni, Co, Si, v různých kombinacích těchto prvků - rychlořezné – přelegované W

Několik příkladů označení ocelí:

- 10 423 – ocel do betonových konstrukcí, zaručeně svařitelná,
- 11 300 – ocel vhodná k tažení (výlisky, hřebíky),
- 17 040 – chromová ocel na kuchyňská zařízení a pro zdravotnictví,
- 19 132 – pro výrobu zámečnického nářadí,
- 19 421 – na vrtáky, závitníky,
- 19 810 – na soustružnické nože, frézy, výstružníky aj.

5.2.2. Tepelné zpracování ocelí

Jedná se o záměrné ohřívání a ochlazování ocelových výrobků za účelem získání požadovaných vlastností mechanických (pevnost, pružnost, tažnost, ...), technologických (tvárnost, opracovatelnost, ...) a dalších fyzikálních vlastností. Tepelné zpracování ocelí se skládá z ohřevu na určenou teplotu danou rychlostí, setrváním na této teplotě určitou dobu a následné ochlazení na původní teplotu probíhající stanovenou rychlostí. Velikost teploty a doba jejího působení určuje zda dojde či nedojde ke změně struktury, tzv. překrystalizaci. Na výsledné vlastnosti má vliv i prostředí ve kterém tepelné zpracování probíhá (kyslík, vakuum, vodík, dusík, soli, oleje, ...).

Mezi nejpoužívanější tepelné zpracování patří žíhání, kalení, popouštění, cementování a nitridování.

Žíhání

Jedná se o pozvolný ohřev na určitou teplotu a po dokonalém prohřátí se výrobek pomalu ochlazuje (ohřevem nad 750 °C dochází k překrystalizaci). Žíhání pomáhá zmenšit vnitřní pnutí vznikající ve výrobcích například po svařování, tváření, obrábění nebo rychlém ochlazení.

Kalení

Jedná se o zahřátí výrobku na tzv. předkrystalizační teplotu, a po prohřátí výrobku následuje rychlé ochlazení ve vhodném kalícím prostředí (voda, oleje, vzduch, solné lázně, olovo, ...). Kalením se vytvoří vnitřní pnutí oceli, což se projeví její větší tvrdostí.

Některé výrobky vyžadují tvrdost jen na povrchu a uvnitř musí zůstat houževnaté (kola trakčních vozidel), k tomu slouží tzv. povrchové kalení. Nahřeje se tedy jen malá vrstva (nejčastěji vysokofrekvenčním indukčním ohřevem) a ta se pak ochladí.

Popouštění

Jedná se o pozvolné ochlazování výrobku po jeho zakalení, aby se zmenšila jeho křehkost a zvětšila jeho houževnatost. Pokud byl výrobek při kalení úplně ochlazen musí se nejdříve

velice pomalu ohřívat teplem přiváděným zvnějšku, pak má výrobek tvrdost v celém povrchu stejnou. Pokud výrobek po kalení zůstal uvnitř ještě ohřátý může se pozvolna ochladit (popustit), ale tvrdost bude zachována jen na části výrobku, to se používá například při výrobě sekýrek, nožů, dlát, ...)

Cementování

Jedná se o sycení povrchu ocelového výrobku (nejčastěji se používá ocel s nízkým obsahem uhlíku – do 0,3 %) uhlíkem. V podstatě se jedná o difuzi uhlíku do krystalové mřížky železa. Následným zakalením a popuštěním vznikne velice tvrdá povrchová vrstva, přičemž uvnitř zůstává výrobek houževnatý (díky malému obsahu C).

Cementování se provádí zahřátím výrobků (na tzv. cementační teplotu) buď uložených v prášku složeného z dřevěného uhlí a uhlíčitanu barnatého, nebo ponořených v cementačních lázních obsahujících kyanidy (KCN, NACN) a chloridy, nebo dnes nejčastěji se do zahřívací pece přivede směs plynů s obsahem oxidu uhelnatého (CO) a uhlovodíků (metan CH₄).

Nitridování

Jedná se o sycení povrchu ocelového výrobku dusíkem, čímž dochází k vytvoření tvrdé povrchové vrstvy (cca 30 μm) odolné proti opotřebení otěrem a korozi. Nitriduje se při teplotách okolo 500 °C, buď v plynném prostředí jehož základem je amoniak (NH₃), který se při styku s povrchem výrobku rozloží na dusík a vodík, nebo v solné lázni jejímž základem jsou kyanidy a kyanáty.

Nitridování se používá například k prodloužení ostroty obráběcích nástrojů.

5.3. Litiny

Litina je dobře slévateľný železný materiál, jehož obsah uhlíku leží nad hranicí 2,14 %.

Litiny se rozdělují na šedou, bílou, temperovanou a speciální.

Šedá litina (šedé zbarvení lomu je způsobeno obsaženými lupínky grafitu)

Obsahuje 2,8 až 3,5 % uhlíku, 2 až 2,5 % křemíku a 0,5 až 0,8 % manganu. Její pevnost v tahu je 120 až 300 MPa a v tlaku 400 až 1200 MPa. Používá se k výrobě rámů a koster elektrických strojů, protože dobře tlumí chvění, je feromagnetická, má velkou rezistivitu, dá se dobře obrábět (soustružit, frézovat, brousit) a je odolnější proti korozi než ocel. Nejčastěji se odléhá do pískových nebo keramických forem, chladnutím se roztahuje, čímž vyplní i nejjemnější tvary, nakonec se odlitek očistí a obrábí.

Šedá litina se dá žíhat, kalit i nitridovat.

Bílá litina

Obsahuje 2,7 až 3,4 % uhlíku, 0,5 až 1 % křemíku. Je velmi tvrdá a křehká, opracovatelná je pouze broušením. Používá se například na výrobu mlecích těles.

Temperovaná litina

Vyrábí se tepelným zpracováním (temperováním) z bílé litiny, čímž získáme houževnatou dobře opracovatelnou litinu s lomem černým nebo bílým (podle postupu tepelného zpracování).

Speciální litiny

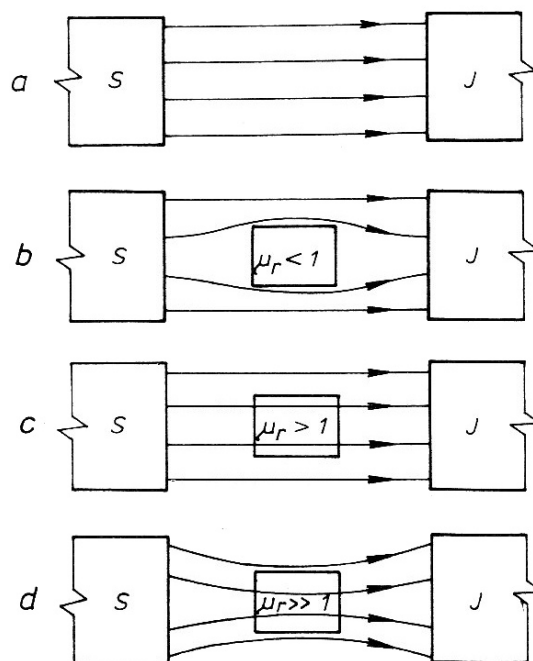
Řadíme sem tzv. tvárnou a tvrzenou litinu. *Tvárná litina* se vyrábí z šedé litiny legováním příměsí (Mg). Tvárná litina má vlastnosti podobné oceli a používá se k výrobě čerpadel, klikových hřídelí a ozubených kol. *Tvrzená litina* má na povrchu vlastnosti bílé litiny a uvnitř vlastnosti litiny šedé.

6. MATERIÁLY NA MAGNETICKÉ OBVODY

6.1. Rozdělení materiálů podle magnetických vlastností

Všechny látky se podle chování v magnetickém poli dělí na diamagnetické, paramagnetické, feromagnetické, antiferomagnetické a ferimagnetické

- diamagnetické - jsou z magnetického pole slabě vypuzovány, neboť jejich relativní permeabilita je mírně menší než 1 ($\mu_r < 1$). Po vložení diamagnetického materiálu do magnetického pole dochází k zeslabení tohoto pole, což se dá schematicky znázornit magnetickými indukčními čarami obcházejícími diamagnetickou látku. Patří sem kovy zlato, stříbro, měď, olovo, rtuť zinek, polovodiče křemík, germanium, selen, plyny vodík, helium, neon argon xenon, většina organických látek a voda.
- paramagnetické - jsou slabě vtahovány do magnetického pole, neboť jejich relativní permeabilita je mírně větší než 1 ($\mu_r > 1$). Po vložení paramagnetického materiálu do magnetického pole dochází k velice mírnému zesilování tohoto pole, což se dá schematicky znázornit magnetickými indukčními čarami procházejícími paramagnetickou látkou téměř bez deformace. Patří sem kovy hliník, platina, chrom, wolfram, sodík, hořčík, plyn kyslík nebo oxidy CuO, Cr₂O₃
- feromagnetické - jsou do magnetického pole silně vtahovány, neboť jejich relativní permeabilita je výrazně větší než 1 ($\mu_r \gg 1$). Po vložení feromagnetického materiálu do magnetického pole dochází k velmi značnému zesílení tohoto pole, což se dá schematicky znázornit zhuštěnými magnetickými indukčními čarami procházejícími feromagnetickou látkou. Patří sem kovy železo, nikl, kobalt, gadolinium a jejich slitiny s přísadami křemíku, molybdenu, mědi, hliníku (Al-Ni-Co), patří sem i slitiny vytvořené určitým poměrem neferomagnetických látek např. Mn(26%)+Al(13%)+Cu(61%).
- antiferomagnetické - navenek se chovají jako látky paramagnetické (jejich relativní permeabilita je větší než 1, ale vnitřním uspořádáním připomínají látku feromagnetickou. Patří sem oxidy sulfidy a chloridy manganu, chromu, železa, kobaltu nebo niklu.
- ferimagnetické - navenek se v magnetickém poli chovají jako látky feromagnetické ($\mu_r \gg 1$), ale jsou vnitřně určitým druhem antiferomagnetik. Mají velkou rezistivitu a proto v nich vznikají malé ztráty vířivými proudy. Vyrábějí se sloučením



Vliv různých látek na magnetické pole

- a) magnetické pole ve vakuu,
- b) s diamagnetickou látkou,
- c) s paramagnetickou látkou,
- d) s feromagnetickou látkou

oxidu železitého (Fe_2O_3)s oxidy dvojmocných kovů BaO, SrO, PbO. Tyto látky pak nazýváme ferity.

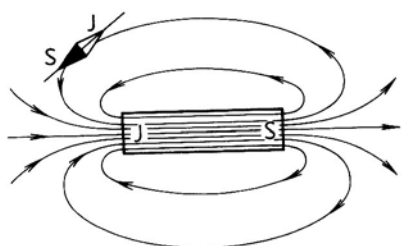
Vakuum a vzduch leží svými magnetickými vlastnostmi mezi látkami diamagnetickými a paramagnetickými neboť jejich relativní permeabilita je rovna 1 (někdy se přiřazují k paramagnetickým, neboť nedeformují tvar magnetických indukčních čar magnetického pole).

Na magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů se používají látky feromagnetické, které se dále dělí podle velikosti remanentní indukce na magneticky tvrdé a měkké:

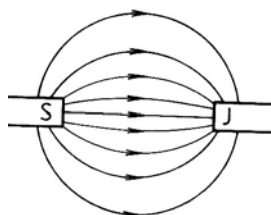
- magneticky tvrdé - mají velkou remanentní indukci. Po vložení do magnetického pole (po tzv. zmagnetování) si ponechávají své magnetické vlastnosti a vyrábí se z nich tzv. permanentní magnety
- magneticky měkké - jejich remanentní magnetická indukce je malá. Po vložení do magnetického pole se chovají jako magnety a po vyjmutí z magnetického pole své magnetické vlastnosti téměř ztrácejí (tzv. dočasné magnety).

6.2. Zobrazování magnetických polí

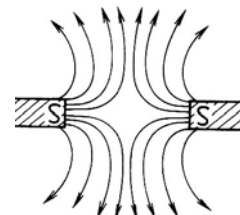
Magnetická pole zobrazujeme magnetickými indukčními čarami, které probíhají mimo magnet od severního pólu k pólu jižnímu a uvnitř magnetu od pólu jižního k pólu severnímu. Směr magnetických indukčních čar se vyznačuje šipkami.



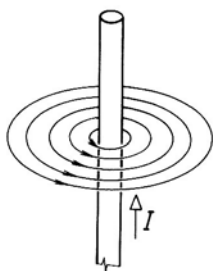
Magnetické pole
permanentního magnetu



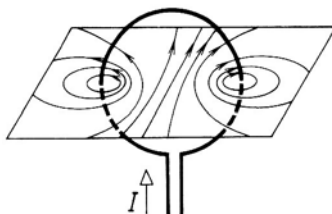
Magnetické pole
mezi nesouhlasnými póly



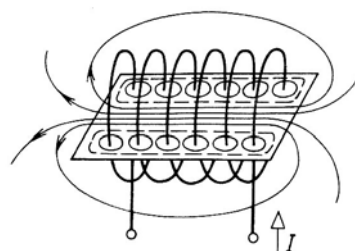
Magnetické pole
mezi souhlasnými póly



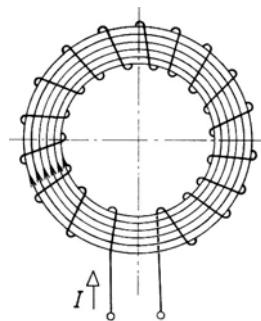
Magnetické pole
přímého vodiče



Magnetické pole
kruhového závitu



Magnetické pole
solenoidu (jednovrstvé válcové cívky)



Magnetické pole toroidu
(cívky navinuté na
prstencové jádro)

Směr magnetických indukčních čar okolo přímého vodiče se určuje Ampérovým pravidlem pravé ruky - uchopíme-li vodič do pravé ruky tak, že palec ukazuje směr proudu, pak prsty ukazují směr siločar.

Směr siločar magnetického pole solenoidu určujeme taky pravou rukou - uchopíme-li solenoid do pravé ruky tak, že prsty ukazují směr proudu, pak palec ukazuje severní pól magnetického pole tohoto solenoidu (toto pravidlo platí i pro vícevrstvé cívky).

6.3. Veličiny magnetického pole

6.3.1. Magnetomotorické napětí

Značí se F_m , jednotkou je Ampér (A). Je příčinou magnetického pole a je rovno proudu, který toto pole vybudil ($F_m = I$). Je-li magnetické pole buzeno více proudy je magnetomotorické

napětí dáno součtem všech těchto proudů ($F_m = \sum_{k=1}^n I_k$). Je-li magnetické pole buzeno

proudem procházejícím cívku pak je magnetomotorické napětí dáno součinem proudu a počtu závitů této cívky $F_m = N \cdot I$.

6.3.2. Magnetický indukční tok

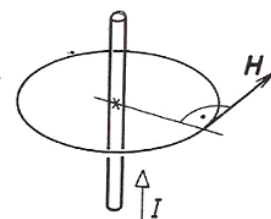
Značí se Φ , jednotkou je Weber (Wb). Je to počet magnetických indukčních čar magnetického pole o indukci B procházejících plochou S

$$\Phi = B \cdot S$$

6.3.3. Intenzita magnetického pole

Značí se H , jednotkou je Ampér na metr ($A \cdot m^{-1}$). Jedná se o vektorovou veličinu, která je dána magnetomotorickým napětím F_m na jednotku délky magnetické indukční čáry l .

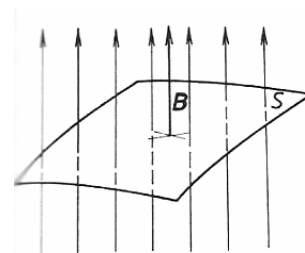
$$H = \frac{F_m}{l} = \frac{N \cdot I}{l}$$



6.3.4. Indukce magnetického pole

Značí se B a jednotkou je Tesla (T). Jedná se o vektorovou veličinu, která udává plošnou hustotu magnetických indukčních čar, tedy magnetickým tokem Φ procházejícím plochou S

$$B = \frac{\Phi}{S}$$



6.3.5. Permeabilita

Značí se μ , jednotkou je Henry na metr ($H \cdot m^{-1}$). Představuje v podstatě měrnou magnetickou vodivost materiálu. U feromagnetických látek není konstantní, ale je závislá na velikosti indukce magnetického pole. Permeabilita je dána součinem permeability vakua

($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1} \doteq 1,256637 \cdot 10^{-6} H \cdot m^{-1}$) a permeability relativní μ_r

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

6.3.6. Magnetický odpor (reluktance)

Značí se R_m , jednotkou je Henry na mínus první (H^{-1}), vyjadřuje vlastnost magnetického materiálu klást magnetickému toku magnetický odpor.

$$R_m = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{l}{S}$$

6.3.7. Magnetická vodivost (permeance)

Značí se G_m , jednotkou je henry (H). Je převrácená hodnota magnetického odporu.

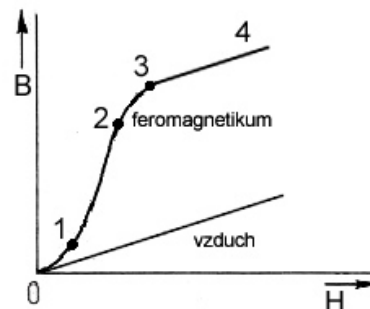
$$G_m = \frac{1}{R_m}$$

6.4. Magnetování feromagnetik

Zmagnetovávání feromagnetických materiálů se popisuje magnetizační charakteristikou, což je závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole $B = f(H)$

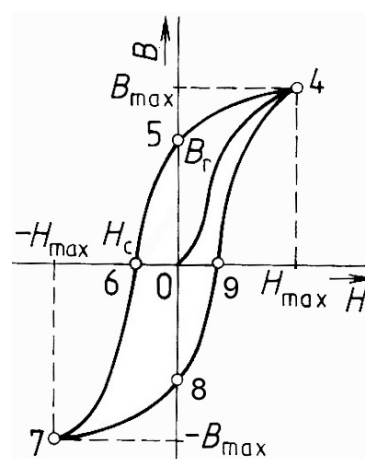
Vyjdeme z předpokladu, že feromagnetický materiál nebyl před příslušným měřením pro získání magnetizační charakteristiky magnetován. Magnetizační křivka vycházející z počátku se pak nazývá **křivkou prvotní magnetizace**.

- oblast 0-1 - při malých hodnotách intenzity magnetického pole H se magnetická indukce B zvětšuje pomalu, dochází ke změně objemu jednotlivých domén (ještě vratný proces). Tato oblast nemá pro praktické využití význam.
- oblast 1-2 - dochází k postupnému natačení magnetických domén materiálu do směru pole. Tato část charakteristiky je téměř lineární, přičemž magnetická indukce B i poměrná permeabilita μ_r se zvětšují rychleji než indukce H . V bodě 2 dosahuje poměrná permeabilita své maximální hodnoty.
- oblast 2-3 - je to oblast nasycení - došlo k natočení všech magnetických domén do směru pole. Poměrná permeabilita se zmenšuje.
- oblast 3-4 - mluvíme o tzv. paraprocessu, tedy o zmagnetovávání dle přímkové charakteristiky vzduchu



Budeme-li po zmagnetování feromagnetického materiálu (bod 4) snižovat intenzitu magnetického pole nebude se křivka vracet po původní čáře, ale ponechá si část své magnetické indukce a při nulové intenzitě protne křivka osu indukce v hodnotě tzv. indukce remanentní B_r (bod 5). Abychom materiál zbavili i této indukce musíme zvětšovat intenzitu magnetického pole opačným směrem a křivka protne osu intenzity na hodnotě tzv. koercitivní síly H_c (bod 6).

Kdybychom nadále zvětšovali intenzitu (tímto opačným směrem) materiál by se zmagnetoval opačně (dosáhl by bodu nasycení - bod 7). Při následném snižování intenzity by se proces opakoval (přes body 8 a 9) až bychom dosáhli opět nasyceného stavu původního (bod 4). Křivka, kterou jsme takto vykreslili se nazývá **hysterezní křivka (smyčka)**. Tato křivka je souměrná, tedy body 7, 8 a 9 odpovídají bodům 4, 5 a 6, ale smysl magnetování je opačný



Plocha hysterezní smyčky je úměrná energii potřebné pro jeden přemagnetovací cyklus. Tato energie se mění v teplo a ztráty tím vzniklé nazýváme ztráty hysterezní.

6.5. Magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů

Pro magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů se nejčastěji používají materiály magneticky měkké (materiály magneticky tvrdé se používají na výrobu permanentních magnetů a v elektrotechnice se používají jen málo - statory malých ss motorků, rotory malých synchronních motorků - nebudeme se jimi zde zabývat). Mezi obecné vlastnosti magneticky měkkých materiálů používaných v elektrotechnice patří:

- strmá křivka prvotní magnetizace
- vysoké hodnoty počáteční a maximální permeability
- co největší indukce nasycení
- malá koercitivita (pod $1000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ – snadno se odmagnetují)
- úzká hysterezní smyčka
- co nejmenší magnetické ztráty

- malý koeficient tvarové magnetostrickce
- co nejdokonalejší struktura s velkými krystalovými zrnny
- snadné zmagnetování a odmagnetování

Mezi nejpoužívanější materiály patří železo a jeho slitiny

Železo

- nízká rezistivita,
- velké ztráty
- části magnetických obvodů stejnosměrných strojů a přístrojů

Elektrotechnické (dynamoplechy, trafoplechy) plechy (Fe+Si)

Křemík přidaný do železa má vliv na magnetické a mechanické vlastnosti, váže nečistoty, zlepšuje mikrostrukturu, zvyšuje rezistivitu (snižuje ztráty vířivými proudy), snižuje anizotropii a tím i koercitivitu, rostoucí obsah křemíku zvyšuje tvrdost a křehkost a tím zhoršuje i opracovatelnost.

Plechy pro točivé stroje stejnosměrné i střídavé musí mít kromě magnetických vlastností dobré mechanické vlastnosti, ale nesmí být moc křehké a musí vydržet i vibrace strojů – obsahují $0,3 \div 3,5$ % křemíku,

Plechy pro výkonové transformátory potřebují mít co nejvyšší magnetickou vodivost, proto jsou válcovány za studena orientovaně a obsahují $3,5 \div 4,5$ % křemíku

Sonaperm, ortoperm

Oceli válcované za studena, které mají vysokou permeabilitu a zaručené ztráty (např. 1,1 W/kg), používají se na magnetické obvody ve tvaru C a toroidů

Permalloy, supermalloy (Fe + Ni)

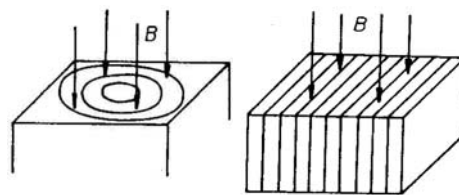
- magneticky nejměkčí materiály
- rozděluje se podle obsahu niklu:
 - 30 % Ni - permeabilita s rostoucí teplotou prudce klesá,
- použití: teplotní kompenzace magnetů
 - 35 ÷ 40 % Ni - permeabilita nezávisí na H až do velkých intenzit pole
- použití: pulzní transformátory a relé
 - 45 ÷ 50 % Ni - největší sytná indukce (1,6 T)
- pravoúhlá či úzká hysterezní smyčka
- největší tvarová magnetostrickce
- použití: magnetické zesilovače, generátory tvarových kmitů, stínící kryty
 - 50 ÷ 65 % Ni - pravoúhlá hysterezní smyčka, malá koercitivita, vysoká pulzní permeabilita
- použití: pulzní transformátory a relé
 - 70 ÷ 81 % Ni - legují se navíc dalším prvkem molybdenem, manganem, niobem, titanem aj.
- nulová anizotropie i tvarová magnetostrickce, malá koercitivita, velká permeabilita
- použití: přenos signálů pro sdělovací techniku, magnetofonové hlavy a magnetické systémy měřicích přístrojů

Permendur (49% Fe - 49% Co - 2% V)

- obtížně zpracovatelné
- použití: plechy, pásy tloušťky $0,1 \div 0,5$ mm, odlitky pro části magnetických obvodů s velkou indukcí, magnetické obvody pro speciální transformátory a elektromagnety

6.5.1. Ztráty v magnetických obvodech

Magnetické obvody elektrických strojů nebo přístrojů mají různé tvary podle druhu stroje nebo přístroje. Prochází-li magnetickým obvodem střídavý magnetický tok potom se v něm kolmo na směr magnetického toku indukují tzv. Foucaultovy vířivé proudy, které způsobují značné ztráty.



Aby se ztráty vířivými proudy podstatně zmenšily, sestavují se magnetické obvody z plechů vzájemně izolovaných. Plechy strojů se nejčastěji vyrábějí o tloušťce 0,35 nebo 0,5 mm. Plechy se izolují keramickými vrstvami tloušťky 0,003 mm popř. laky (levnější, ale tlustší). „čistý“ průřez aktivního železa magnetického obvodu sestaveného z izolovaných plechů pak dostaneme, když změřený průřez násobíme činitelem plnění železa $k_{Fe} = 0,85$ až $0,98$.

Ztráty vířivými proudy ve wattech lze vyjádřit vztahem: $\Delta P_F = C \frac{1}{\rho} (B_{max} f a)^2 m$, kde ρ je

rezistivita železa, B_{max} amplituda magnetické indukce, f frekvence, a tloušťka plechů, m hmotnost železa magnetického obvodu a C konstanta závisící na materiálu.

Kromě ztrát vířivými proudy se v železe projevují ztráty hysterezní (viz předchozí kapitola). Hysterezní ztráty vznikají přemagnetováváním železa a jsou úměrné ploše hysterezní smyčky.

Hysterezní ztráty pro $B_{max} < 1$ T jsou dány vzorcem $\Delta P_h = C B_{max}^{1,6} f m$; pro $B_{max} > 1$ T, pak

vzorcem $\Delta P_h = C B_{max}^2 f m$

Při frekvenci 50 Hz tvoří hysterezní ztráty ΔP_h asi 70 % celkových ztrát v železe ΔP_{Fe} , které lze přibližně ve wattech vyjádřit vztahem

$\Delta P_{Fe} = \Delta p_{1,0} B_{max} \frac{f}{50} k_p m$, kde $\Delta p_{1,0}$ jsou měrné ztráty [$W \cdot kg^{-1}$] a k_p je činitel opracování.

Měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ určují ztráty ve wattech v 1 kg železa při magnetické indukci 1 T a frekvenci 50 Hz (v praxi se uvádějí navíc i měrné ztráty $\Delta p_{1,5}$ při magnetické indukci 1,5 T). Činitel opracování k_p určuje zhoršení vlastností magnetických obvodů opracováním plechů (např. drážkováním u točivých strojů, kde se pohybuje v rozmezí 1,5 až 2. U transformátorů pak v rozmezí 1,02 až 1,2).

6.5.2. Způsoby válcování elektrotechnických plechů

Vlastnosti magnetických obvodů složených z plechů se dají též řídit způsobem válcování.

Rozeznáváme tři výrobní způsoby:

- *plechy válcované za tepla* - křemíková ocel pro plechy válcované za tepla se vyrábí z pokud možno nejčistších surovin v martinských nebo elektrických obloukových pecích, odlévá se do kokil a ingoty se pak postupně válcují s řadou meziohřevů na bramy, ploštiny a plechy konečné tloušťky většinou 0,35 nebo 0,5 mm, měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ se pohybují v mezích od $0,9 W \cdot kg^{-1}$ do $1,5 W \cdot kg^{-1}$. Používají se pro rozvodné a svářecí transformátory, pro střídavé stroje točivé velkých a středních výkonů, malé, trakční a jeřábové elektromotory.
- *plechy válcované za studena neorientované* - měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ se pohybují v mezích od $1,3 W \cdot kg^{-1}$ do $3,6 W \cdot kg^{-1}$. Používají se pro magnetické obvody stejnosměrných strojů, střídavých strojů a malých transformátorků
- *plechy válcované za studena orientované* - vyrábějí se v tloušťce 0,35 až 0,1 mm a používají se pro velké transformátory. Měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ se pohybují v mezích od $0,52 W \cdot kg^{-1}$ do $0,8 W \cdot kg^{-1}$ ve směru válcování.

6.6. Magneticky měkké ferity

Vznikají chemickým sloučením oxidu železitého Fe_2O_3 s oxidem vhodného dvojmocného kovu, obecný vzorec je $\text{MO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$, kde M označuje dvojmocný iont kovu (Mn, Ni, Zn, Mg, Co, Cd popř. Li). Tak vznikne např. ferit nikelnatý $\text{NiO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ atd.

Nejvíce se používají ferity směsné, v nichž oxid železitý je sloučen se dvěma oxidy dvojmocných kovů. Např. ferity manganato zinečnaté ($\text{MnO} + \text{NiO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$), hořečnato manganaté a nikelnatozinečnaté. Směsné ferity jsou tuhé roztoky dvou nebo více oxidů dvojmocných kovů s oxidem železitým. Ferity se vyrábějí keramickou technologií. Jsou to velice stabilní iontové sloučeniny s vysokou rezistivitou průměrně $10^5 \Omega\text{m}$. Ztráty vířivými proudy jsou proto nízké. Je možné vyrobit ferit s pravoúhlou hysterezní smyčkou. Výlisky se vypalují při 1100 až 1400 °C a přitom dochází k jejich smrštění někdy až o 25%. Výsledný magnetický moment sloučeniny a tím i velikost B_s závisí na velikosti magnetických momentů atomů v mřížce a antiparalelním uspořádání magnetických momentů některých atomů. Jsou tvrdé, křehké a porézní. Klasickými metodami jsou prakticky neopracovatelné. Opracovat je lze jen broušením, řezáním diamantovým kotoučem, nebo ultrazvukem či laserem.

Používají se k výrobě součástek VF techniky, jako jsou např. jádra cívek, anténní tyče, transformátory, tlumivky, nebo magnetofonové mazací hlavy.

Porovnání některých parametrů feritů a kovových magnetik je uvedeno v tabulce:

Materiál	Indukce nasycení B_s [T]	Permeabilita μ_r poč. [-]	Max. teplota [°C]	Konduktivita γ [S·m ⁻¹]
kovy	0,6 až 2,43	500 až $3 \cdot 10^5$	250 až 900	10^5 až 10^7
ferity	0,2 až 0,5	10 až 10^4	100 až 500	10^{-11} až 10^1

6.7. Řešení magnetických obvodů

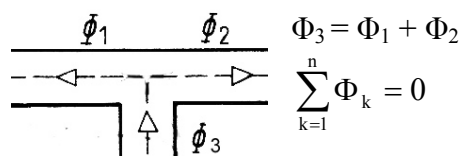
6.7.1. Hopkinsonův zákon

Je analogií zákona Ohmova pro magnetické obvody. Magnetický tok je úměrný magnetomotorickému napětí a tedy i proudu procházejícímu cívkou budící magnetomotorické napětí:

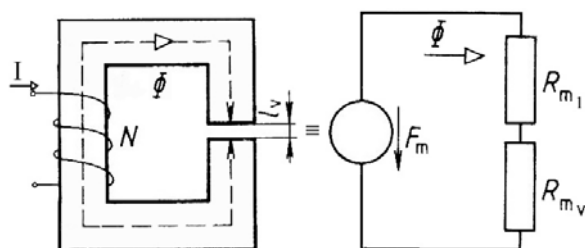
$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{N \cdot I}{R_m}$$

6.7.2. Analogie prvního Kirchhoffova zákona

Algebraický součet magnetických toků v libovolném místě magnetického obvodu je roven nule



6.7.3. Analogie druhého Kirchhoffova zákona



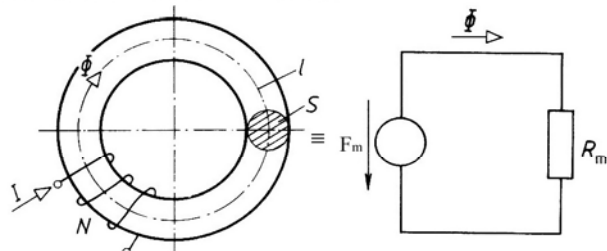
$$F_m = \Phi \cdot R_{m_1} + \Phi \cdot R_{m_v}$$

$$F_m = \sum_{k=1}^n U_{m_k}, \text{ kde } U_{m_k} \text{ je tzv. magnetické napětí}$$

6.7.4. Magnetické obvody řešené výpočtem

Příklad číslo 6.7.4.1

Stanovte velikost proudu k vybuzení magnetického toku $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$, poměrnou permeabilitu a magnetický odpor v toroidním kroužku z lité oceli. Průřez jádra je 4 cm^2 , délka střední indukční čáry je 25 cm . Budicí cívka má 150 závitů.



Magnetická indukce

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{5,6 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-4}} \text{ T} = 1,4 \text{ T}.$$

Z magnetizační křivky daného materiálu přečteme
pro $B = 1,4 \text{ T}$ intenzitu magnetického pole
 $H = 3 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

Magnetomotorické napětí

$$F_m = Hl = (3 \cdot 10^3 \cdot 0,25) \text{ A} = 750 \text{ A}.$$

Budicí proud

$$I = \frac{F_m}{N} = \frac{750}{150} \text{ A} = 5 \text{ A}.$$

Poměrná permeabilita

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1,4}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^3} = 371.$$

Magnetický odpor

$$R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S} = \frac{0,25}{371 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} \text{ H}^{-1} = 1,34 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}.$$

Příklad číslo 6.7.4.2

Stanovte podle zadání z předchozího příkladu poměrnou permeabilitu a magnetický odpor, bude-li budicí proud 10 A .

$$\text{Intenzita magnetického pole } H = \frac{NI}{l} = \frac{150 \cdot 10}{0,25} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} = 6 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}.$$

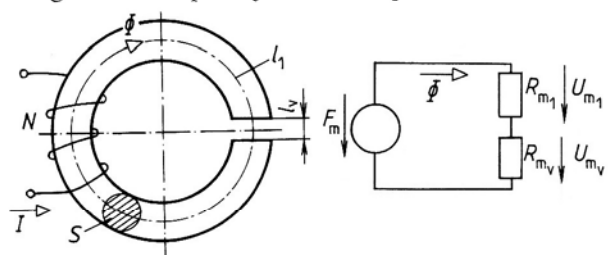
Z magnetizační křivky přečteme pro $H = 6\,000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
magnetickou indukci $B = 1,55 \text{ T}$.

$$\text{Poměrná permeabilita } \mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1,55}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^3} = 205.$$

$$\text{Magnetický odpor } R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S} = \frac{0,25}{205 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 2,42 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}.$$

Příklad číslo 6.7.4.3

Stanovte magnetomotorické napětí toroidu tak, aby ve vzduchové mezeře délky 2 mm byla magnetická indukce 1,2 T. Délka střední indukční čáry v materiálu z transformátorových plechů je 50 cm, průřez jádra je 8 cm². Magnetická indukce je v obou prostředích stejná. Intenzita magnetického pole je v obou prostředích různá.



Z magnetizační křivky stanovíme pro magnetickou indukci $B = 1,2$ T intenzitu magnetického pole $H = 600$ A·m⁻¹.

Poměrná permeabilita

$$\mu_{r1} = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1,2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 600} = 1\,592.$$

$$\text{Magnetický odpor } R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_{r1} \mu_0 S} = \frac{0,5}{1\,592 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^{-4}} \text{ H}^{-1} = 3,124 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}.$$

$$\text{Magnetický odpor vzduchové mezery } R_{mv} = \frac{l_v}{\mu_0 S} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^{-4}} \text{ H}^{-1} = 1,989 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}.$$

$$\text{Celkový magnetický odpor } R_m = R_{m1} + R_{mv} = (3,124 \cdot 10^5 + 1,989 \cdot 10^6) \text{ H}^{-1} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}.$$

$$\text{Magnetický tok } \Phi = BS = (1,2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}) \text{ Wb} = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}.$$

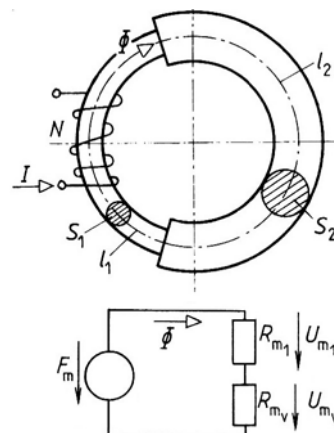
$$\text{Magnetomotorické napětí } F_m = \Phi R_m = (9,6 \cdot 10^{-4} \cdot 2,3 \cdot 10^6) \text{ A} = 2\,208 \text{ A}.$$

Příklad číslo 6.7.4.4

Stanovte proud potřebný k vybuzení magnetického toku $7,2 \cdot 10^{-4}$ Wb v obvodu sestaveném ze dvou feromagnetických materiálů.

Část obvodu z plechů pro elektrotechniku s měrnými ztrátami $2,2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ má průřez $S_1 = 6 \text{ cm}^2$ a délku střední indukční čáry $l_1 = 40 \text{ cm}$, část obvodu z plechů pro elektrotechniku s měrnými ztrátami $2,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ má průřez $S_2 = 8 \text{ cm}^2$ a délku střední indukční čáry $l_2 = 60 \text{ cm}$.

Budicí cívka má 275 závitů.



$$\text{Magnetomotorické napětí obvodu } F_m = U_{m1} + U_{m2} = H_1 l_1 + H_2 l_2.$$

Výpočet magnetických napětí U_{m1} a U_{m2} . V obou prostředích je různá magnetická indukce B_1 a B_2 .

$$\text{Magnetická indukce } B_1 \quad B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{7,2 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-4}} \text{ T} = 1,2 \text{ T}.$$

Intenzitu magnetického pole H_1 přečteme z příslušné magnetizační křivky pro $B_1 = 1,2$ T je to $H_1 = 6 \cdot 10^2 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

$$\text{Magnetické napětí } U_{m1} \quad U_{m1} = H_1 l_1 = (6 \cdot 10^2 \cdot 0,4) \text{ A} = 240 \text{ A}.$$

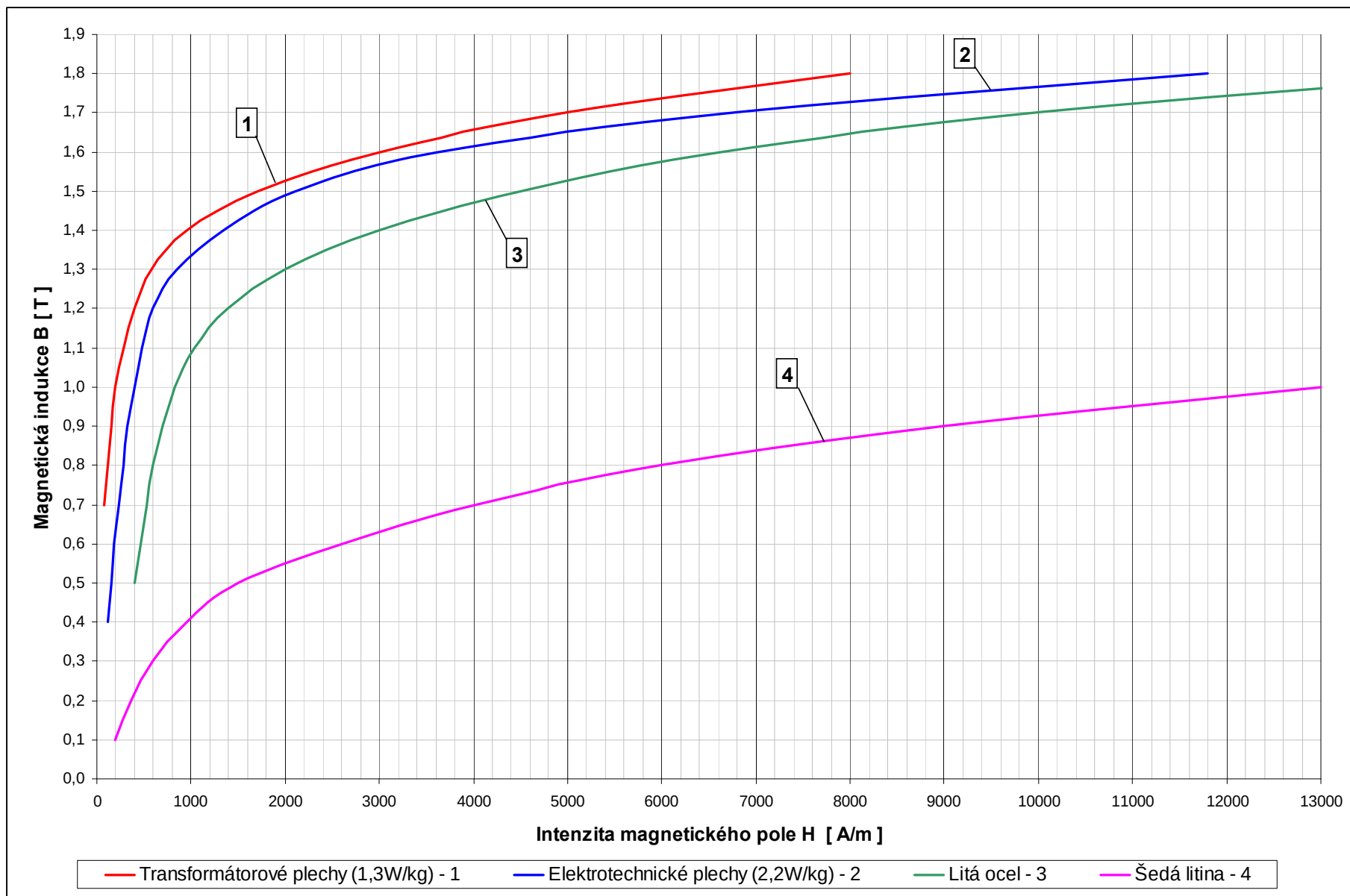
$$\text{Magnetická indukce } B_2 \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{7,2 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-4}} \text{ T} = 0,9 \text{ T}.$$

Intenzitu magnetického pole H_2 přečteme z příslušné magnetizační křivky pro $B_2 = 0,9$ T je to $H_2 = 150 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

$$\text{Magnetické napětí } U_{m2} \quad U_{m2} = H_2 l_2 = (150 \cdot 0,6) \text{ A} = 90 \text{ A}.$$

$$\text{Celkové magnetomotorické napětí } F_m = U_{m1} + U_{m2} = (240 + 90) \text{ A} = 330 \text{ A}.$$

$$\text{Budicí proud } I \quad I = \frac{F_m}{N} = \frac{330}{275} \text{ A} = 1,2 \text{ A}.$$



6.8. Energie magnetického pole

Pro vytvoření magnetického toku musí elektrický proud vykonat práci. V prostoru okolo vodiče i v samotném vodiči se nahromadí určitá energie potřebná k vytvoření magnetického pole a zůstává v něm nahromaděna. Udržování magnetického pole nevyžaduje žádnou energii (zanedbáme-li ztráty vzniklé Joulovým teplem). Energie magnetického pole v neferomagnetickém prostředí je dána vztahem

$$W = \frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot F_m$$

Z uvedeného vztahu lze stanovit hustotu energie, tj. množství energie nahromaděné v jednotce

objemu $w = \frac{W}{V} = \frac{\frac{1}{2} \Phi \cdot F_m}{S \cdot l} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi}{S} \cdot \frac{F_m}{l} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H$, kde $V = S \cdot l$ je objem magnetického obvodu.

6.9. Silové účinky magnetického pole

Je-li vodič v magnetickém poli, působí magnetické síly na elektrony pohybující se uvnitř vodiče a jelikož elektrony nemohou vodič opustit, přenášejí se tyto síly na látku vodiče. Na vodič tak působí síla. Velikost síly, kterou magnetické pole s indukcí B působí na vodič o délce l , jímž prochází proud I vypočteme ze vztahu $F = B \cdot l \cdot I$, tento vztah platí za předpokladu, že vektor magnetické indukce B je kolmý na vodič. V obecném případě, kdy vodič a směr vektoru magnetické indukce svírají libovolný úhel α , musíme dosadit do vztahu za B složku vektoru magnetické indukce kolmou ke směru vodiče $F = B \cdot l \cdot I \cdot \cos \alpha$.

Směr působící síly se určí pravidlem levé ruky, tedy vložíme-li levou ruku do magnetického pole tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně, prsty natočíme tak aby ukazovaly směr proudu vodičem, pak odtážený palec ukazuje směr působící síly F .

Sílu, kterou na sebe působí dva rovnoběžné vodiče, jimiž procházejí proudy I_1 a I_2 , lze stanovit pomocí vztahu pro sílu působící na vodič, jímž prochází proud a je v magnetickém poli vytvořeném proudem procházejícím druhým vodičem.

Bude-li vzdálenost os vodičů r a prostředí v němž jsou oba vodiče umístěny bude vzduch, pak proud I_1 procházející jedním vodičem, vytváří kolem sebe magnetické pole. Indukce tohoto

pole ve vzdálenosti r (v ose druhého vodiče) je dána vztahem $B_1 = \mu_0 \cdot H_1 = \mu_0 \cdot \frac{I_1}{2\pi r}$.

Síla, která působí na vodič, jímž prochází proud I_2 v magnetickém poli B_1 je dána vztahem

$F = B_1 \cdot l \cdot I_2 = \mu_0 \cdot \frac{I_1}{2\pi r} \cdot l \cdot I_2$, a jelikož $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ upravíme vztah pro sílu na

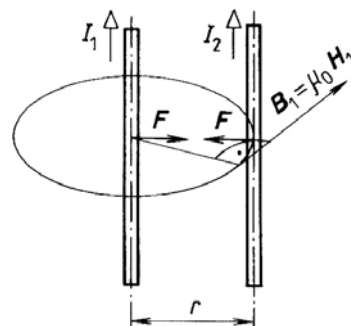
$$\text{tvar } F = 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{I_1}{2\pi r} \cdot l \cdot I_2 = \frac{2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r} \cdot 10^{-7}$$

Bude-li oběma vodiči protékat stejný proud bude působící síla

$$F = \frac{2 \cdot I^2 \cdot l}{r} \cdot 10^{-7}, \text{ z čehož vyplývá, že síla působící na vodiče je}$$

úměrná druhé mocnině proudu a při obzvláště velkých proudech (např. při zkratu) může dojít i k mechanickému poškození vodičů.

Procházejí-li proudy oběma vodiči v souhlasném směru, výsledné magnetické pole se v prostoru mezi vodiči zeslabuje, v prostoru mimo vodiče zesiluje a na vodiče působí síly, které je přitahují k sobě. Jsou-li směry obou proudů opačné je výsledné magnetické pole v prostoru mezi vodiči zesílené, vně zeslabené a vodiče se odpuzují.



Na základě silového působení mezi dvěma vodiči, jimiž prochází elektrický proud, je definován proud jeden ampér v soustavě SI:

Stejnoseměrný proud 1 A je takový proud, který při průchodu dvěma rovnoběžnými, přímými, nekonečně dlouhými a nekonečně tenkými vodiči, vzdálenými od sebe 1 m vyvolá mezi nimi ve vakuu sílu $2 \cdot 10^{-7}$ N na každý metr délky.

Použitá literatura:

- KUČEROVÁ E. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: ZČU, 2002
- MLEZIVA J. *Polymery – struktura vlastností a použití*. Praha: Sobotáles, 1993
- ŠKEŘÍK J. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. Praha: SNTL, 1991
- HASSDENTEUFEL J. *Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL, 1978
- IŽO M., TÖKÖLY F. *Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL, 1986
- MALÝ Z., SIMERSKÝ M. *Elektrotechnologie*. Praha: SNTL, 1990
- TKOTZ K. a kol. *Průručka pro elektrotechniku*. Praha: EUROPA-SOBOTALES cz, 2002.
- BLAHOVEC, A. *Elektrotechnika I*. Praha: Informatorium, spol. s r. o., 1999.
- HAVELKA, O. a kol. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985.