

5

Speciální elektricky vodivé materiály – 2. část



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, JAK LZE NĚCO VYROBIT I Z TAK EXTRÉMNĚ TEPELNĚ ODOLNÉHO MATERIÁLU JAKO JE WOLFRAM S TEPLOTOU TAVENÍ 3 410 °C.
- UKÁŽEME SI, JAK VYPADÁ KOVOVÉ „SÍTKO“ SCHOPNÉ FILTROVAT PLYN.
- ZJISTÍTE, ŽE „KARTÁČ“ NEMUSÍ SLOUŽIT JENOM K ÚKLIDU A ČIŠTĚNÍ V DOMÁCNOSTI :-), ALE MŮŽE BÝT TAKÉ NEPOSTRADATELNÝM POMOCNÍKEM V ELEKTROTECHNICE.
- DOZVÍTE SE, PROČ SE NA VÝROBU KONTAKTŮ POUŽÍVÁ ELEKTROTECHNICKÝ UHLÍK, KTERÝ URČITĚ NEPATŘÍ MEZI DOKONALÉ VODIČE.
- ŘEKNEME SI MNOHO ZAJÍMAVÝCH INFORMACÍ O SUPRAVODIVOSTI, HISTORII JEJÍHO OBJEVU A O FASCINUJÍCÍCH MOŽNOSTECH JEJÍHO VYUŽITÍ.
- DOZVÍTE SE, JAK BY SE DALA STABILIZOVAT PŘESNÁ POLOHA DRUŽIC POMOCÍ SUPRAVODIČŮ.
- ZJISTÍTE, ŽE JE VELKÝ ROZDÍL MEZI POJMY VODIČ, SUPRAVODIČ A HYPERVODIČ.



5.1 Prášková metalurgie

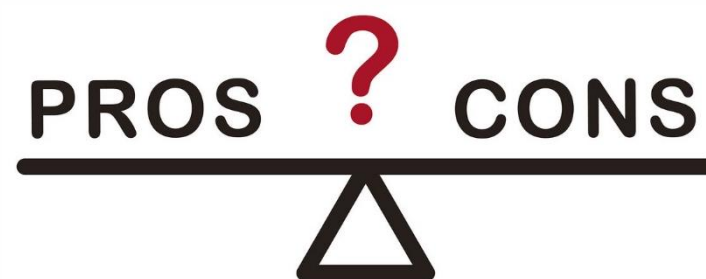
Prášková metalurgie je metoda výroby dílů (polotovary i finálních výrobků) z prášků **kovů**, **oxidů** a **karbidů kovů** a **nekovových prášků**. Často ze vzájemných směsí těchto materiálů. Podstatou je **lisování** výchozí práškové směsi do potřebného tvaru a následné **slinování**.



Poznámka: **Karbidy** jsou sloučeniny uhlíku s **elektropozitivnějšími prvky** (prvky s vyšší schopností uvolňovat valenční elektrony) s výjimkou **vodíku**. **Slinování** (či **spékání** nebo **sintrování**) je výroba předmětů z práškových hmot jejich zahřátím na vysokou teplotu, avšak **pod jejich teplotu tání**, přičemž dochází k vzájemnému **splynutí práškových částic**.

5.1.1 Výhody a nevýhody práškové metalurgie

- Možnost **hospodárněji zpracovat** materiály s vysokou teplotou tavení.
- **Minimální odpad** materiálů.
- **Vysoká přesnost** výrobků bez nutnosti dalšího opracování.
- **Velmi dobrá produktivita** – vhodná pro sériovou výrobu.
- Umožňuje **vyrobit výrobky**, které **jinými technologiemi vyrobit nelze**, např. výrobky s *vysokou žárupevností, otěruvzdorností, porozitou* aj.
- **Nevýhodou je menší hutnost a tím i pevnost a houževnatost** vyrobených materiálů.
- Další nevýhodou jsou **vysoké náklady na používané nástroje** (lze kompenzovat vysokou produktivitou).



5.1.2 Výrobní postup

Základními kroky jsou:

- 1) Výroba prášků.
- 2) Příprava práškové směsi.
- 3) Lisování (zhutňování) prášků.
- 4) Slinování výlisků z prášků.
- 5) Konečná úprava výrobků.

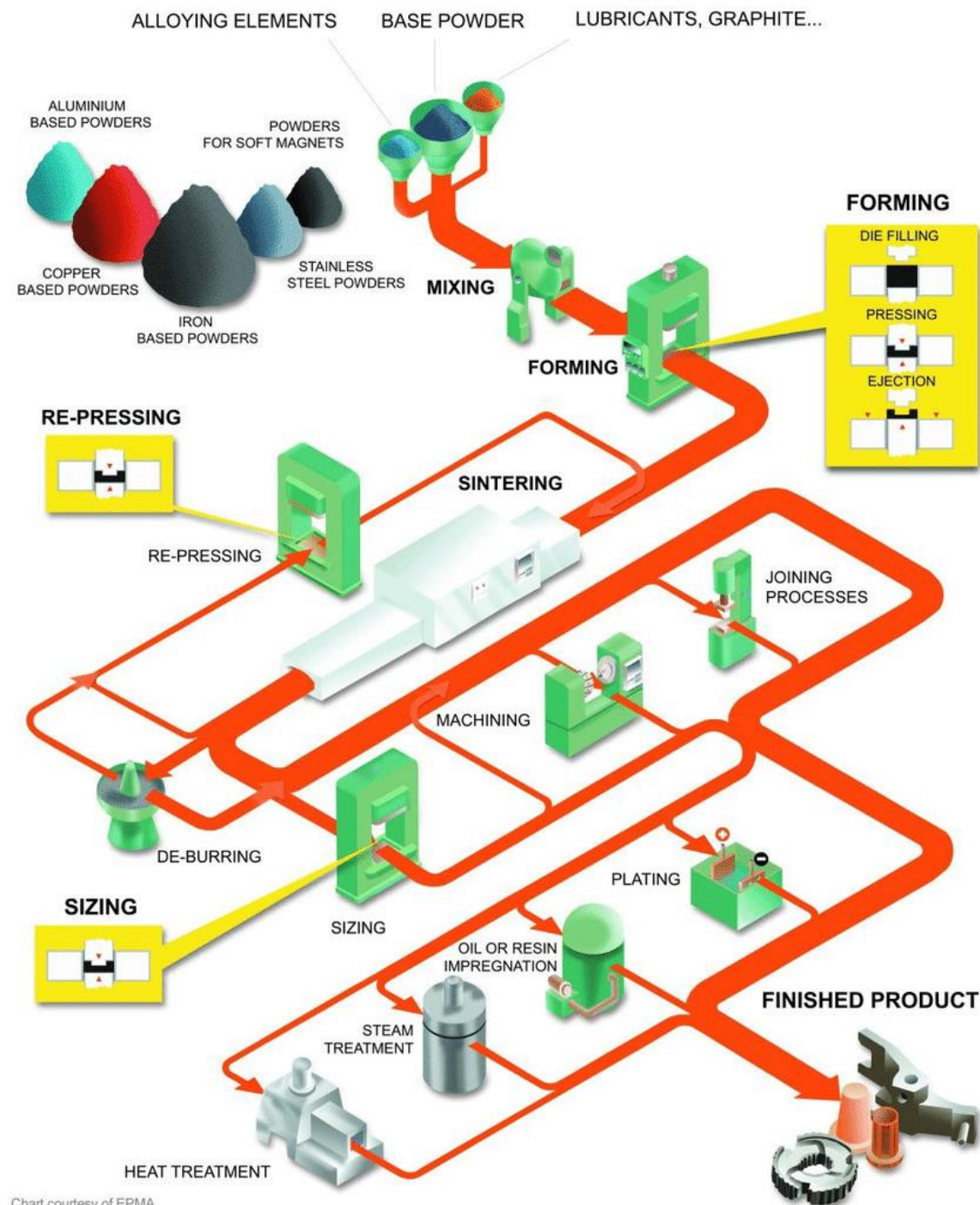


Chart courtesy of EPMA

1) Výroba prášků

Prášky je možno vyrábět způsoby:

- **fyzikálními**: **drcením a mletím** (pro *Cu, Fe, Al, Cr, Mn*) nebo **rozprašováním tekutého kovu vzduchem**, příp. **vodou** (pro *Pb, Zn, Sn, Al, Fe*);
- **kondenzací par** (pro *Zn* a *Cd*);
- **chemickými**, založenými na **redukci rud** (např. pro *Cu, Ag, Fe, Ni, Co, W, Mo, Ti*).

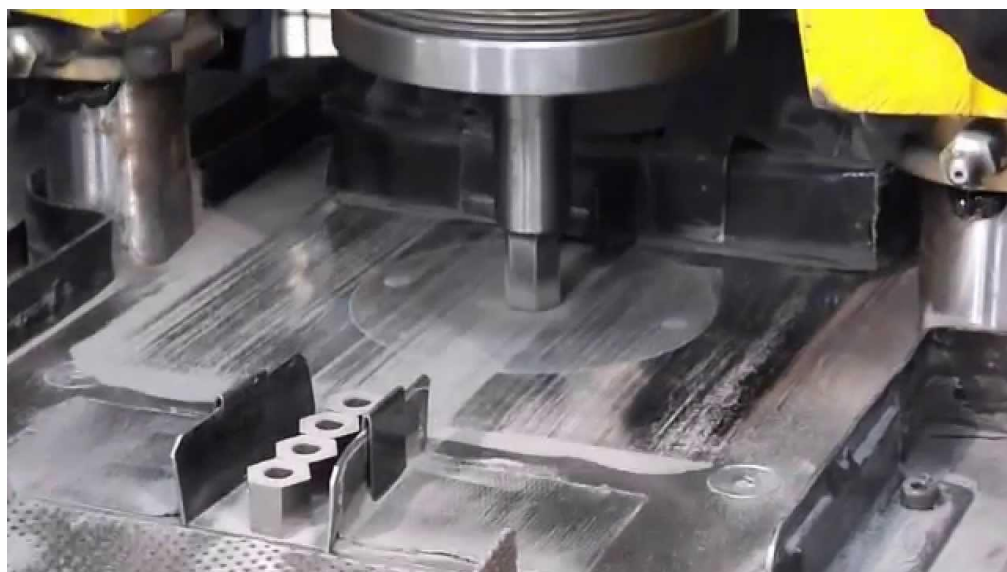


2) Příprava práškové směsi

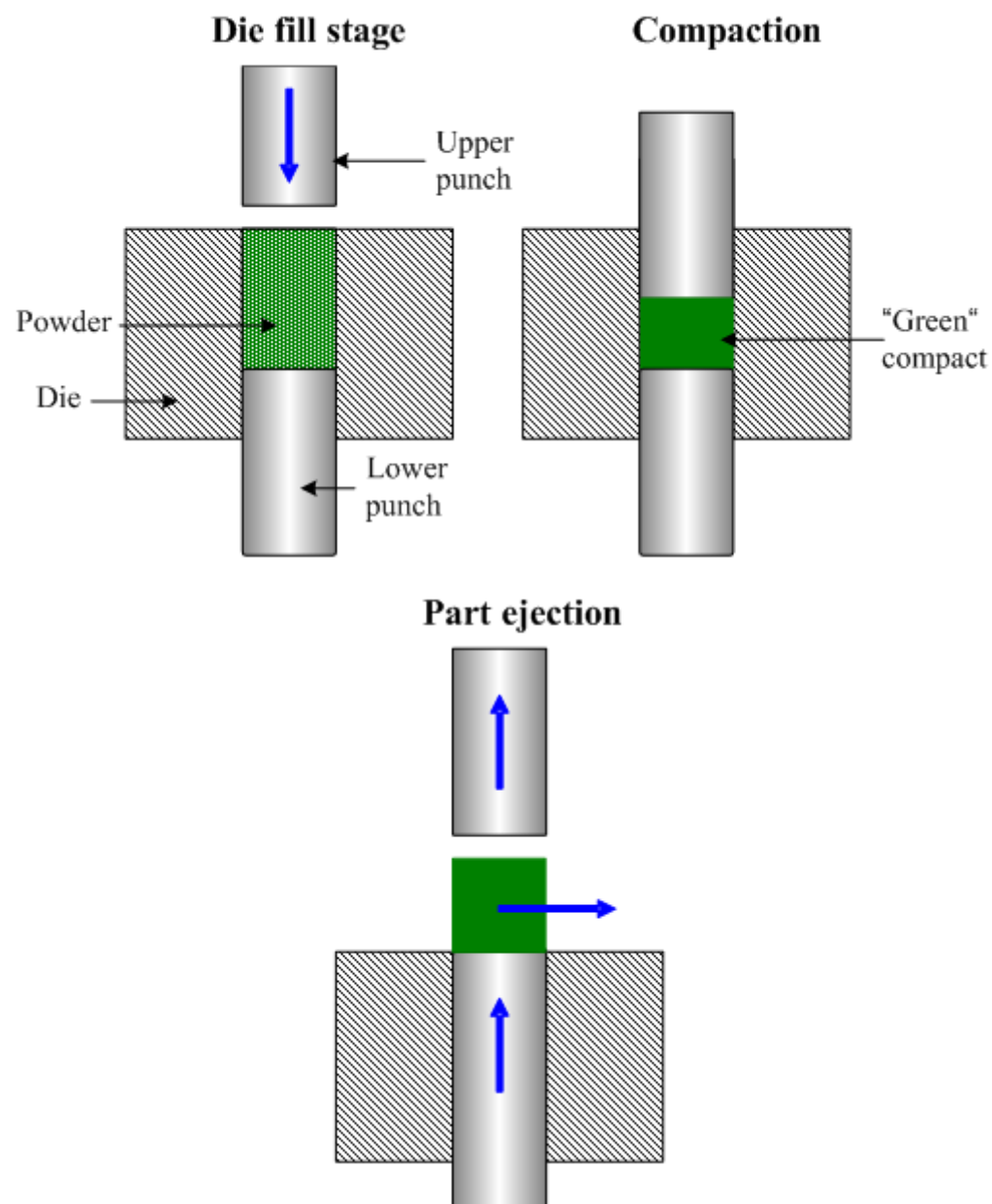
Úprava prášků navazuje na výrobu a **její způsob závisí na dalším zpracování**. Nejčastěji se jedná o **sušení prášků** po jejich výrobě rozprašováním vodou, **prosévání** a **třídění prášků** podle velikosti částic, **míchání prášků** podle žádaného složení výrobků, **přidávání dalších složek** podle zvláštních požadavků (např. **přidávání maziva** pro zlepšení lisovatelnosti).

3) Lisování (zhutňování) prášků

Účelem lisování prášků je **dosažení částečně zhutněného základního tvaru** budoucího výrobku před jeho spékáním. Způsob lisování, druh lisovacích nástrojů a lisovací tlak **závisí na spékaném materiálu, rozměrech, tvaru a účelu výrobků**. Tlaky se proto pohybují v širokém rozmezí od 200 do 2 000 MPa.



Powder pressing



4) Slinování výlisků z prášků

Teplota slinování závisí na **druhu spojovaného materiálu** a na jeho **složení**.

Slinování polotovarů z prášku jediného materiálu – teplota slinování se volí ve výši asi 80 % teploty jeho tavení. Ke spojování částic prášku dochází **difuzí**.

Slinování polotovarů ze směsi prášků – zde může dojít ke spojení prachových částic dvojím způsobem:

- (i) *teplota slinování je **nižší** než teplota tavení všech složek směsi* → ke spojení dochází **difuzí**.
- (ii) *teplota slinování je **vyšší** než teplota tavení některé nebo některých složek, přičemž alespoň **jedna ze složek zůstává v tuhém stavu*** → dochází ke spojení tuhých částic jejich **smáčením kapalnou fází** a následnou **difuzí** (podobně jako při pájení).

V případě **nebezpečí oxidace prášků** nebo jejich jiného nežádoucího chemického ovlivnění se slinování **může provádět v ochranné atmosféře** nebo **ve vakuu**.





5) Konečná úprava výrobků

V této fázi, **výrobky často ještě nevyhovují na ně kladeným požadavkům**. Proto se u nich provádí **konečná úprava**, která závisí na druhu spékaného materiálu a účelu výrobků. Nejčastějšími konečnými úpravami jsou **opakované lisování a slinování** s cílem **zvýšení hutnosti** a tím i pevnosti a houževnatosti; **kalibrování**, což je **dolisování za studena** pro **dosažení přesného tvaru a rozměrů**; **zaplnění pórů kovem** s nižší teplotou tavení, například mědí, za účelem **odstranění poréznosti** nebo **zvýšení el. vodivosti**; **sycení mazivem** u výrobků, které **mají mít nízký součinitel tření** (samomazná ložiska) a **povrchová ochrana proti korozi**.

5.1.3 Použití výrobků práškové metalurgie

1) Elektrotechnické součásti

a) Magnetické měkké/tvrde materiály – **kovové magnety**, např. *AlNiCo* zhotovené z *Fe*, *Al*, *Ni* a *Co* + někdy také z nekovové složky, např. z *křemíku*; **nekovové magnety (ferity)** se vyrábějí z **oxidů železa** – *FeO* (nebo *Fe₂O₃*) jejich slučováním s **oxidy jiných kovů** (zinek, mangan). Nejvýznamnější jsou sloučeniny *MnOFe₂O₃* a *ZnOFe₂O₃*.



b) Kontakty – jejich, často protichůdných, vlastností není lehké dosáhnout použitím jediného kovu. V případě práškové metalurgie se užívá *wolfram*, *wolfram s mědí* nebo *stříbrem*, *stříbro s niklem* nebo *oxidem kadmia*.

c) **Kartáče** – od kartáčů točivých el. strojů je **požadována vysoká elektrická vodivost a dobré kluzné vlastnosti**. Pro **malé proudy** se užívá **grafitových kartáčů**. Pro **velké proudy** se kartáče vyrábějí práškovou metalurgií z **mědi a 50 % grafitu**.



d) **Vlákna** – el. vlákna **vedou proud při vysokých teplotách**. Proto se nejčastěji zhotovují z *wolframu* nebo *molybdenu*. Tyto kovy jsou pro svoji **vysokou teplotu tavení** klasickými postupy **velmi obtížně zpracovatelné**.



2) Konstrukční (strojí) součásti – kluzná ložiska; třecí materiály (materiály s vysokým součinitelem tření), např. pro obložení brzd a spojek; **kovové** (porézní) **filtry** k filtrování kapalin, např. benzínu, nafty a technických plynů; **žárovzdorné a žárovevné materiály**: opět **vysokotavitelné kovy**: wolfram (3 410 °C), tantal (2 996 °C), molybden (2 610 °C), niob (2 486 °C), vanad (1 890 °C), chrom (1 875 °C), titan (1 668 °C); **oxidy** (Al_2O_3) a **karbidy kovů** (wolframu, titanu aj., např. na lopatky spal. turbín – „slnutina“ $TiC+Ni+Cr$).



Ložiska



Porézní kovové filtry



Lopatky turbín

3) Nástrojové materiály – materiály na obráběcí a tvářecí nástroje. Jedná se např. o: **slinuté karbidy** (karbidy vysokotavitelných kovů), přičemž se jako pojivo přidává *kobalt*; **keramické řezné materiály** (základem je **syntetický korund** – *oxid hlinitý* Al_2O_3 a pro **zvýšení houževnatosti** se přidává *karbid wolframu* nebo *karbid molybdenu*); **brusné materiály** (brusné kotouče - těleso kotouče je zpravidla z *hliníku*, na jeho **funkčním povrchu** se pak nalisováním a spékáním vytváří vrstva *diamantových brusných zrn* s kovovým pojivem); **nitridy a boridy** (patří k **novějším nástrojovým materiálům**, jedná se o různé **sloučeniny dusíku** a **sloučeniny boru**, nejznámějším materiálem je **nitrid bóru**, uváděný pod obchodním označením **borazon**).



5.2 Elektrotechnický uhlík – výroba, druhy, použití

5.2.1 Základní vlastnosti elektrotechnického uhlíku

Elektrotechnický uhlík má:

- vysoký bod tavení,
- chemickou stálost,
- dobrou elektrickou a tepelnou vodivost,
- dobrou pružnost,
- tepelnou stálost a nízkou cenu (v porovnání s kovovými materiály).



Na rozdíl od kovových materiálů mají uhlíkové materiály **schopnost vytvářet plynný oxid (CO_2)**. Proto **povrch kontaktů zůstává stále čistý**.

V elektrotechnice se používá ***k přenosu proudu mezi pevnou a pohyblivou částí*** (kluzný kontakt – sběrací kartáče el. strojů a trolejového vedení), ***na speciální kontakty*** (spínací a opalovací kontakty) a jako ***odporový materiál*** (lze u něj dosáhnout **vyšší odpor než u odporových slitin**).

5.2.2 Výroba a zpracování elektrotechnického uhlíku

Elektrotechnický uhlík je **syntetický materiál** vyráběný **práškovou metalurgií**, jehož základem jsou různé **uhlíkaté suroviny**.

Vyrábí se z:

- **uhlíkatých látek**: koks, přírodní grafit, saze, antracit („tvrdé uhlí“);
- **pojiv**: dehet, přírodní pryskyřice;
- **kovových prášků**: Cu, Ag, Zn, Sn, Pb;
- **a dalších přísad**: parafín, draselné vodní sklo a různé další chemikálie.

Koks



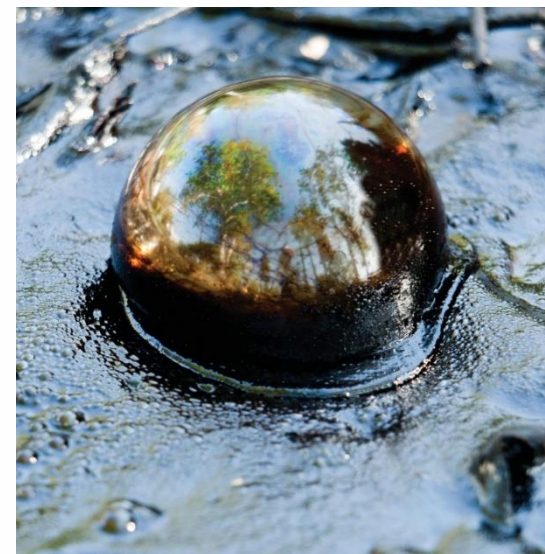
Grafit



Antracit



Dehet

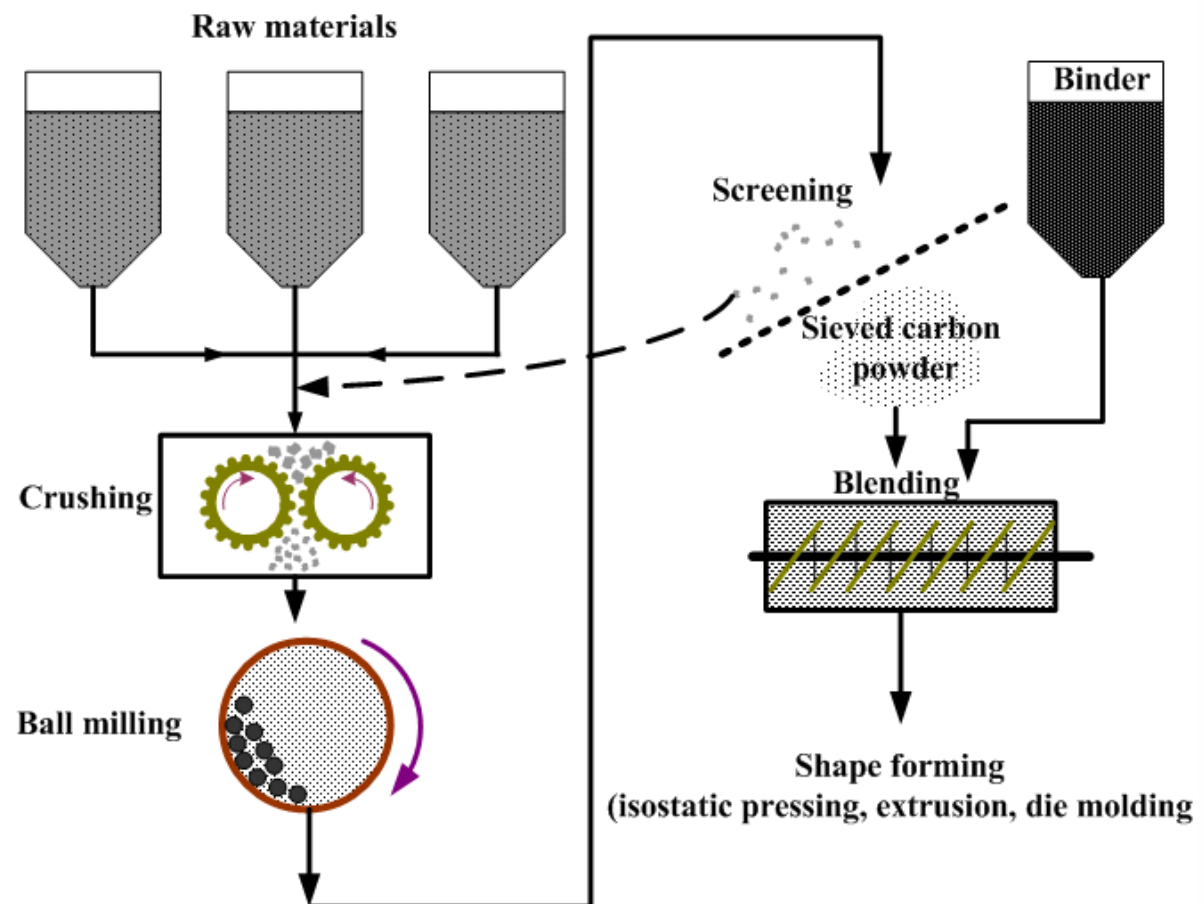


1) První etapa

Suroviny se **rozemelou** na **jemné prášky**, dokonale **smíchají** a **lisují** na požadovaný tvar. Vzniklé výlisky se **spékají (slinují)** při teplotách 1 200 až 1 400 °C; výsledkem je tvrdý pórovitý materiál s velkou rezistivitou (tzv. **tvrdý uhlík**). Z hlediska struktury se jedná o **amorfní materiál** obsahující **jemné krystality uhlíku v neuspořádaných shlucích**.

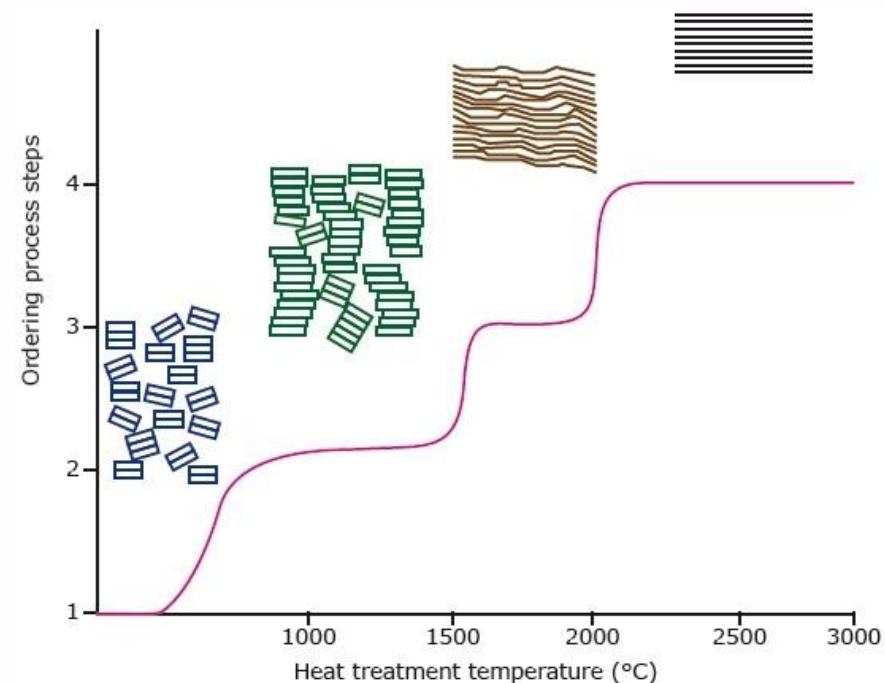
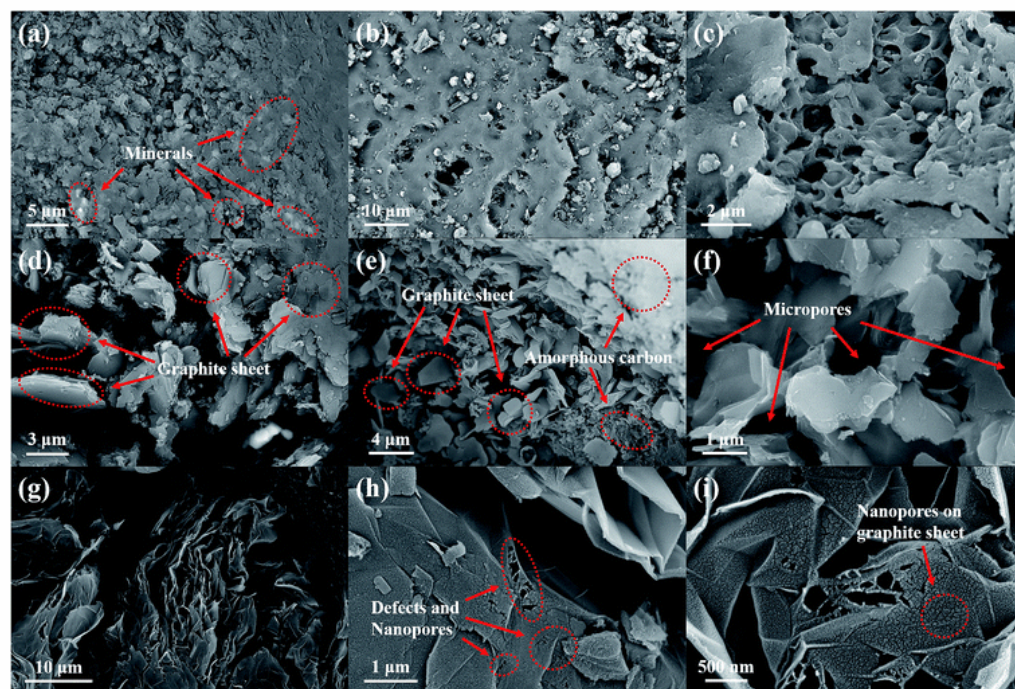
Tvrdý uhlík je:

- chemicky odolný,
- žáruvzdorný,
- odolný vůči opalování,
- má dobrou kluznost,
- je těžce obrobitelný
(=> **příliš se nepoužívá**).



2) Druhá etapa

Z tvrdého uhlíku se **dalším vypálením** při teplotě vyšší než **2 700 °C** získává tzv. **elektrografit**. Při tak vysoké teplotě **shoří všechny nečistoty** a výsledkem je **velmi čistý šesterečný uhlík** (z krystalitů vzniknou šupinky), tím se zlepší jeho **elektrická i tepelná vodivost, kluznost a chemická stálost**.



Elektrickou vodivost **elektrografitu** lze dále **vylepšovat** impregnací roztavenými kovy (*Cu* nebo *Ag*).

5.2.3 Použití elektrotechnického uhlíku

Vhodnou **kombinací uhlíkatých látek, pojiv, kovových prášků a dalších přísad** lze získat **široký sortiment materiálů** s nejrůznějším uplatněním v elektrotechnice.

Mezi nejznámější materiály používané **v technické praxi** patří:

a) Elektrografit

Práškový koks, saze, grafit + smolná pojiva (asfalt, dehet, syntetické pryskyřice apod.). Je **nejvýznamnější pro elektrické točivé stroje**.

Vyznačuje se:

- **dobrými kluznými vlastnostmi a dostatečnou pevností,**
- **dobrou odolností proti jiskření,**
- **dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí.**

Používá se pro *trakční motory, stejnosměrné stroje, turbo a hydrogenerátory.*



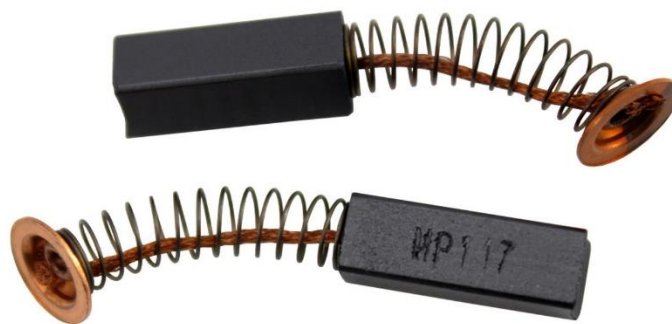
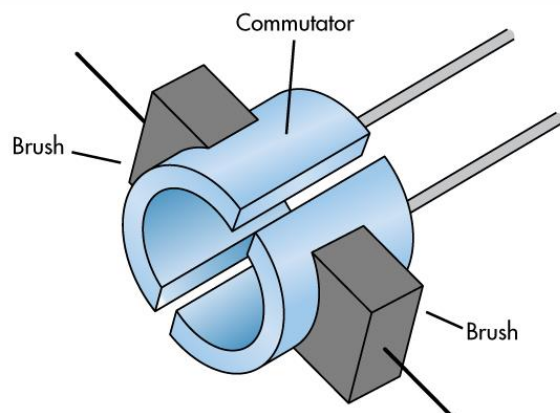
b) Kovografit

Směs **grafitu** a **Cu** nebo **Ag prášku** ($30 \div 85 \%$). **Dobře elektricky vodivý; není vhodný pro rychlé proudové změny** při komutaci (přepínání směru) proudu; **málo pružný**; má **vyšší hustotu, nízké kontaktní úbytky napětí**.

Vhodný pro **nenáročnou komutaci** (nízké napětí) a **přenos velkých proudů**. Používá se pro *asynchronní motory, nízkonapěťová dynamo, spouštěče*.

c) Přírodní grafit

Je **měkký, pružný** a díky minerálním nečistotám **má abrazivní schopnost** (schopnost obrušovat). Hodí se pro stroje s vysokou obvodovou rychlostí – *turbogenerátory a do agresivního prostředí*.



d) Bakelitografit

Grafit + fenolplastické pojivo (bakelit). Pro svůj **vyšší přechodový odpor** je vhodný **pro menší motory s vyšším napětím a malými proudy**. Používá se pro *třífázové komutátorové stroje, malé a střední stejnosměrné stroje*.

e) Uhlografit

Vyrábí se z **koksu, grafitu a sazí spojených smolou**. Při výrobě **nedochází ke grafitaci** (krystalizaci) a vyrobený materiál je **amorfní uhlík spojený pojivy**. Má **menší podíl abrazivních příměsí než tvrdý uhlík**, ale i tak je stále **mírně abrazivní**. Hodí se pro *malé stroje a třífázové komutátorové stroje*.

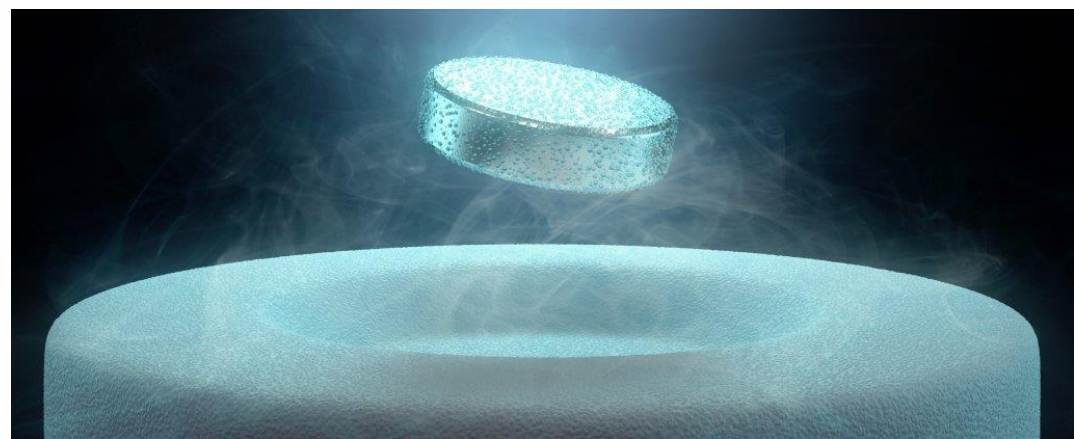


5.3 Supravodivost

Přestože je rezistivita např. *měděného* nebo *hliníkového* vodiče velmi nízká, stačí k tomu, aby se na něm ztratila ve formě tepla **až třetina procházející elektrické energie**. Ovšem, u některých skupin materiálů (*vybrané kovy*, *slitiny* a *intermetalické sloučeniny*) klesá odpor při teplotách blízkých **absolutní nule** nekontinuálně, **skokem**, na hodnotu **teoreticky nulovou** – nastává **jev supravodivosti**.

Supravodivý stav společně ovlivňují:

- *teplota*,
- *magnetické pole*,
- *proudová hustota*.

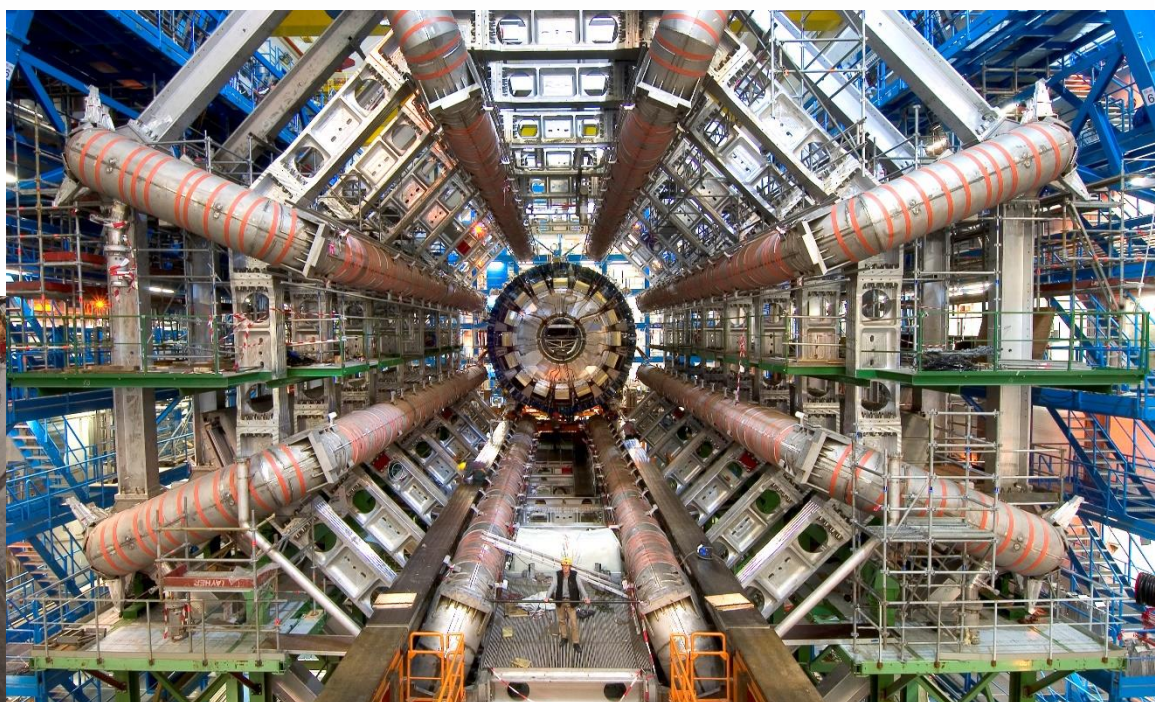
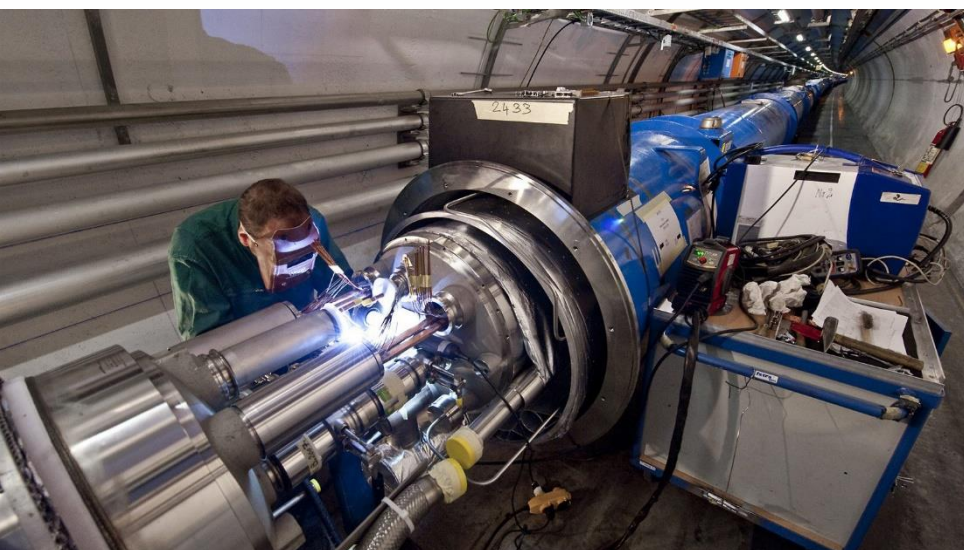


Podmínkou zachování supravodivého stavu je **udržení těchto veličin pod jejich tzv. kritickými hodnotami** (T_c , B_c a j_c). Ty jsou pro různé skupiny supravodičů rozdílné.

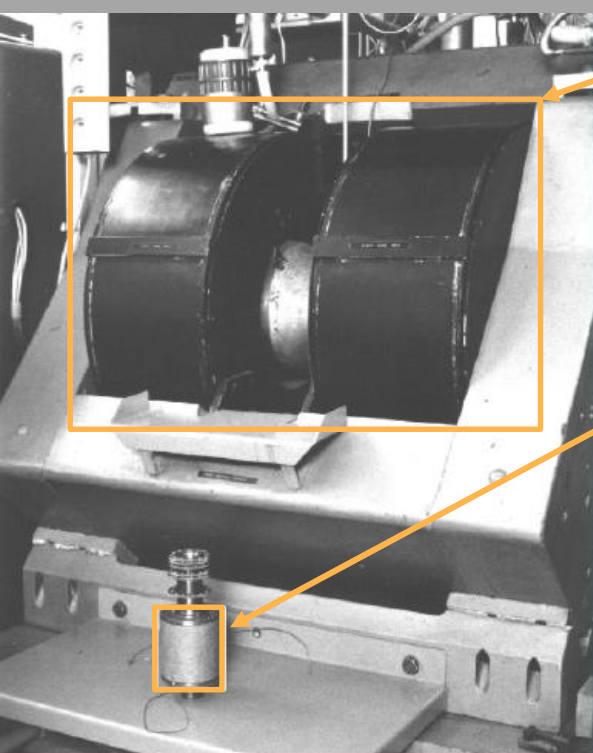
5.3.1 Praktické dopady supravodivosti, její výhody a nevýhody

Supravodivý materiál **neklade průchodu el. proudu žádný odpor**. Do cívky, vytvořené z takového materiálu, můžeme přivést el. proud, poté zdroj proudu odpojit a nechat proud cívkou (beze ztrát) protékat po velmi dlouhou dobu (i několika let). Proud budí v okolí vodiče **mg. pole (supravodivá cívka je jeho zdrojem)** a vzniká tzv. **supravodivý magnet**, který je využíván všude tam, kde potřebujeme **mg. pole vysoké intenzity** a máme k dispozici potřebné **chladicí médium**.

Supravodivé cívky v urychlovači částic LHC
(Large Hadron Collider).



Jeden ze šesti detektorů ATLAS připojených na
LHC urychlovač.



Konvenční elektromagnet
dimenzovaný na 100 A.

Supravodivý magnet
dimenzovaný na 100 A
(vytváří dokonce více než 2krát
intenzivnější mg. pole).



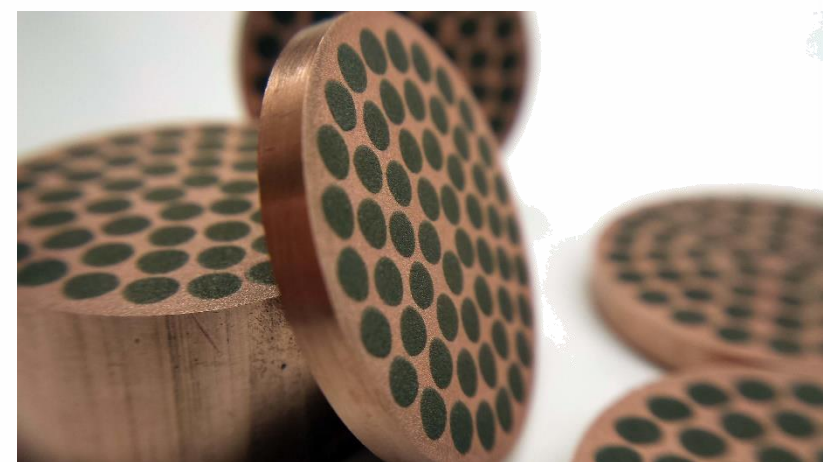
Konvenční svazek vodičů
dimenzovaný na proud 12,5 kA.

Supravodivý pásek
dimenzovaný na 12,5 kA.

Zásadní výhodou supravodivých magnetů je, že díky **nulové rezistivitě supravodivého materiálu** je možné pro bezpečný průchod velkého proudu použít **mnohem tenčí vodič**, než by byl potřeba u klasické cívky. Do **malého průřezu cívky** můžeme tedy **vtěsnat velké množství závitů**. A protože je **mg. pole cívky úměrné počtu ampérzávitů** (násobku proudu a počtu závitů cívky), umožňuje obrovský počet supravodivých závitů podstatně snížit potřebný proud oproti klasickým magnetům => **s proudy několika desítek ampérů lze vytvořit mg. pole o intenzitě řádu několik tesla.**

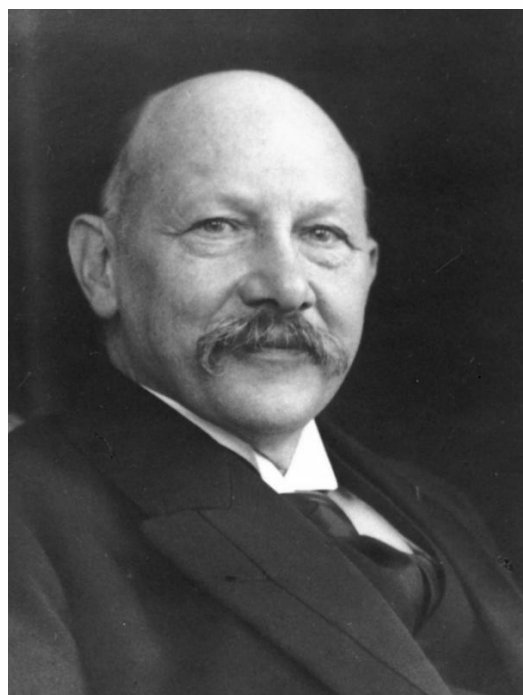
Zásadní nevýhodou supravodivých materiálů je, že při přenosu el. energie je potřeba neustálého chlazení => mají **vysoké náklady na provoz**.

Z tohoto hlediska je slibné využití tzv. **vysokoteplotních supravodičů**, které mají kritické teploty v průměru **okolo 90 K** (-183 °C), některé až **136 K** (-137 °C), tedy **nad teplotou varu kapalného dusíku** (-195,15 °C), který patří mezi relativně levná chladiva (30× levnější než He). Nicméně, vysokoteplotní supravodiče jsou vesměs **velmi křehké keramické materiály** a **technologie výroby vodičů z nich je velmi náročná**.



Klasické **nízkoteplotní supravodiče** jsou supravodivé při teplotách **pod 23 K** (-250 °C) a musejí se proto chladit **kapalným heliem** (bod varu -269 °C), **které je drahé**. Ale, jsou to materiály na bázi **čistých kovů** a jejich slitin, které jsou dobře mechanicky tvárné a **výroba vodičů tedy není problém**.

5.3.2 Teorie a stručná historie objevu supravodivosti



1911 - holandský fyzik *Heike Kamerlingh Onnes* objevil a popsal jev supravodivosti.

Důležitým předpokladem jeho objevu byl velký pokrok v dosahování **nízkých teplot**, který učinil nedlouho předtím, když se mu v roce 1908 podařilo zkapalnit *helium* na teplotu 4 K (-269,15 °C). Následně, při sledování chování *čisté rtuti* pozoroval **náhlé vymizení jejího elektrického odporu** při této teplotě.

Jev supravodivosti byl postupně zjištěn u řady dalších **kovových prvků**, pokud byly ochlazeny pod kritickou teplotu T_c . U některých kovových prvků byla zjištěna supravodivost **pouze za vysokých tlaků** (např. *As, Ba, Ge, Si, Se*), u některých **nebyla zjištěna** vůbec (*Pt, Fe, Co, Ni*).

Bylo také zjištěno, že rezistivita supravodiče v supravodivém stavu je menší než $10^{-25} \Omega \cdot \text{cm}$, tj. 10^{17} krát menší než měrný el. odpor *Cu* při 25 °C.



Walter Meissner



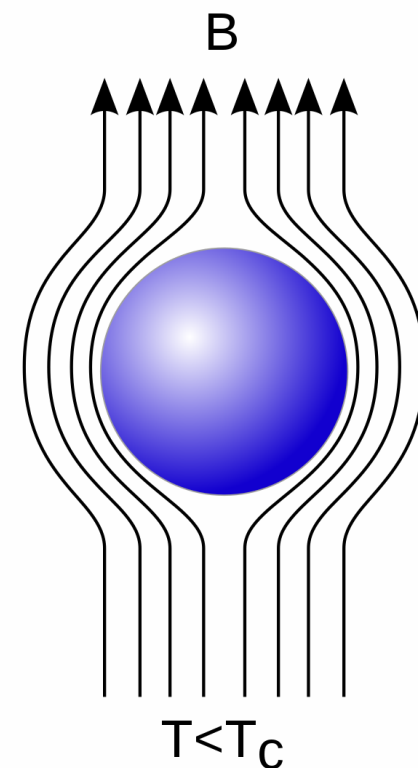
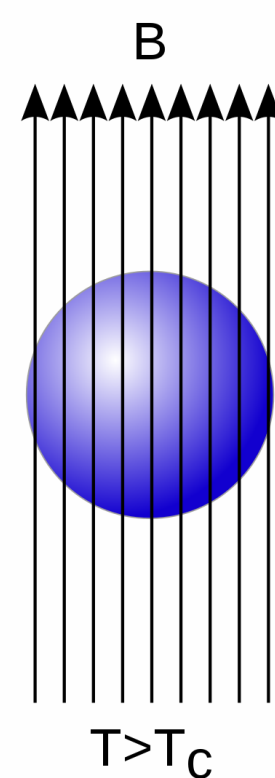
Robert Ochsenfeld



1933 – němečtí fyzici **Walther Meissner** a **Robert Ochsenfeld** zjistili, že kromě nulového el. odporu vykazuje materiál v supravodivém stavu ještě další významnou vlastnost: **v supravodivém stavu nevniká vnější mg. pole do objemu supravodiče.**

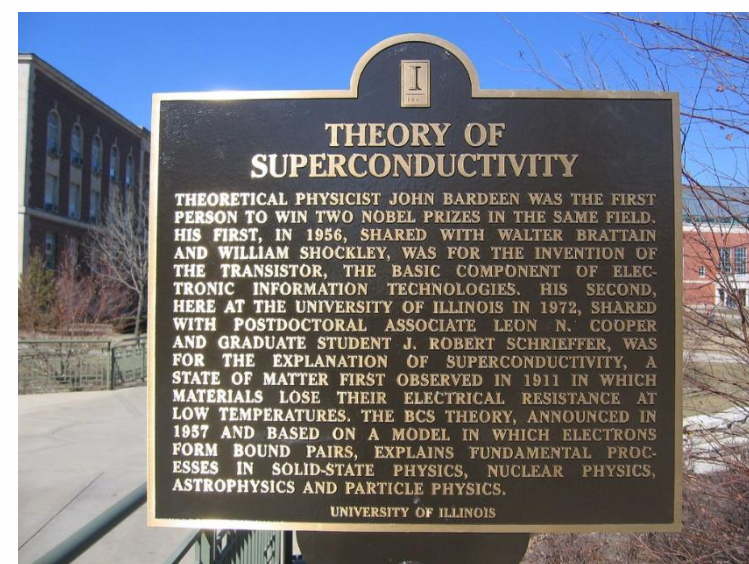
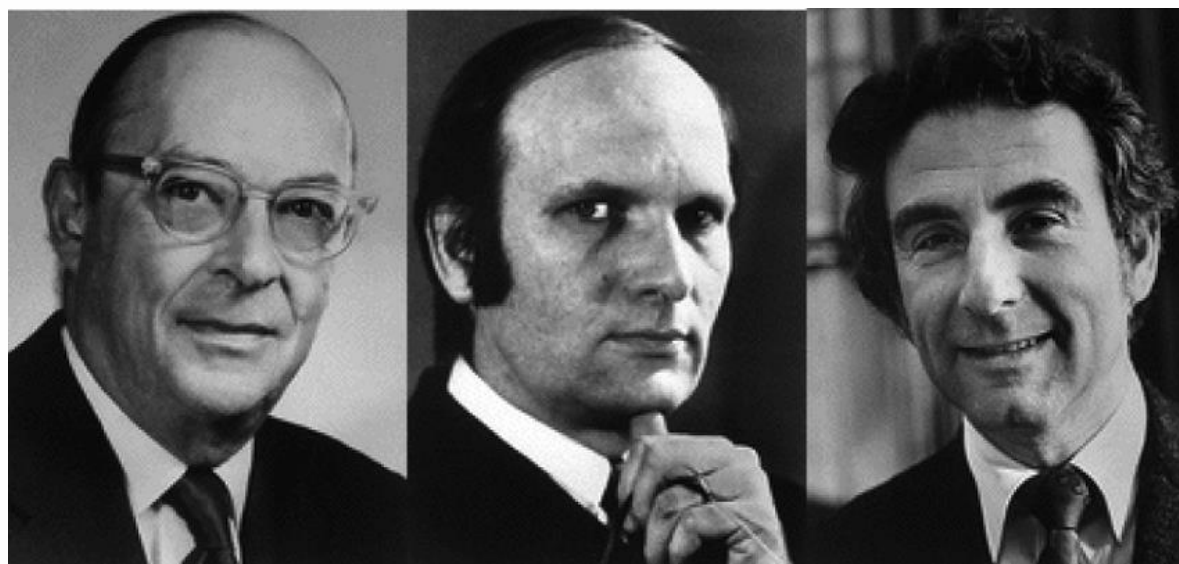
Na **povrchu** supravodiče se indukují proudy, které vytvoří **mg. pole stejné velikosti, ale opačného směru**. Proto je **mg. indukce supravodiče nulová** a platí tedy, že **supravodič je ideálním diamagnetikem**.

Výjimku tvoří tenká povrchová vrstva, tzv. **hloubka vniku mg. pole do supravodiče** (rovna přibližně $5 \cdot 10^{-6}$ cm pro *Pb*, *Sn*, *Hg* a některé další kovy).

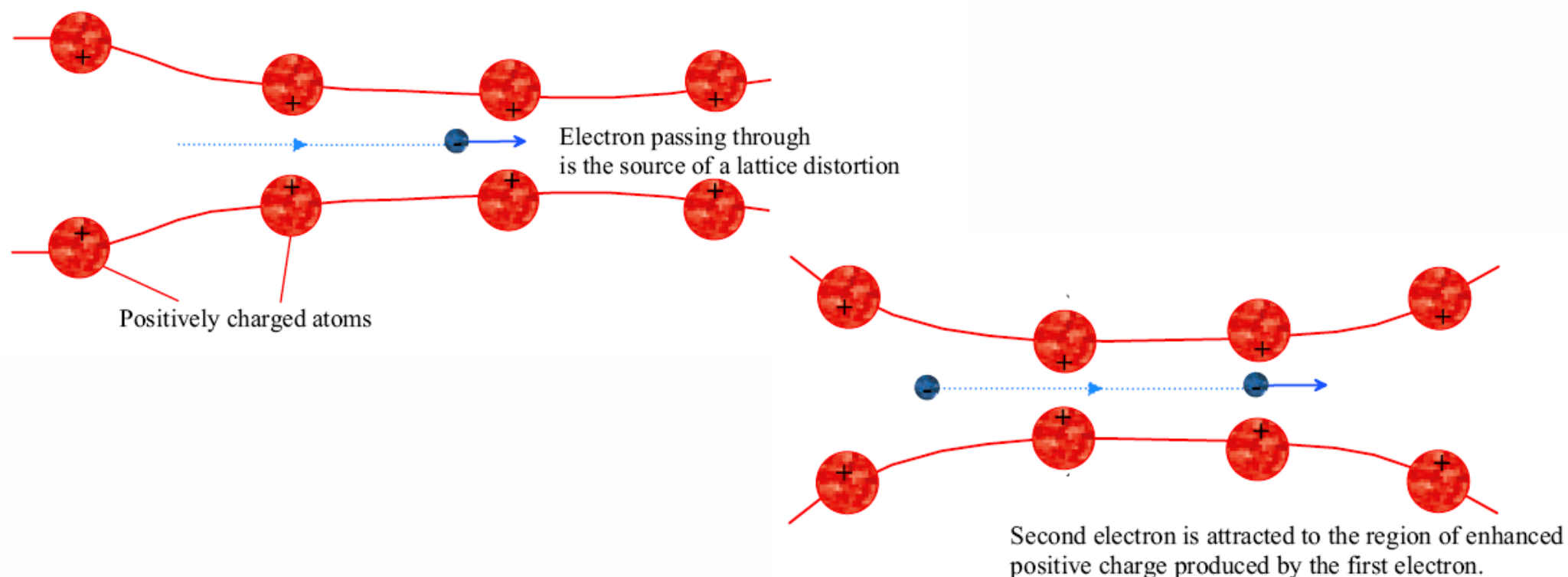


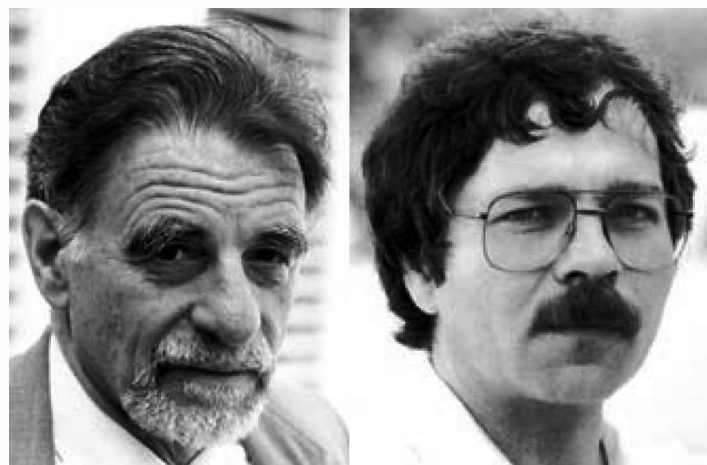
Praktický dopad tohoto zjištění: Protéká-li supravodičem el. proud, vzniká na jeho povrchu mg. indukce, která při dosažení kritické hodnoty B_c **způsobí přechod supravodiče zpět do normálního vodivostního stavu**. V aplikacích, kde hrozí **proudové rázy**, které toto mohou způsobit, je užíváno **supravodivých vodičů s vodivým pláštěm** např. z mědi, neboť měď je schopna po určitou dobu zajistit vodivé spojení. To je nutné zejména u **vysokoteplotních supravodičů**, které jsou v normálním stavu nevodivé.

1957 – teoretické vysvětlení vodivosti nízkoteplotních supravodičů - Američané *John Bardeen*, *Leon Cooper* a *John Robert Schrieffer* (BCS teorie). Za tuto teorii získali v roce **1972 Nobelovu cenu**.



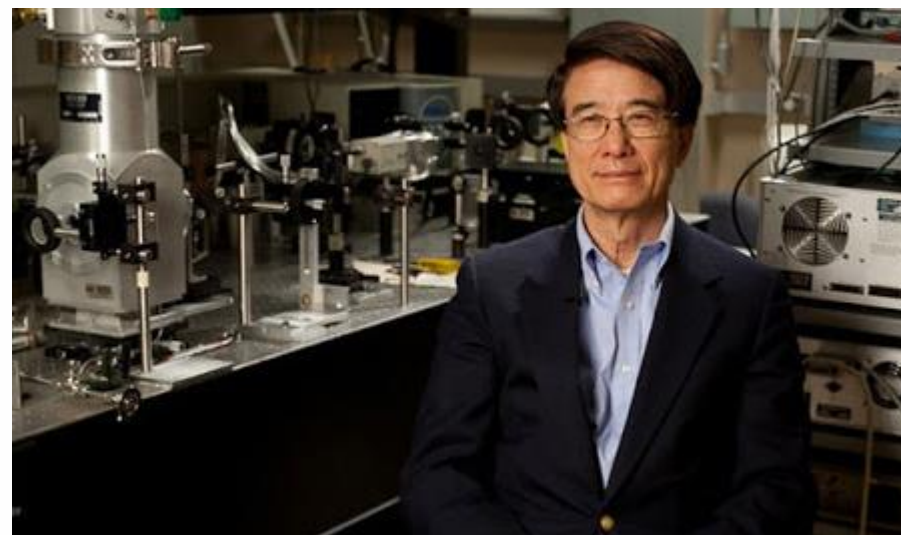
Zjednodušený pohled na BCS teorii: Elektron při svém pohybu krystalovou mřížkou vyvolá **zhuštění kladných iontů kolem své trajektorie** => ionty se do svých původních poloh vrací **relativně pomalu** => do tohoto místa je tedy **přitahován druhý elektron** => výsledkem je **nepřímé přitahování jednoho elektronu druhým**, tzv. **korelovaná dvojice elektronů** (*Cooperův pár elektronů*). Tento stav **vylučuje některé další jevy**, např. srážky elektronů s ionty krystalové mřížky, a tím i **elektrický odpor**. Korelované dvojice existují pouze v supravodivé fázi.





1986 – pracovníci firmy IBM v Curychu (Švýcar *Karl Alexander Müller* a Němec *Johannes Georg Bednorz*) publikovali zprávu, že dosáhli u jistého **keramického materiálu** (LaBaCuO) supravodivých vlastností již při teplotě 35 K ($-238,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Za tento průlomový **objev supravodivosti v keramických materiálech** získali v roce **1987 Nobelovu cenu za fyziku**.

1987 – americký fyzik čínského původu *Paul Ching Wu Chu* nahradil v supravodivé keramice *lantan* za *ytrium* a získal tak supravodivý materiál vykazující **kritickou teplotu dokonce vyšší než 90 K** ($-183,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tato teplota znamenala překročení magické teplotní hranice, dosažitelné **kapalným dusíkem** (77 K).



5.3.3 Rozdělení supravodičů

Postupně bylo zjištěno, že existují **dva druhy supravodičů**.

1) Supravodiče 1. typu (měkké, ideální supravodiče): Ztrácí supravodivé vlastnosti **v silných mg. polích** a jsou to **výhradně kovy a jejich přímé slitiny**. Jejich chování je v souladu BCS teorií. Byly objeveny dříve a platí pro ně *Meissner-Ochsenfeldův efekt* vytlačování mg. pole, což znamená, že **jsou ideálními diamagnetiky**. Supravodivost u tohoto typu ale nastává **až při teplotách blízko absolutní nule**, proto je nutné je **chladit kapalným heliem**.

2) Supravodiče 2. typu (tvrdé, neideální supravodiče): Nejrůznější **slitiny kovů, intermetalické sloučeniny** obsahující měď a nekovové složky a **výjimečně elementární kovy**, které supravodivé vlastnosti vykazují i **ve velmi silných mg. polích** a ke ztrátě supravodivosti dochází při stokrát i vícekrát silnějších magnetických polích ($\div 10^6 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$) než u 1. typu ($\div 10^3 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$). **Dokonale odstíní slabá okolní mg. pole**, ale **ne tak dokonale již silnější pole**, ta odstíní jen částečně, tj. **nejsou dokonalými diamagnetiky**. Lze je **chladit kapalným dusíkem**, který je o mnoho levnější.



- **Homogenní supravodiče 2. typu** (např. Nb): mají stejné vlastnosti jako supravodiče 1. typu pod tzv. **dolní kritickou hodnotou (B_{c1})**, zatímco nad touto kritickou hodnotou nejsou schopny vést proud beze ztrát.
- **Nehomogenní supravodiče 2. typu** (např. Nb_3Sn , $Nb-Ti$) vedou stejnosměrný proud s velmi vysokou hustotou beze ztrát i v silných mg. polích pod tzv. **kritickou hodnotu (B_{c2})**. Při stř. proudech vznikají ztráty.

5.3.4 Rozdělení supravodičů podle provozní teploty

- 1) **Nízkoteplotní supravodiče** (od 1911)
kovy, slitiny, nekovové prvky,
intermetalické sloučeniny.
- 2) **Vysokoteplotní supravodiče** (od 1986)
převážně *keramiky* s T_c nad 77 K
(-196,15 °C).
- 3) **Supravodivé organické sloučeniny a supravodivý uhlík**
nejmladší skupina supravodičů.



Nízkoteplotní supravodič	T_c (K) (při $B = 0$ T)	T_c (°C) (při $B = 0$ T)	B_c (T) (při $T = 0$ K)	
Pb	7,2	-265,95	0,08	} Čisté kovy
Nb	9,2 – 9,4	-263,95 až -263,75	0,194	
Pb-Ni	7	-266,15	1,8	} Slitiny kovů
Nb-Zr	9 – 11	-264,15 až -262,15	6 – 9	
Nb-Zr-Ti	10,5	-262,65	8 – 11	
Nb-Ti	8 – 10	-265,15 až -263,15	9 – 12	
Nb ₃ Sn	17,3 – 18,2	-255,85 až -254,95	22 – 24	} Intermetalické sloučeniny Obtížná výroba. Vyrábějí se buď konvenčním tavicím procesem nebo práškovou metalurgií.
V ₃ Ga	14,5 – 16,8	-258,65 až -256,35	21	
V ₃ Si	17	-256,15	23,5	
Nb ₃ Al	18,7	-254,45	29,5	
Nb ₃ Ga	20,3	-252,85	34	
Nb ₃ Al-Ge	20,7 – 21	-252,45 až -252,15	41	

Poznámka: Kritická proudová hustota dnešních supravodičů je v rozmezí 10 – 40 kA·cm⁻² při teplotě 77 K.



5.3.5 Výroba supravodičů

Nejširší technické použití mají dosud slitiny na bázi ***Nb-Ti*** a intermetalická sloučenina ***Nb₃Sn***.

Nb-Ti – Supravodivé slitiny jsou poměrně dobře tvárné a pevné. Jsou vyráběny nejčastěji **v obloukových pecích tavením ve vakuu**. Po odlití jsou **žíhány** a **tvářeny**, nejčastěji **válcováním**, do **výchozích polotovarů** (drátů nebo tyčí). Následuje **tažení**, **protlačování** nebo **válcování** a vznikají vodiče různých typů: (i) **jednožilové vodiče** (průměr *Nb* žíly bývá 0,2 mm, průměr *Cu* pláště 0,5 mm), (ii) **vícežilové vodiče** (desítky žil o průměru okolo 0,1 mm ve společném *Cu* plášti) nebo (iii) **mnohovláknové vodiče**, kde ve společné *Cu* nebo *Cu-Ni* matici je uloženo několik desítek až několik desítek tisíc *Nb-Ti* vláken o průměru od 5 do 50 mikrometrů.



Cu plášť či **Cu matrice** se užívají pro ochranu, zlepšení vlastností supravodičů a zejména jejich stabilizaci. El. vodivost supravodičů je v normálním stavu poměrně nízká => může dojít k jejich **poškození vývinem** nadměrného **tepla** => **vedení proudu převezme Cu plášť** nebo **Cu matrice**.

Nb_3Sn – příprava z **Nb drátů**, na které se nanese vrstva **Sn** a následuje **difuzní žíhání** za vzniku **Nb_3Sn** . **Nb_3Sn** má **vysokou křehkost**, proto se vyrobené supravodiče ve formě svazku „obalí“ **mědí** => **vznik flexibilního vodiče**, který lze vinout ve formě cívek => ochranná vrstva **Cu** může přenášet proud v kritických situacích ($T > T_c$). Takto vyrobené vodiče je možno použít až do indukcí **15 T**.



5.3.6 Praktické využití supravodičů

Mezi nejperspektivnější oblasti pro využití supravodičů patří:

- **elektronika a výpočetní technika** (logické obvody, paměti, detektory...);
- efektivní **výroba a uchování elektrické energie** a její **bezeztrátový přenos** pomocí supravodivých vodičů s pláštěm naplněným *kapalným heliem*;
- **zdokonalení přístrojové techniky** pro fyzikální a lékařské účely (např. magnetická rezonance);
- **zvýšení výkonu elektromotorů, transformátorů, magnetických separátorů**;
- **zdokonalení vojenských a vesmírných technologií**, např. **supravodivé setrvačníky pro stabilizaci polohy družic** (teplota ve vesmíru je nízká => odpadá starost s chlazením) nebo **supravodivé setrvačníky obřích rozměrů** s velkou hmotností, které mohou sloužit jako potenciální **zásobník kinetické energie**, kterou je možné ve vhodný okamžik převést na energii elektrickou a zásobovat tak např. **vesmírnou stanici**.



5.4 Hypervodivost

Hypervodivostí (kryovodivostí) se nazývá **mimořádně velká** **konduktivita** některých **velmi čistých kovů** (99,995 %) v oblasti kryogenních teplot, pod 100 K (-173,15 °C), tedy při teplotách blízkých kritickým teplotám nejlepších supravodičů. Jejich konduktivita se **zvyšuje se stupněm čistoty a s poklesem teploty**. Jako hypervodiče přicházejí v úvahu jen velmi čisté kovy s co nejmenším počtem poruch v krystalové mřížce.

Výhodou hypervodičů je relativně **vysoká provozní teplota**, která umožňuje použití **kapalného vodíku** nebo **dusíku** místo drahého *helia*. Dosažitelné proudové hustoty jsou až o **2 řády vyšší** než u současně používaných materiálů, což vede ke zmenšení hmotnosti a rozměrů elektrických strojů.

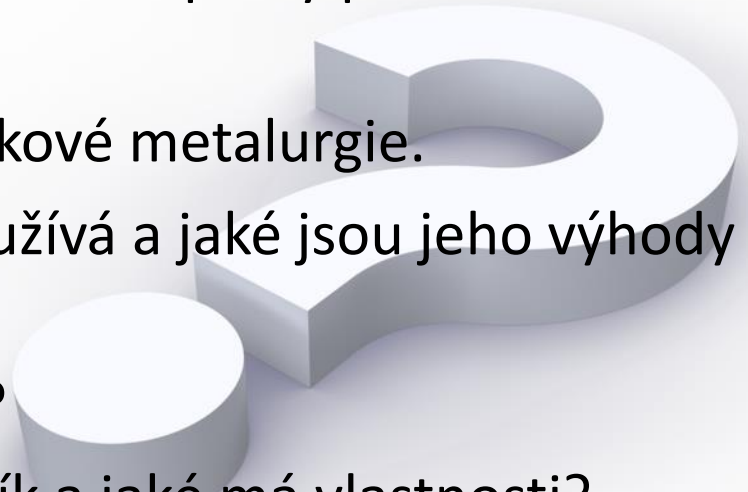
Příklady možných kombinací:

- **kapalný vodík + čistý hliník** – relativně levné, ale *vodík* ve směsi se *vzduchem* **tvoří třaskavou směs**;
- **kapalný dusík + velmi čisté beryllium** – *dusík* je levný, *beryllium* je ale **drahý deficitní kov**.



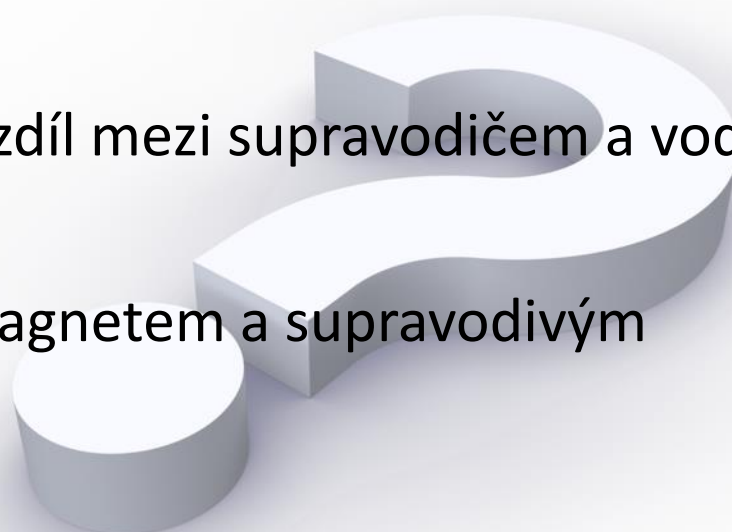
Kontrolní otázky

- Co je to prášková metalurgie, k čemu a proč se používá?
- Jaké jsou výhody a nevýhody práškové metalurgie?
- Co je to slinování a co jsou to karbidy?
- Jakými postupy lze vyrobit prášky kovů?
- V čem je rozdíl, pokud vyrábíme polotovary z prášku jediného materiálu a pokud ze směsi prášků?
- Co vše může zahrnovat výrobní fáze konečné úpravy produktů vyrobených práškovou metalurgií?
- Popište praktické aplikace výrobků práškové metalurgie.
- Co je to elektrický kartáč, k čemu se používá a jaké jsou jeho výhody a nevýhody?
- Co je to slinutý karbid a kde se používá?
- K čemu se používá elektrotechnický uhlík a jaké má vlastnosti?



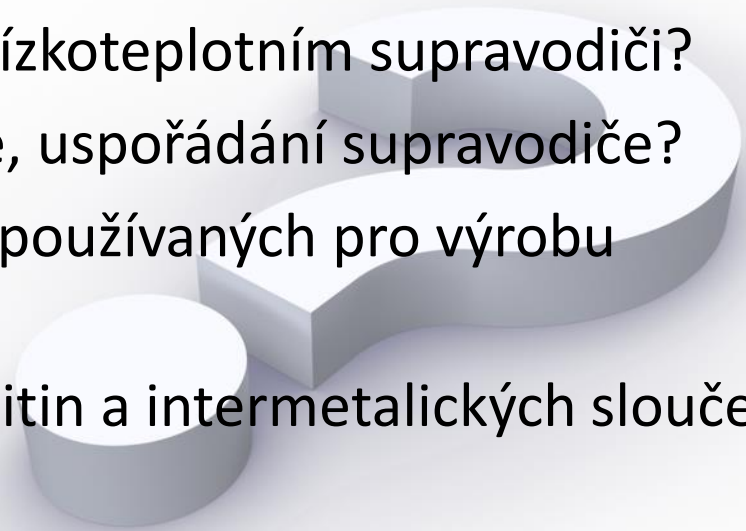
Kontrolní otázky

- Jaká unikátní vlastnost elektrotechnického uhlíku jej předurčuje pro použití na kontakty?
- Jaké jsou vstupní produkty pro výrobu elektrotechnického uhlíku?
- Jaký je rozdíl mezi „tvrdým uhlíkem“ a elektrografitem? Popište také rozdíl mezi vnitřní strukturou těchto materiálů.
- Jak lze dále vylepšit elektrickou vodivost elektrografitu?
- Popište oblasti využití jednotlivých typů elektrotechnického uhlíku v elektrotechnice.
- Definujte jev supravodivosti. Popište rozdíl mezi supravodičem a vodičem.
- Jaké faktory ovlivňují supravodivý stav?
- V čem tkví zásadní rozdíl mezi elektromagnetem a supravodivým magnetem?
- Jaká je zásadní nevýhoda supravodičů?
- Do jakých skupin supravodivé materiály dělíme?



Kontrolní otázky

- Jaké jsou výhody a nevýhody jednotlivých skupin supravodičů?
- Kdy byl objeven jev supravodivosti?
- Co je to Meissner-Ochsenfeldův jev a jaký má praktický dopad na využití supravodičů?
- Popište základní myšlenku BCS teorie vodivosti nízkoteplotních supravodičů.
- Kdo stál za objevem vysokoteplotních supravodičů? Kdy byly objeveny?
- Jaký je rozdíl mezi vysokoteplotními a nízkoteplotním supravodiči?
- Jak vypadá typické, prakticky využitelné, uspořádání supravodiče?
- Vyjmenujte jednotlivé druhy materiálů používaných pro výrobu nízkoteplotních supravodičů?
- Popište způsob výroby supravodivých slitin a intermetalických sloučenin založených na Nb-Ti a Nb₃Sn.
- Kde všude lze supravodiče prakticky využít?



Kontrolní otázky

- Za jakých podmínek mluvíme o hypervodivosti?
- Jaký je rozdíl mezi vodivostí a hypervodivostí kovů?
- Jmenujte praktické příklady hypervodičů.

