

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Průmyslová výroba permanentních magnetů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin VINŠ**
Osobní číslo: **E13B0095P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Průmyslová výroba permanentních magnetů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište druhy permanentních magnetů a jejich vlastnosti.
2. Popište principy průmyslové výroby permanentních magnetů.
3. Popište způsoby testování permanentních magnetů.
4. Vytvořte model permanentního magnetu v magnetickém obvodu a analyzujte jeho vlastnosti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Světlík

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na rozdělení základních druhů permanentních magnetů a jejich nejběžnějších zástupců, popisuje jejich vlastnosti, krystalickou strukturu, principy jejich průmyslové výroby a způsoby testování. Obsahuje také výsledky a vyhodnocení několika simulací, které mají za cíl potvrdit efektivitu použití různých pólových nástavců v magnetických obvodech pro magnetické upínací systémy používané k upínání feromagnetických předmětů.

Klíčová slova

Permanentní magnety, magnetické pole, magnetika, permanentní magnety ze vzácných zemin, magneticky tvrdé ferity, AlNiCo magnety, plastem pojené magnety, výroba permanentních magnetů, testování permanentních magnetů.

Abstract

The bachelor thesis presents the distribution of the basic types of the permanent magnets and their commonest representatives, it describes their properties, crystal structure, their industrial production principles and methods of their testing. It contains also the results and evaluations of the several simulations to confirm the effectiveness of using different pole pieces in magnetic circuits for magnetic clamping systems used for clamping ferromagnetic objects.

Key words

Permanent magnets, magnetic field, magnetics, rare-earth magnets, ferrite magnets, AlNiCo magnets, plastic-bonded magnets, production of permanent magnets, testing of the permanent magnets.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 23. 5. 2016

Martin Vinš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Světlíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 MAGNETICKÉ POLE	12
1.1 Hlavní fyzikální veličiny k problematice magnetických polí	12
1.2 Magnetický moment v látkách neprotékaných elektrickým proudem.....	13
1.2.1 Rozdělení magnetik	14
1.2.1.1 Izotropní, anizotropní magnety a některé způsoby magnetování.....	15
1.2.1.2 Póly permanentního magnetu	16
1.2.1.3 Magnetické materiály v praxi a metody jejich porovnávání.....	17
2 DRUHY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ A JEJICH VLASTNOSTI	19
2.1 PERMANENTNÍ MAGNETY NA BÁZI MAGNETICKY TVRDÝCH FERITŮ.....	19
2.1.1 Krystalické vlastnosti	19
2.1.1.1 Strontnaté ferity	19
2.1.1.2 Barnaté ferity	19
2.1.2 Chemické vlastnosti	20
2.1.3 Mechanické vlastnosti	20
2.1.3 Teplotní vlastnosti.....	20
2.2 PERMANENTNÍ MAGNETY NA BÁZI VZÁCNÝCH ZEMIN.....	21
2.2.1 Krystalické vlastnosti	21
2.2.1.1 Krystal SmCo_5	21
2.2.1.2 Krystal $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	22
2.2.1.3 Krystal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	22
2.1.2 Chemické vlastnosti	23
2.1.3 Mechanické vlastnosti.....	23
2.1.3 Teplotní vlastnosti.....	23
2.3 PERMANENTNÍ MAGNETY NA BÁZI ALNiCo	24
3 PRŮMYSLOVÁ VÝROBA PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	25
3.1 VÝROBA MAGNETICKY TVRDÝCH FERITŮ	25
3.2 VÝROBA MAGNETŮ ZE VZÁCNÝCH ZEMIN.....	27
3.3 VÝROBA MAGNETŮ ALNiCo	32
3.3.1 Sintrované magnety AlNiCo.....	32
3.3.2 Odlévané magnety AlNiCo.....	33
3.4 VÝROBA PLASTEM POJENÝCH MAGNETŮ	34
3.4.1 Lisované plastem pojené magnety.....	36
3.4.2 Vstříkované plastem pojené magnety.....	36
3.5 SROVNÁNÍ DEMAGNETIZAČNÍCH CHARAKTERISTIK MAGNETŮ.....	37
4 TESTOVÁNÍ A KONTROLA PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	38
4.1 KONTROLA INTENZITY MAGNETICKÉ INDUKCE.....	38
4.2 KONTROLA HELMHOLTZOVOU CÍVKOU	38
4.3 VYKRESLENÍ HYSTEREZNÍ SMYČKY (DEMAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKY)	39
4.4 KONTROLA FLUXMETREM.....	39
4.5 MAPOVÁNÍ MAGNETICKÝCH SILOČAR.....	40
4.6 KONTROLA PŘÍDRŽNÉ SÍLY	40
4.7 OSTATNÍ ZKOUŠKY	42
4.7.1 Toxikologické testy.....	42
4.7.2 Testy chemické odolnosti	42

4.7.3	Testy mechanické odolnosti	43	
4.7.4	Zkoušky rozměrů	43	
4.7.5	Teplotní testy.....	44	
5 SIMULACE MAGNETICKÝCH OBVODŮ S RŮZNÝMI PÓLOVÝMI NÁSTAVCI PRO			
MAGNETICKÉ UPÍNACÍ SYSTÉMY			46
5.1	ÚVOD K SIMULACÍM	46	
5.2	OTEVŘENÝ MAGNETICKÝ OBVOD (BEZ PÓLOVÝCH NÁSTAVCŮ).....	47	
5.3	MAGNETICKÝ OBVOD S PÓLOVÝM NÁSTAVCEM NA MAGNETU	47	
5.4	MAGNETICKÝ OBVOD S PÓLOVÝM NÁSTAVCEM KOLEM MAGNETU.....	48	
5.5	MAGNETICKÝ OBVOD S PÓLOVÝMI NÁSTAVCI NA MAGNETU I KOLEM MAGNETU	48	
ZÁVĚR			49
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ			50
PŘÍLOHY			1

Seznam symbolů a zkratk

A	Průřez pólu permanentního magnetu [m^2]
B	Magnetická indukce [T]
B_m	Maximální indukce [T]
B_r	Remanentní indukce [T]
$(BH)_{MAX}$	Maximální energetický součin [J / m^3]
F	Přídržná (odpudivá) síla [N]
H	Intenzita magnetického pole [A / m]
H_c	Koercitivní intenzita [A / m]
H_s	Intenzita nasycení [A / m]
I	Elektrický proud [A]
M	Magnetizace [A / m]
M_s	Nasycená magnetizace [A / m]
N	Počet závitů cívky [z]
$N(S)$	Severní pól magnetu
$S(J)$	Jižní pól magnetu
T	Teplota [K]
T_c	Kritická (Curieova) teplota [K]
Φ	Magnetický (indukční) tok [Wb]
μ	Absolutní permeabilita [H / m]
μ_r	Relativní permeabilita [$-$]
μ_0	Permeabilita vakua

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na rozdělení jednotlivých druhů permanentních magnetů, jejich vlastnosti, krystalické struktury, principy jejich průmyslové výroby a způsoby testování. Obsahuje také výsledky a vyhodnocení několika simulací použití různých pólových nástavců pro aplikaci v magnetických obvodech magnetických upínacích systémů.

Text je rozdělen do pěti částí; první se zabývá problematikou magnetického pole a magnetického momentu v souvislosti s permanentními magnety. Druhá část popisuje složení a chemické vazby a vlastnosti nejběžnějších zástupců z každé skupiny permanentních magnetů. Třetí část se zabývá průmyslovou výrobou těchto permanentních magnetů a plastem pojených magnetů. Čtvrtá část se zabývá jednotlivými nejběžnějšími metodami testování a kontroly permanentních magnetů od magnetických až po mechanické zkoušky. Pátá část obsahuje výsledky a vyhodnocení několika simulací vytvořených ve výpočetním programu Agros2D, které popisují problematiku použití různých pólových nástavců v magnetických obvodech magnetických upínacích systémů.

1 Magnetické pole

Magnetické pole je fyzikální pole, jež je vyvoláno pohybujícím se elektrickým nábojem. Objevuje se tedy kolem elektrických vodičů protékaných elektrickým proudem, kde je magnetický moment vyvolán uspořádaným tokem elektronů a některých látek neprotékaných elektrickým proudem, kde je magnetický moment vyvolán tzv. vázanými elektrickými proudy (náboje jsou vázány přímo na částice v mikroskopické struktuře látky). Může být také vyvoláno změnami elektrického pole.[1]

1.1 Hlavní fyzikální veličiny k problematice magnetických polí

Intenzita magnetického pole (\mathbf{H}) je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje intenzitu silového působení vnějšího magnetického pole, je nezávislá na prostředí. V soustavě jednotek SI se pro její vyjádření používá jednotka ampér na metr, značka [A/m]. [1]

Magnetická indukce (\mathbf{B}) je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje intenzitu silového působení magnetického pole na částice s magnetickým momentem, je závislá na prostředí prostřednictvím absolutní permeability. V soustavě jednotek SI se pro její vyjádření používá jednotka tesla, značka [T]. [1]

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad [\text{T}; \text{H/m}, \text{A/m}] \quad (1.1)$$

Magnetický indukční tok (Φ) je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje celkový tok magnetické indukce procházející danou souvislou plochou. V soustavě jednotek SI se pro jeho vyjádření používá jednotka weber, značka [Wb]. [1]

Permeabilita vakua (μ_0) je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje magnetickou „vodivost“ vakua, je konstantní. V soustavě jednotek SI se pro její vyjádření používá jednotka henry na metr, značka [H/m]. [1]

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{H/m}] \quad (1.2)$$

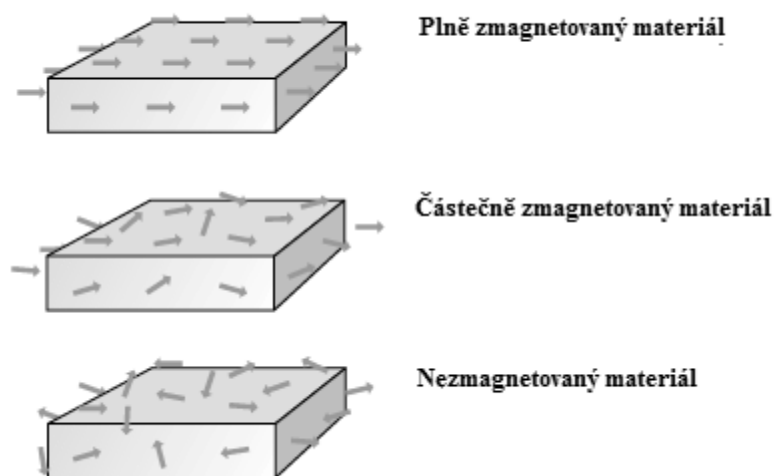
Relativní permeabilita (μ_r) je bezrozměrná skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje magnetickou „vodivost“ prostředí, konkrétně kolikrát je toto prostředí lepším magnetickým „vodičem“ než vakuum. [1]

Absolutní permeabilita (μ) je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje skutečnou magnetickou „vodivost“ prostředí a je závislá na velikosti relativní permeability prostředí. Při působení magnetické intenzity (H), která je na prostředí nezávislá dojde buď k zesílení, nebo zeslabení výsledného pole v materiálu. V soustavě SI se pro její vyjádření používá jednotka henry na metr, značka [H/m]. [1]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad [\text{H/m}; \text{H/m}, -] \quad (1.3)$$

1.2 Magnetický moment v látkách neprotékaných elektrickým proudem

Volné nosiče elektrického náboje (elektrony) se pohybují v obalu atomů hmoty (spinová rotace a oběh kolem jádra). Tímto pohybem způsobují vznik elementárních magnetických momentů. Při nahodilé orientaci těchto momentů dochází k jejich „vykompenzování“ a daná látka ve svém okolí nevytváří magnetické pole. Naopak, čím více magnetických momentů je orientováno souhlasně, tím je daná látka silnějším zdrojem magnetického pole. Zmagnetování (přestavení elementárních magnetických momentů do stejného směru) vzniká za působení vnějšího magnetického pole. Toto pole má vliv na pohyb elektronů a tím mění orientaci jejich magnetických momentů. Po zániku vnějšího magnetického pole se obnoví nahodilost magnetických momentů a látka bude nemagnetická, nebo se původní stav neobnoví úplně a látka zůstává více či méně zmagnetovaná. Podle reakce na působení vnějšího magnetického pole můžeme látky (tzv. magnetika) dělit do několika skupin. [1]



Obr. 1: Zobrazení magnetických momentů v různých stádiích zmagnetování (upraveno z [7])

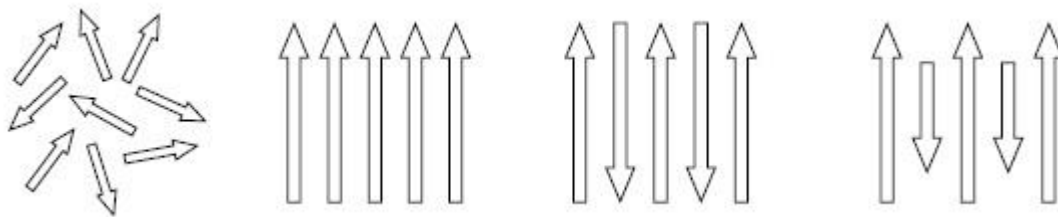
1.2.1 Rozdělení magnetik

Intenzita magnetického pole není ovlivněna okolním prostředím, díky čemuž se bude v závislosti na prostředí měnit pouze magnetické indukce (toto je charakterizováno absolutní permeabilitou materiálu). Protože absolutní permeabilita (μ) je součinem relativní permeability materiálu (μ_r) a permeability vakua (μ_0), která je konstantou, můžeme magnetika rozdělit do příslušných skupin podle velikosti jejich relativní permeability. [1]

Diamagnetika ($\mu_r < 1$) – při působení vnějšího magnetického pole na diamagnetickou látku dochází uvnitř látky k jeho zeslabování. Mezi diamagnetické látky patří např. měď, zinek, olovo, zlato, stříbro, voda, inertní plyny a další látky. [1]

Paramagnetika ($\mu_r > 1$) – při působení vnějšího magnetického pole na paramagnetickou látku dochází uvnitř látky k jeho mírnému zesilování, paramagnetika jsou také vnějším magnetickým polem přitahována, avšak při jeho zaniknutí nedokáží magnetismus udržet. Mezi paramagnetika patří např. kovy vzácných zemin, vzduch, hliník, platina, titan a další látky. [1]

Feromagnetika ($\mu_r \gg 1$) – při působení vnějšího magnetického pole na feromagnetickou látku dochází uvnitř látky k jeho značnému zesílení. Jsou to v podstatě paramagnetické látky, které obsahují v původním stavu tzv. magnetické domény (oblasti se shodnou orientací magnetických momentů), jejichž výsledné magnetické momenty jsou orientovány náhodně („vykompenzovávají se“), čímž je výsledný magnetický moment feromagnetika nulový. V magnetickém poli se přeorientovávají celé magnetické domény, což způsobuje toto jeho značné zesílení a obvykle i trvalé zmagnetování feromagnetika. Mezi feromagnetika patří např. železo, kobalt, nikl a další látky. Striktně řečeno je feromagnetikum látkou, ve které přispívají všechny magnetické momenty pozitivně k celkové magnetizaci. V tomto podrobnějším rozboru rozlišujeme dále látky **ferimagnetické** (magnetické momenty jsou střídavě uspořádané a nejsou stejně velké, některé momenty tedy snižují celkovou magnetizaci) a **antiferomagnetické** (magnetické momenty jsou stejně velké a uspořádané střídavě, celková magnetizace je nulová i přes magnetické uspořádání). [1]



Obr. 2: Uspořádání mag. momentů - zleva: paramagnetikum, feromagnetikum, antiferomagnetikum a ferimagnetikum [1]

Zmagnetováním feromagnetika, popř. ferimagnetika docílíme vzniku magnetu (materiálu s jasně definovanými severními a jižními póly), který vykazuje vlastní magnetické pole i po odebrání vnějšího magnetického pole. Základním magnetem je magnetický dipól (magnet obsahující jeden severní a jeden jižní pól, např. tyčový magnet). [1]

1.2.1.1 Izotropní, anizotropní magnety a některé způsoby magnetování

Izotropní magnety jak název napovídá, vykazují takřka v každém směru totožné magnetické vlastnosti. Jejich výroba probíhá bez vystavení magnetickému poli, díky čemuž se mohou zmagnetovat v libovolném směru (nemají přednostní osu magnetizace). Obvykle jsou díky způsobu výroby levnější než anizotropní magnety. [1]

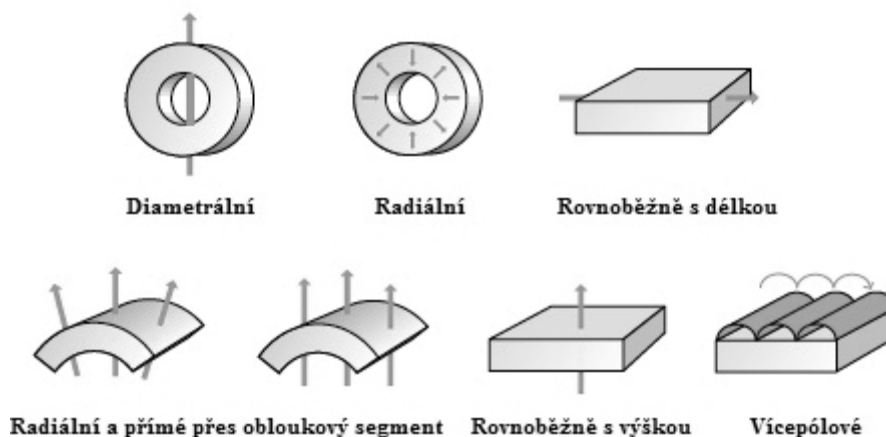
Anizotropní magnety oproti izotropním vykazují magnetické vlastnosti jen v jednom směru. Jejich výroba (lisování) probíhá za působení magnetického pole, které určuje výslednou magnetickou orientaci. Takový magnet už nelze orientovat jinak než v této přednostní ose magnetizace. [1]

Přednostní osa magnetizace je uspořádání magneticky tvrdých krystalů materiálu do konkrétního směru, ve kterém bude magnet vykazovat nejlepší magnetické vlastnosti. Vzniká během výroby (lisování) vystavením materiálu silnému magnetickému poli. [1]

Axiální magnety patří mezi anizotropní, jsou zejména kruhové, válcové a hranolové magnety s osou magnetizace procházející výškou. [1]

Diametrální magnety patří opět mezi anizotropní, většinou bývají také kruhové a válcové. Jedná se o magnety pro zvláštní použití, kdy je osa rotace kolmá k ose magnetizace. [1]

Pólově orientované magnety mají uspořádané osy magnetizace tak, aby mohlo dojít k následné vícepólové magnetizaci. [1]



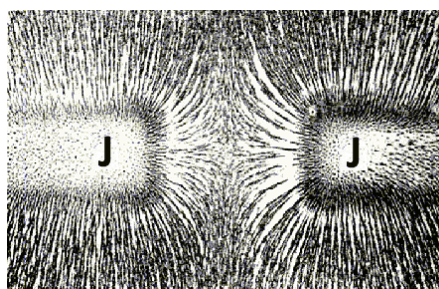
Obr. 3: Příklady různých typů magnetizací (upraveno z [7])

1.2.1.2 Póly permanentního magnetu

Severní pól je mezinárodně označován písmenem „N“ (z angl. North), v české literatuře bývá někdy označován písmenem „S“. Dohodou mezinárodní konference bylo stanoveno, že siločáry magnetického pole vystupují z magnetu v místě severního pólu. Obvykle bývá kromě písmena označen také červeným pruhem. [1]

Jižní pól je mezinárodně označován písmenem „S“ (z angl. South), v české literatuře bývá někdy označován písmenem „J“. Dohodou mezinárodní konference bylo stanoveno, že se siločáry vrací do magnetu v místě jižního pólu. Obvykle bývá kromě písmena bez barevného označení, může být označen navíc modrým pruhem. [1]

Siločáry magnetického pole se uzavírají přes vnitřek magnetu a tvoří tak vírové pole. Přitom platí, že opačné póly magnetu se přitahují a stejné odpuzují. [1]



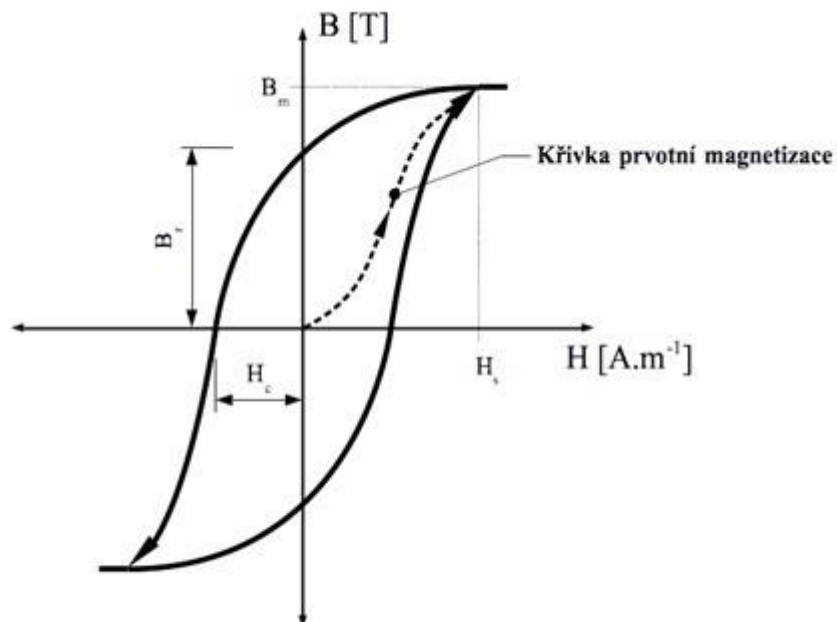
Obr. 4: Zobrazení siločar magnetického pole v železných pilinách u odpuzujících se pólů magnetu [2]

1.2.1.3 Magnetické materiály v praxi a metody jejich porovnávání

Magnetické materiály nejsou ideální, v průmyslové praxi bývají silně nelineárně závislé na intenzitě magnetického pole (H). Grafické zobrazení se tak jeví jako nejlepší z hlediska srovnání a znázornění magnetických vlastností jednotlivých druhů feromagnetických materiálů. Využíváme zobrazení křivky prvotní magnetizace a hysterezní smyčky. [1]

Křivka prvotní magnetizace graficky vyjadřuje prvotní „zmagnetování“ dříve nemagnetického materiálu. Je charakterizována nelineárně měnící se hodnotou magnetické indukce (B) v materiálu v závislosti na lineárně se měnící intenzitě magnetického pole (H) působící na magnetický materiál. [1]

Hysterezní smyčka je podobně jako křivka prvotní magnetizace grafickým vyjádřením nelineárně měnící se hodnoty magnetické indukce (B) v materiálu v závislosti na lineárně se měnící hodnotě magnetické intenzity (H) působící na materiál při plynulé střídavé magnetizaci, tedy změně od záporných hodnot H až po kladné hodnoty H . Získá se vykonáním jednoho magnetizačního cyklu. Pro magneticky tvrdé materiály jako jsou magneticky tvrdé ferity je široká, naopak pro magneticky měkké materiály jako jsou magneticky měkké ferity úzká. [1]



Obr. 5: Hysterezní smyčka s naznačenou křivkou prvotní magnetizace, koercitivní intenzitou a remanentní indukcí, maximální indukci a intenzitou nasycení [3]

Dále se budeme zabývat pouze tzv. demagnetizační křivkou, což je část hysterezní smyčky nacházející se v druhém kvadrantu. Nejdůležitějšími hodnotami pro popsání permanentního magnetu (resp. materiálu, ze kterého je permanentní magnet vyroben) pro nás budou remanentní (zbytková) indukce (B_r) při $H = 0$, koercitivní intenzita (H_c) při které je indukce právě nulová a maximální energetický součinitel, který je roven součinu H_s a B_m . [1]

$$(\mathbf{BH})_{\max} = \mathbf{B}_m \cdot \mathbf{H}_s \quad [\text{J/m}^3; \text{T}, \text{A/m}] \quad (1.4)$$

Demagnetizační charakteristiky pro magnetické materiály se značně liší. Jejich měření vychází z vložení testovaného materiálu do silného magnetického pole, které způsobuje změny magnetického momentu („přestavení“ elementárních momentů). Docílí se tak dosažení hodnoty maximálního energetického toku charakterizovaného maximálním energetickým součinitelem $(\mathbf{BH})_{\max}$ pro daný materiál. Je změřen poměr magnetických vlastností materiálu při jeho konkrétním objemu. Čím vyšší je hodnota maximálního energetického toku, tím mechanicky menší může být vlastní magnet navrhovaný pro daný konkrétní účel. Jak bylo řečeno, magnetické materiály nejsou ideální a dochází k určitým kusovým odchylkám, proto jsou v normě DIN IEC 60404-0-1 (dříve DIN 17 410) uvedeny minimální hodnoty koercitivní intenzity (H_c) řádově v [kA/m] a maximálního energetického součinu $(\mathbf{BH})_{\max}$. [1]

2 Druhy permanentních magnetů a jejich vlastnosti

2.1 Permanentní magnety na bázi magneticky tvrdých feritů

Jsou v současnosti stále nejlevnější a nejpoužívanější permanentní magnety, vyrábějí se z relativně dobře dostupných a levných surovin. Dochází u nich k neustálému vývoji a zlepšování vlastností. Patří mezi ferimagnetika, u kterých je magnetická osa výsledné magnetizace kolmá k základní ploše. Nejběžnějšími jsou ferit barnatý a ferit strontnatý. Skládají se ze zhruba 86% Fe_2O_3 (oxid železitý) a 14% BaO, popř. SrO (oxidy baria, popř. stroncia) a mají stejnou krystalovou strukturu. Mohou být jak izotropní, tak anizotropní. [1]

2.1.1 Krystalické vlastnosti

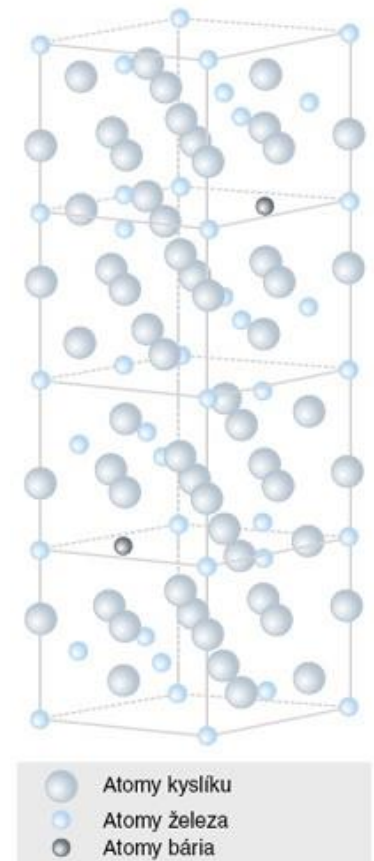
2.1.1.1 Strontnaté ferity

Stále větší měrou používanou skupinou permanentních magnetů. Chemický vzorec je $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Na rozdíl od barnatých feritů mají vysokou koercitivitu. [1]

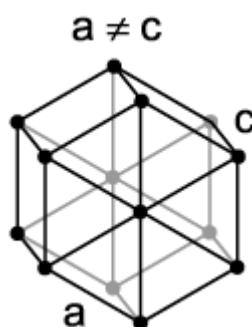
2.1.1.2 Barnaté ferity

Nejpoužívanější skupina magneticky tvrdých feritů. Chemický vzorec je $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. Krystalická buňka barnatého i strontnatého feritu má hexagonální strukturu a obsahuje 2 molekuly ($=2 \cdot 34$ atomů), dochází k umístění dvou atomů baria, nebo stroncia na místa atomů kyslíku. Krystalická mřížka je velmi dlouhá v ose c, při rozměrech $a = 0,588\text{nm}$, $c = 2,32\text{nm}$. [1]

Hexagonální (šesterečná) struktura - $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$; $a \neq c$. Ačkoli to z obrázku 6 není jasně patrné má krystal pravidelnou šestibokou základnu tvořenou atomy kyslíku (rozměr a, při pomyslném otočení obrázku 6 o 90°), mezi kterými je úhel γ . Úhly α a β jsou úhly podél obou stran výšky a podstavy (je patrné, že výška je na základnu kolmá). Velká výška c oproti délce strany základny je u této struktury relativně neobvyklá. [11]



Obr. 6: Krystalická buňka barnatého feritu, pro strontnatý ferit by byly atomy baria nahrazeny atomy stroncia při zachování stejné struktury [1]



Obr. 7: Schématické znázornění hexagonální struktury (upraveno z [11])

2.1.2 Chemické vlastnosti

Všechny typy feritových magnetů se vyznačují dobrou odolností vůči různým typům chemikálií (ředidla, hydroxidy, slabé kyseliny). Pokud jde o silnější kyseliny organické i anorganické (sírové, chlorovodíkové, atd.), je odolnost určena dobou vystavení kyselině a její koncentrací. K tomuto účelu se provádějí chemické testy (viz. 4.7.2). [1]

2.1.3 Mechanické vlastnosti

Ferity jsou keramické materiály, jsou tedy tvrdé a křehké. Proto jsou velmi citlivé na náraz a ohyb (patrné z Tab. 1). [1]

Tab. 1: Přibližné hodnoty některých mechanických vlastností feritových magnetů [1]

Tvrdost [Mohs]	6÷7
Modul pružnosti [kN/mm ²]	150
Pevnost v tlaku [N/mm ²]	700
Pevnost v tahu [N/mm ²]	50
Pevnost v ohybu [N/mm ²]	55

2.1.4 Teplotní vlastnosti

S rostoucí teplotou klesá u feritů remanentní indukce o 0,2% na 1°C a hodnota koercitivní intenzity roste o 0,3% / 1°C. S klesající teplotou zůstávají procentuální hodnoty stejné, ale klesá koercitivní intenzita a roste remanentní indukce. Vzniká tak riziko vystavování magnetických systémů s feritovými magnety nízkým teplotám, kdy by mohly trvale ztratit magnetování. [1]

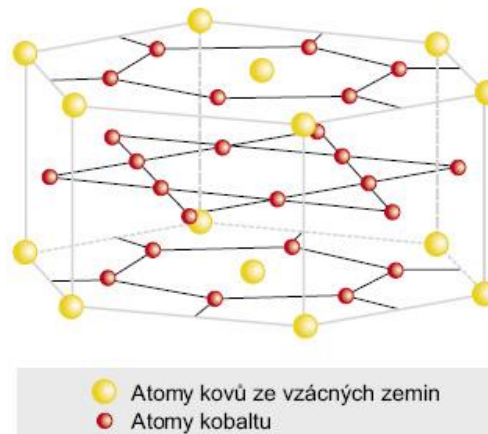
2.2 Permanentní magnety na bázi vzácných zemin

Jedná se o především samarium kobaltové (SmCo) a neodymové (NdFeB) magnety, kterými se budeme dále zabývat. V objemovém a hmotnostním měřítku to jsou nejsilnější vyrobitelné permanentní magnety. Skládají se vždy ze vzácné zeminy (Sm, Nd) a přechodového kovu (Co, Fe), čímž vznikají 3 nejběžnější alternativy: SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. [1]

2.2.1 Krystalické vlastnosti

2.2.1.1 Krystal SmCo_5

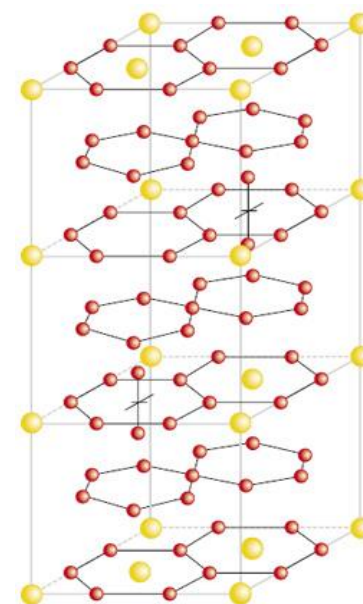
Jedná se o základní krystalický typ permanentních magnetů na bázi vzácných zemin s přechodným kovem. Krystalická buňka má hexagonální strukturu s mřížkovými parametry, $a=0,5004\text{nm}$ a $c = 0,3964\text{nm}$. Atomy kobaltu i samaria v ní tvoří své vlastní hexagonální podmřížky. Prioritní magnetizační osa je kolmá k základní ploše. [1]



Obr. 8: Krystalická buňka SmCo_5 s patrnou hlavní hexagonální strukturou i podmřížkami [1]

2.2.1.2 Krystal $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

Krystalická buňka má jednopětinovou krystalovou mřížku, kde dochází k nahrazování jedné třetiny atomů samaria páry atomů kobaltu. Dochází ke vzniku rombické popř. hexagonální krystalové mřížky (rozdíl je v teplotě při uspořádávání mřížky; transformační teplota je zhruba 1300°C , při překročení této teploty vznikne hexagonální mřížka a při nižší teplotě rombická). Parametry hexagonální krystalické mřížky jsou $a=0,8360\text{nm}$ a $c=0,8515\text{nm}$. Prioritní magnetizační osa je kolmá k základní ploše. [1]



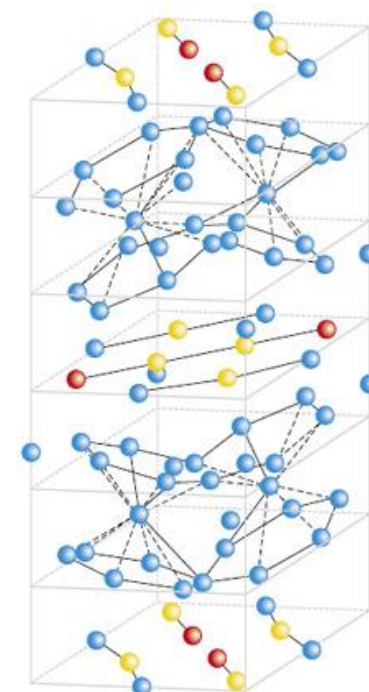
● Atomy kovu ze vzácných zemin
● Atomy kobaltu

Obr. 9: Krystalická buňka $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ s patrnou hexagonální mřížkou [1]

2.2.1.3 Krystal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

Krystalická buňka má tetragonální strukturu. Skládá se z 68 atomů tvořící tetragonální krystalickou mřížku, kde železné atomy vytvářejí hexagonální spoje. Parametry krystalické mřížky jsou $a=0,880\text{nm}$ a $c=1,219\text{nm}$. Prioritní magnetizační osa je rovnoběžná s osou c a kolmá k základní ploše. [1]

Tetragonální (čtverečná) struktura - $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$; $a \neq c$. Všechny osy jsou navzájem kolmé, podstavu buňky tvoří čtverec. [11]



● Atomy neodymu
● Atomy železa
● Atomy bóru

Obr. 10: Krystalická buňka $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ s patrnými hexagonálními spoji tvořenými železnými atomy [1]

2.2.2 Chemické vlastnosti

Všechny typy magnetů na bázi vzácných zemin se považují za kovové materiály. Mají proto podobné vlastnosti jako kovy (např. kovový lesk po opracování). Jsou náchylné ke korozi, SmCo magnety oxidují pouze na povrchu, zatímco NdFeB magnety se ve vlhké atmosféře pomalu rozpouštějí. [1]

2.2.3 Mechanické vlastnosti

Podobně jako feritové magnety se i permanentní magnety na bázi vzácných zemin opracovávají diamantovým nářadím, protože jsou velmi tvrdé. Nejkřehčí je $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ u kterého se i při menších nárazech může odštipovat povrchová vrstva. Hustoty se pohybují v rozmezí $7,5 \div 8,5 \text{ g/cm}^3$ ($7,5 \text{ g/cm}^3$ pro NdFeB a $8,5 \text{ g/cm}^3$ SmCo), což spadá do oblasti ocelí. [1]

2.2.4 Teplotní vlastnosti

S rostoucí teplotou klesá u NdFeB magnetů remanentní indukce o $0,08 \div 0,13\%$ na 1°C , u SmCo magnetů je tento pokles asi pouze $0,04\%$ (jsou teplotně stálejší). [1]

2.3 Permanentní magnety na bázi AlNiCo

Velmi silné permanentní magnety, které překonávají pouze magnety ze vzácných zemin. Jak název napovídá, jsou složeny ze tří prvků: hliníku (Al), niklu (Ni) a kobaltu (Co) a příměsí jako měď (Cu) a titan (Ti). Obvyklé složení je 8-12% Al, 15-26% Ni, 5-24% Co, do 6% Cu, do 1% Ti a zbytek je vyplněn železem. Některé typy jsou izotropní, jiné anizotropní. Obecně lze říci, že anizotropní AlNiCo magnety mají lepší magnetické vlastnosti než izotropní magnety ve zvoleném směru. Nejvhodnější použití je v uzavřeném magnetickém obvodu, kde mohou vydávat poměrně značný magnetický tok, protože jinak mají poměrně malou odolnost proti odmagnetování. [8]

Jsou to jediné magnety, které si zachovávají využitelné magnetické vlastnosti i v rozžhaveném stavu, jsou elektricky vodivé a při správném použití se jedná o nejstabilnější magnety. Jsou dobře odolné proti korozi, kyselinám, rozpouštědlům a mají vysoké maximální pracovní teploty. S rostoucí teplotou klesá remanentní indukce asi jen o 0,02% / 1°C. Vyrábějí se spékáním i odléváním (více o vlastnostech obou typů v 3.3.1 a 3.3.2). [8]

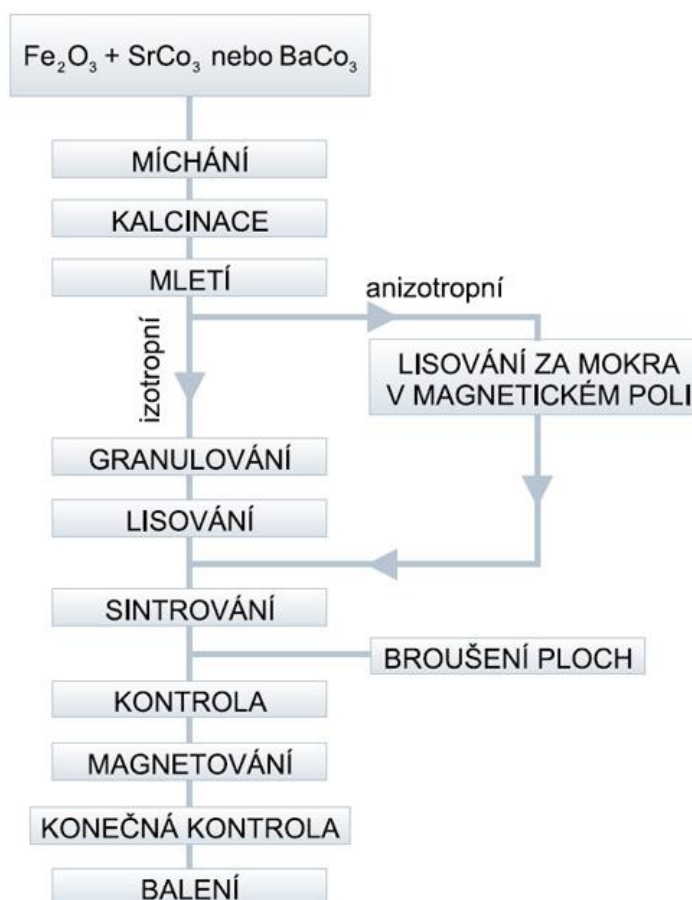
Bývají obvykle označovány čísly (AlNiCo 3, AlNiCo 5, ...), kde číslo označuje typické chemické složení a magnetické vlastnosti. Typová čísla nemají přímý vztah k magnetu, takže např. vyšší číslo nemusí znamenat silnější magnet. [8]

Tab. 2: Srovnání některých typů AlNiCo magnetů na základě jejich chemického složení a H_c [5]

Typ	Al [%]	Ni [%]	Co [%]	Cu [%]	Ti [%]	H_c [kA/m]
AlNiCo 1	12	21	5	3	-	38
AlNiCo 2	10	19	13	3	-	45
AlNiCo 3	12	25	-	3	-	40
AlNiCo 5	8	14	24	3	-	48
AlNiCo 6	8	16	24	3	-	63
AlNiCo 8	7	15	35	4	5	132
AlNiCo 9	7	15	35	4	5	120

3 Průmyslová výroba permanentních magnetů

3.1 Výroba magneticky tvrdých feritů



Obr. 11: Blokové schéma výroby feritového magnetu [1]

Z blokového schématu je patrné, že feritové magnety jsou karbidy (keramické materiály). Vzhledem k tomu jsou relativně odolné vůči ředidlům, kyselinám a různým chemikáliím, ale jsou také křehké a citlivé na mechanické namáhání. Při úpravách tvaru již vyrobeného magnetu je třeba použít diamantové nástroje. Následuje podrobnější popis jednotlivých bloků výroby. [1]

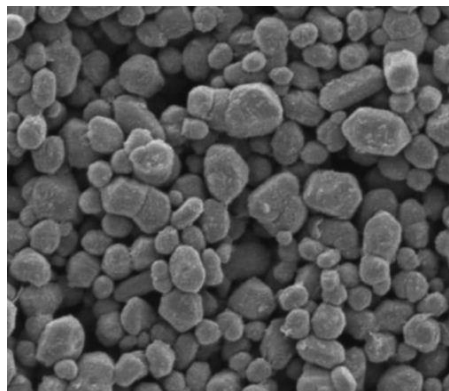
Míchání – Pro výrobu magneticky tvrdých feritů je zapotřebí dvou základních složek, zřejmě Fe_2O_3 (oxid železitý) a BaCO_3 , popř. SrCO_3 (oxidy baria, popř. stroncia), přičemž dojde k jejich promísení v poměru zhruba 80% Fe_2O_3 a 20% BaCO_3 , popř. SrCO_3 . [1]

Kalcinace – Zahřátí promíchané směsi na vysoké teploty (1000-1350°C) za omezeného přístupu vzduchu (kyslíku), kdy dojde k jejímu chemickému rozkladu (termolýze) a vzniká

hexaferit. V této fázi je také možno přidat další prvky jako kobalt, nebo lanthan pro zlepšení magnetických vlastností. [1]

Mletí – Během kalcinace může dojít ke vzniku „hrudek“, proto je nutno materiál rozemlít. [1]

Lisování za mokra v mag. poli, granulování a lisování – Pro vznik anizotropního magnetu je nutno, aby byla prášková směs lisována v magnetickém poli a došlo tak k „přestavení“ magnetických momentů do jednoho směru. Pro tento účel je nejvhodnější směs vodní suspenze (lisování za mokra). Pro vznik izotropního magnetu bez lisování v magnetickém poli postačuje lisování za sucha (prášek a pojivo), kterému předchází granulování (vytvoření homogenních zrn o průměrné velikosti několik mikrometrů). [1]



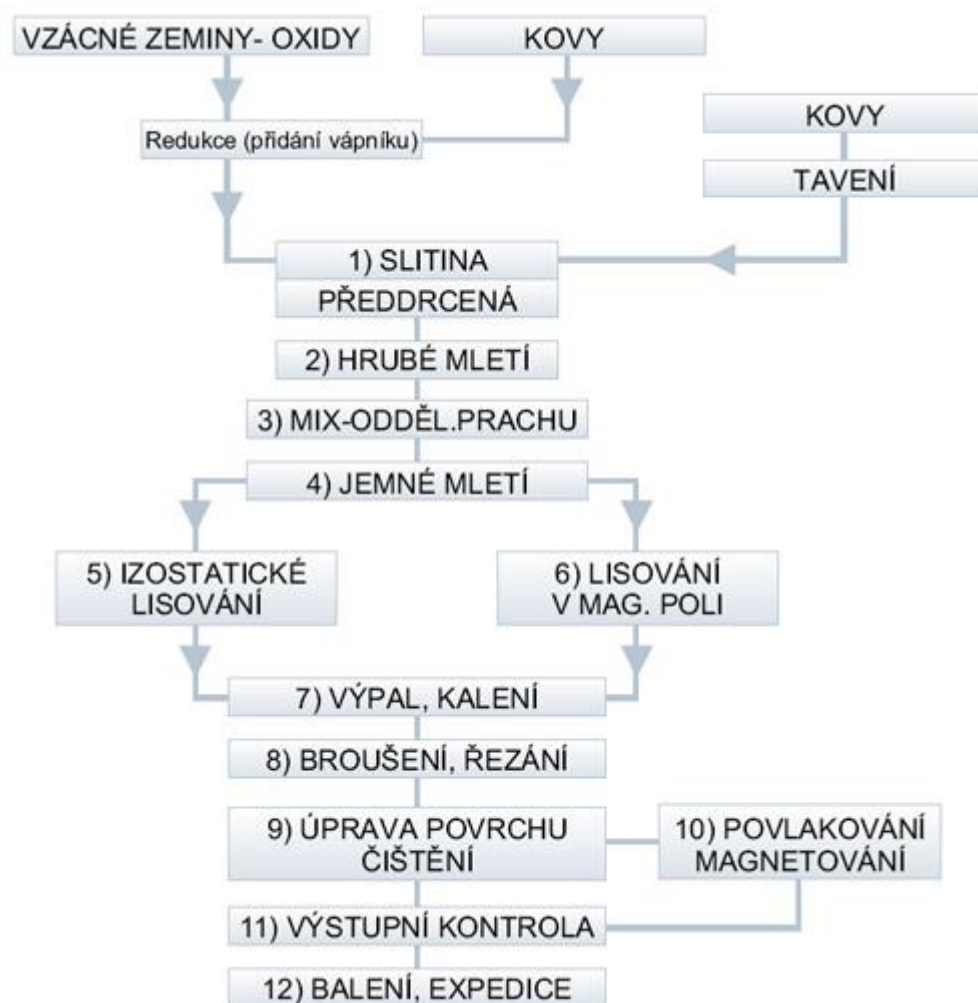
Obr. 12: Skutečné krystaly strontnatého feritu před lisováním o velikosti zhruba 60nm [4]

Sintrování – Vypálení vylisku požadovaného tvaru a velikosti pro dosažení vyšší pevnosti. Probíhá při teplotách přes 1200 °C. [1]

Magnetování – Vystavení magnetu vnějšímu magnetickému poli a jeho následnému trvalému zmagnetování v požadovaném směru dle konkrétních požadavků. [1]

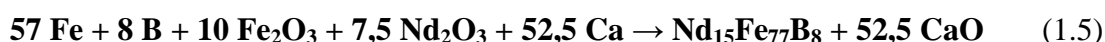
Kontrola a konečná kontrola – Souvisí s testováním, kterému je věnována samostatná kapitola (viz 4.).

3.2 Výroba magnetů ze vzácných zemin



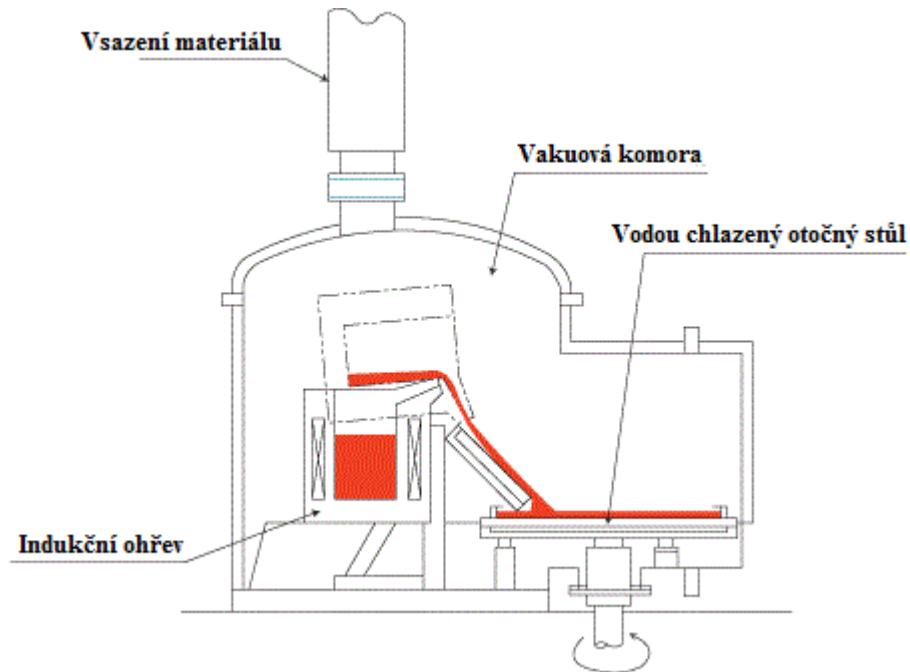
Obr. 13: Blokové schéma výroby magnetu ze vzácných zemin [1]

Stejně jako feritové magnety jsou i magnety ze vzácných zemin karbidy. Jsou tedy stejně tvrdé a křehké, ale z hlediska chemických vlastností jsou jako kovy náchylné ke korozi, která se ještě zvyšuje při vyšších teplotách. Jak bylo řečeno, magnety ze vzácných zemin se skládají z kovu vzácné zeminy (Sm, Nd) a přechodového kovu (Co, Fe). Přechodový kov a vzácná zemina se smísí během redukční reakce za přidání vápníku. Vyčíslení chemické reakce pro $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ je:



V praxi může být ale skutečná reakce složitější. Je zřejmé, že je výsledná sloučenina rozdílná od $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, což je způsobeno vytvrzováním magnetickým polem během lisování. Je možno také upravit konkrétní vlastnosti magnetu přidáním příměsí, nebo upravením

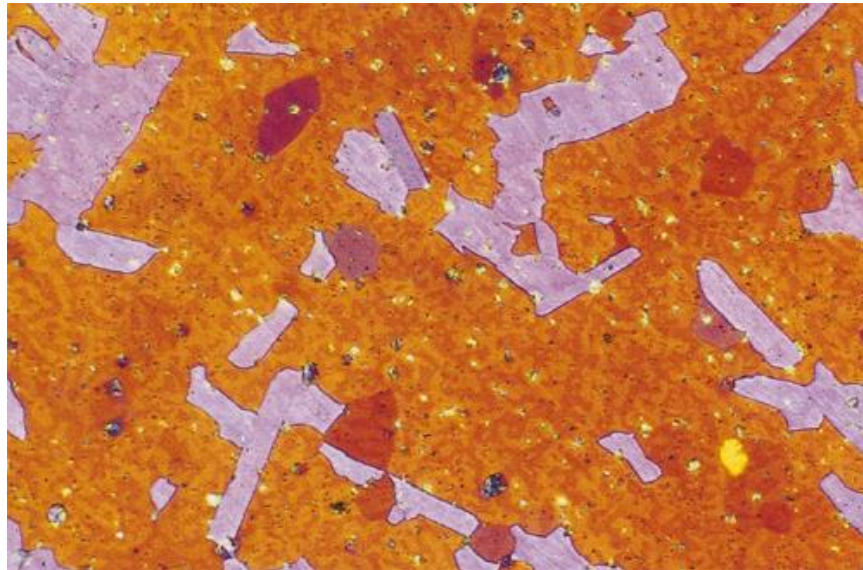
množství základních materiálů (např. pokud je malé množství železa nahrazeno kobaltem dojde ke zvýšení kritické teploty, ale také snížení koercitivní intenzity). Tato chemická reakce probíhá v elektrické indukční peci ve vakuu, aby se předešlo vniku nečistot. [6]



Obr. 14: Principiální schéma vakuové indukční pece [12]

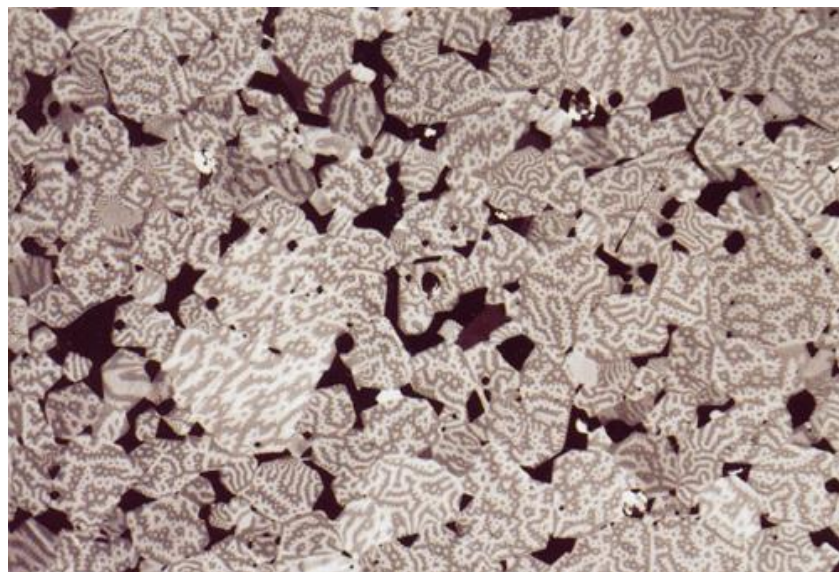
Předdrcená slitina, hrubé mletí, míchání odděleného prachu, jemné mletí –
Několikastupňové rozemlívání a promíchávání, kdy na konci projde prášek tryskovým rozemletím na velmi malá zrna o velikosti kolem 3 μ m. [6]

Izostatické lisování a lisování v magnetickém poli – Při izostatickém lisování je nutno koncový magnet vyříznout ze slisovaného prefabrikátu. Při lisování v magnetickém poli je prefabrikát vystaven příčnému (diametrálnímu) poli a vznikne tak tzv. H-prefabrikát, nebo je vystaven podélnému (axiálnímu) poli a vznikne tak tzv. W-prefabrikát. U obou typů prefabrikátů je takto dána přednostní osa magnetizace. Klíčové se jeví tzv. „nukleární vytvrzení“ (proces, při kterém se částice pravidelně uspořádají do krystalové mřížky a vytvoří tak magneticky tvrdé oblasti – domény), díky tomu se docílí vysoké magnetické tvrdosti u SmCo₅ a Nd₂Fe₁₄B magnetů, vyvolává se působením silného anizotropního pole. U každého typu magnetu na bázi vzácných zemin vzniká jiná strukturní stavba. [6]



Obr. 15: Strukturální stavba nukleárně vytvrzeného magnetu SmCo_5 (1000x zvětšeno) [1]

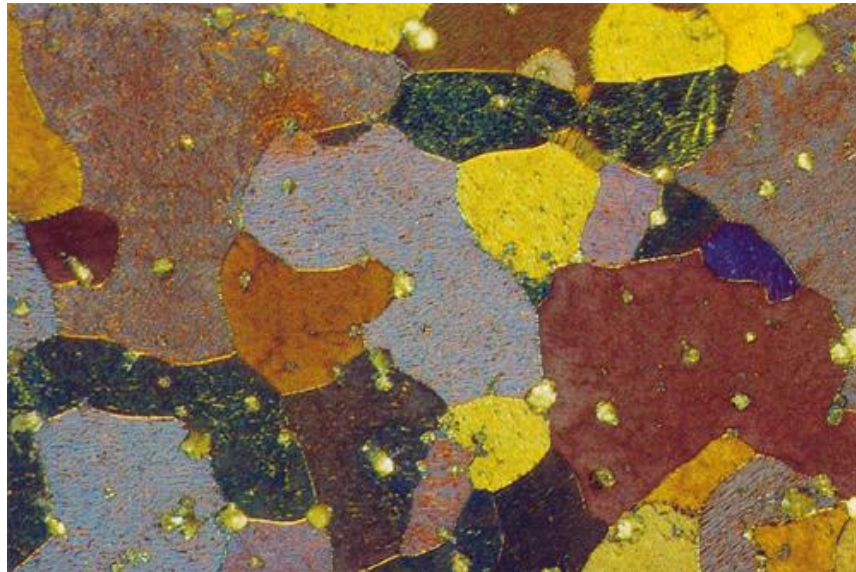
Ze strukturální stavby SmCo_5 jsou patrné dvě odlišné složky, Sm_2Co_7 (fialově) a SmCo_5 (hnědě). Zjednodušeně se dá říci, že magneticky tvrdá je pouze složka SmCo_5 , v materiálu zabírá jasnou většinu a zbylou složku lze považovat za výborní nedokonalost způsobenou vytvrzováním magnetickým polem. [1]



Obr. 16: Strukturální stavba nukleárně vytvrzeného magnetu $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (1000x zvětšeno) [1]

Ze strukturální stavby $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ jsou opět patrné dvě odlišné složky, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (domény) a takřka čistý neodym (černě). Magneticky tvrdá je jen složka $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, neodym tvoří nemagnetickou zrnitou mezní složku. Díky nehomogenní struktuře je také zřejmý rozdíl mezi počátečním materiálem (výsledkem redukční reakce při počátku výroby; $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$) a výsledným $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. [1]

Vypalování, kalení – Vypálení, následné mechanické vytvrzení vylisku magnetu při teplotách kolem 1080°C. Během této výrobní fáze dochází k magnetickému vytvrzování $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, jde o zvláštní typ magnetického vytvrzování tzv. „vytvzování vyloučeninou“. [6]



Obr. 17: Strukturální stavba vyloučeninou vytvrzeného magnetu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (1000x zvětšeno) [1]

U strukturální stavby $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ lze jasně vidět magneticky tvrdou složku $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (barevně). V tomto případě je vznik rozdílných barev způsoben leptáním. Mezi jednotlivými barevnými segmenty lze při bližším pohledu vidět jemnou mezní „vyloučenou“ složku s jiným složením (světle). Hlavní magneticky tvrdé oblasti jsou tedy odděleny těmito vyloučeninami. Jako vedlejší efekt vyloučeniny způsobují vyšší odezvu při prvotní magnetizaci, nebo přemagnetování. [1]

Broušení, řezání – Vypálené magnety jsou řezány diamantovými nástroji (z důvodu vysoké tvrdosti) do požadovaného tvaru a rozměru a následně přesně broušeny. Z důvodu vysoké ceny materiálu je prioritní omezení materiálových ztrát na minimum. Dosud nebyl vyvinut žádný recyklační mechanismus. [6]

Úprava povrchu, čištění a povlakování – Jedná se o velmi důležitou výrobní část, kde se povrch vyleští a zbaví nečistot. Kvůli vysoké náchylnosti ke korozi a to zejména u $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ bývají magnety chráněny ochranným povlakem (coating). Před nanášením povlaku musí být magnet dokonale vyčištěn a vysušen, jinak by mohl korodovat zevnitř. K dispozici je celá řada ochranných povlaků od různých druhů kovů (titan, zlato, stříbro) až po některé plasty (teflon, parylen, epoxid). Vhodná volba povlaku souvisí se konkrétním použitím

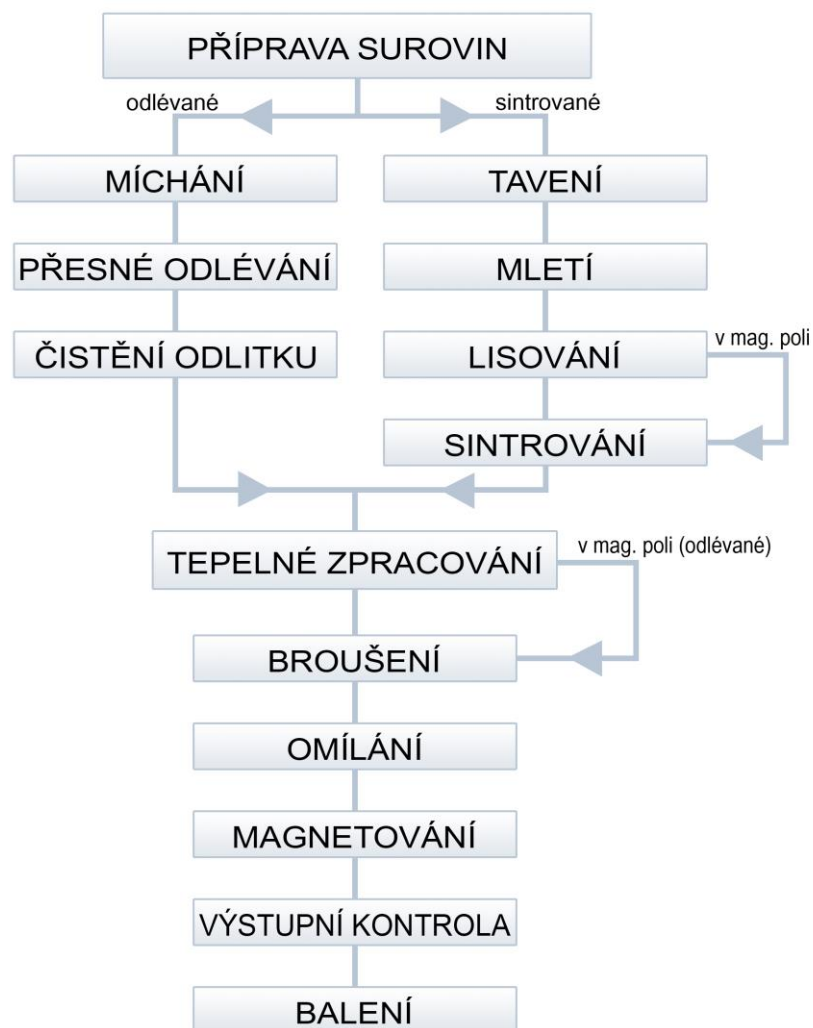
magnetu (např. zlacení je chemicky inertní a je vhodné pro lékařský průmysl, zatímco pogumování poskytuje dodatečnou mechanickou odolnost). Standardně se používá galvanické pokovení skládající se ze tří vrstev nanášených na sebe z niklu, mědi a niklu. [16]

Magnetování – U dosud nezmagnetovaných magnetů dochází k magnetizaci ve směru její přednostní osy vystavením na krátký okamžik velmi silnému magnetickému poli (asi 650 až 1000 kA/m, viz obr. 20). [1]

Výstupní kontrola – Souvisí s testováním, kterému je věnována samostatná kapitola (viz 4.)

3.3 Výroba magnetů AlNiCo

AlNiCo magnety lze vyrábět dvěma odlišnými způsoby. Jednak lisováním a poté slinováním (sintrováním) a jednak klasickým tavením a odléváním. V blokovém schématu výroby jsou tedy 2 oddělené výrobní větve. Pro oba způsoby výroby jsou patrné jiné charakteristické vlastnosti výsledného magnetu. Složení a poměry surovin vzhledem k různým typům magnetů jsou uvedeny v 2.3. [8]



Obr. 18: Blokové schéma výroby magnetu AlNiCo (upraveno z [21])

3.3.1 Sintrované magnety AlNiCo

Míchání, mletí – Výrobní suroviny se ve stanoveném poměru dokonale promísí a rozemelou na prášek. [8]

Lisování – Klasické tlakové lisování na požadovaný tvar a rozměr. Pokud během lisování vystavíme prefabrikát vnějšímu magnetickému poli, výsledný magnet bude anizotropní. [8]

Sintrování – Probíhá ve vodíkové atmosféře okolo teplot kolem 1260 °C (nižší teplota než teplota tavení kteréhokoli obsaženého základního prvku) a slouží k mechanickému vytvrzení vylisku. [8]

Tepelné zpracování – Koncové tepelné zpracování slouží k úpravě konečné struktury materiálu, dá se jím ovlivnit např. kritická teplota a koercitivní intenzita. [8]

Broušení, omílání – Vybroušení vypáleného magnetu na požadovaný přesný rozměr a odstranění povrchových nečistot. [8]

Magnetování – Zmagnetování magnetu vnějším magnetickým polem. Pro izotropní magnety všesměrově, pro anizotropní v prioritní ose magnetizace. [8]

Výstupní kontrola – Souvisí s testováním, kterému je věnována samostatná kapitola (viz 4.)

Slinuté AlNiCo jsou ve skutečnosti strukturně silnější (tvrdší) než odlévané AlNiCo. Jejich nevýhodou je keramický charakter a tak i vysoká křehkost a citlivost na mechanické namáhání. Obvykle jsou malých rozměrů s hmotností okolo 30g a vhodné pro sériovou výrobu. [8]

3.3.2 Odlévané magnety AlNiCo

Tavení – Probíhá obvykle v indukčních pecích při teplotách 1750 - 1780 °C. Z počátku se přidá vyšší množství hliníku, protože se ho část „vypaří“ v důsledku nízké teploty tání (680°C). [8]

Odlévání – Roztavená slitina se nalije do pískových forem, které mají požadovaný tvar a velikost magnetu. Kritická je doba odlévání, protože určuje výsledný poměr Al/Ni. Odlévání je možno regulovat např. pomocným chlazením, nebo exotermním pískem. [8]

Čištění odlitku – Po vychladnutí odlitku, je písková forma rozbita (písek je recyklován) a odlitek je očištěn od zbytku písku a nečistot. [8]

Tepelné zpracování – Koncové tepelné zpracování slouží k úpravě konečné struktury materiálu, dá se jím ovlivnit např. kritická teplota a koercitivní intenzita. Pro výrobu anizotropního magnetu je prefabrikát v této části vystaven vnějšímu magnetickému poli. [8]

Broušení, omílání, magnetování a výstupní kontrola – Probíhá stejně jako u sintrovaného magnetu. [8]

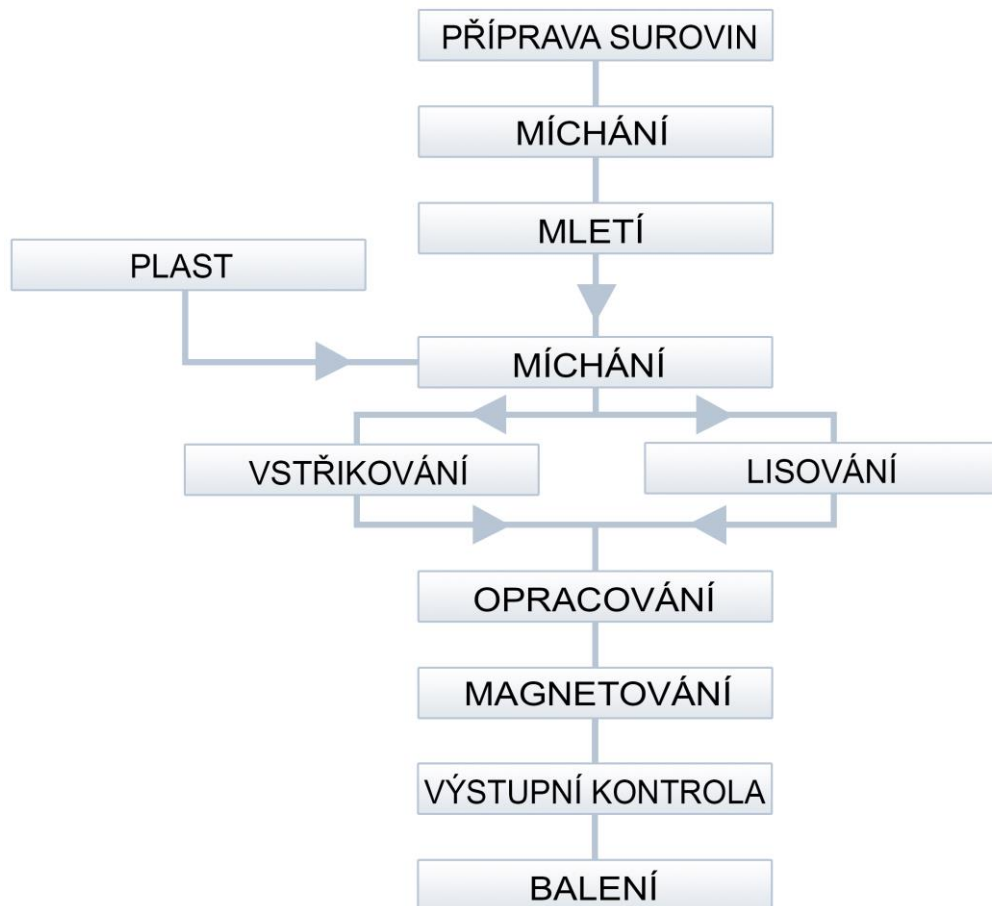
Před broušením mají magnety tmavě šedou až černou barvu a porézní povrch, což je způsobeno pískovou formou. Po broušení je povrch lesklý, hladký s kovovým vzhledem. Odléváním se vyrábějí typicky větší AlNiCo magnety o hmotnostech až 30kg. Uvnitř magnetů mohou být malé vzduchové kapsy, což by mělo mít jen minimální vliv na funkci magnetu. Protože odlévané AlNiCo mají spíše kovový charakter, jsou do určité míry odolné vůči mechanickému namáhání a jsou také méně křehké, proto je možno je použít v náročnějších aplikacích. [8]

3.4 Výroba plastem pojených magnetů

Plastem pojené permanentní magnety jsou relativní novinkou. Skládají se z magnetického prášku a nemagnetického pojiva, kterým je termoplastický materiál např. polyamid, epoxid apod. Lze tedy využít jakýkoliv z předcházejících typů magnetů (SmCo, NdFeB, AlNiCo i feritové) a dokonce jejich hybridní verze (např. ferit + NdFeB) s kombinovanými vlastnostmi. Mohlo by se zdát, že jde o dokonalý recyklační způsob pro zbylý prášek během broušení sintrovaných magnetů ze vzácných zemin, bohužel toto jeho využití není možné, protože stabilita těchto prášků je velmi špatná, avšak je možno použít prášek z výroby magnetů na bázi tvrdých ferritů a AlNiCo. [9]

Prášek ze vzácných zemin vhodný pro plastové lepení se musí vyrábět zvlášť, za tímto konkrétním účelem např. nuceným oběhem roztavené NdFeB slitiny v rychle se otáčejícím chlazeném měděném kole, ztuhlý materiál opouští kolo ve formě pásy 30-50 μ m tlusté a asi 1,5mm široké a skládá se ze zrn o velikosti kolem 0,1 μ m (asi 100x menší než zrna u slinutých magnetů ze vzácných zemin). Tato páska je extrémně chemicky stabilní, po jejím rozdrčení vznikne prášek vhodný pro plastové lepení. Kvůli velmi malé velikosti zrna nelze je

krystalograficky orientovat k výrobě anizotropních magnetů. Celosvětově došlo ke značnému úsilí o vytvoření anizotropního prášku ze vzácných zemin. Ačkoli je aktuálně dostupný asi ze dvou soukromých zdrojů, jeho výrobní náklady jsou značně vyšší než u izotropního prášku, stejně tak i tvar výsledného magnetu je omezen. Klíčové je působení silného vnějšího magnetického pole na anizotropní prášek během lepení. To vede k vyšším třecím silám, které musí být překonány během lepení. Jsou proto vhodné jen na speciální aplikace. [9]



Obr. 19: Blokové schéma výroby plastem pojeného magnetu (upraveno z [21])

Míchání, mletí – Důkladné promíchání a rozemletí magnetických prášků. [9]

Míchání s plastem – Fáze, kdy dojde k promísení plastu a magnetického prášku a tekutého plastu (probíhá za zvýšených teplot). [9]

Lisování – Probíhá za sucha, kdy je plastové pojivo zahřáté, tvárné, ale už není tekuté. [10]

Vstřikování – Probíhá pod tlakovým vstříknutím stále tekutého plastového pojiva s magnetickým práškem do konkrétní formy. [10]

Opracování – Může být realizováno broušením, frézováním, nebo řezáním. Slouží ke konečnému vytvarování magnetu. Kvůli náchylnosti prášků ze vzácných zemin ke korozi se používá coating (nastříkání tenké ochranné vrstvy). [9]

Magnetování – Vystavení magnetu vnějšímu magnetickému poli (asi 100 až 400 kA/m v závislosti na typu magnetu, viz obr. 20). [9]

Výstupní kontrola – Souvisí s testováním, kterému je věnována samostatná kapitola (viz 4.).

3.4.1 Lisované plastem pojené magnety

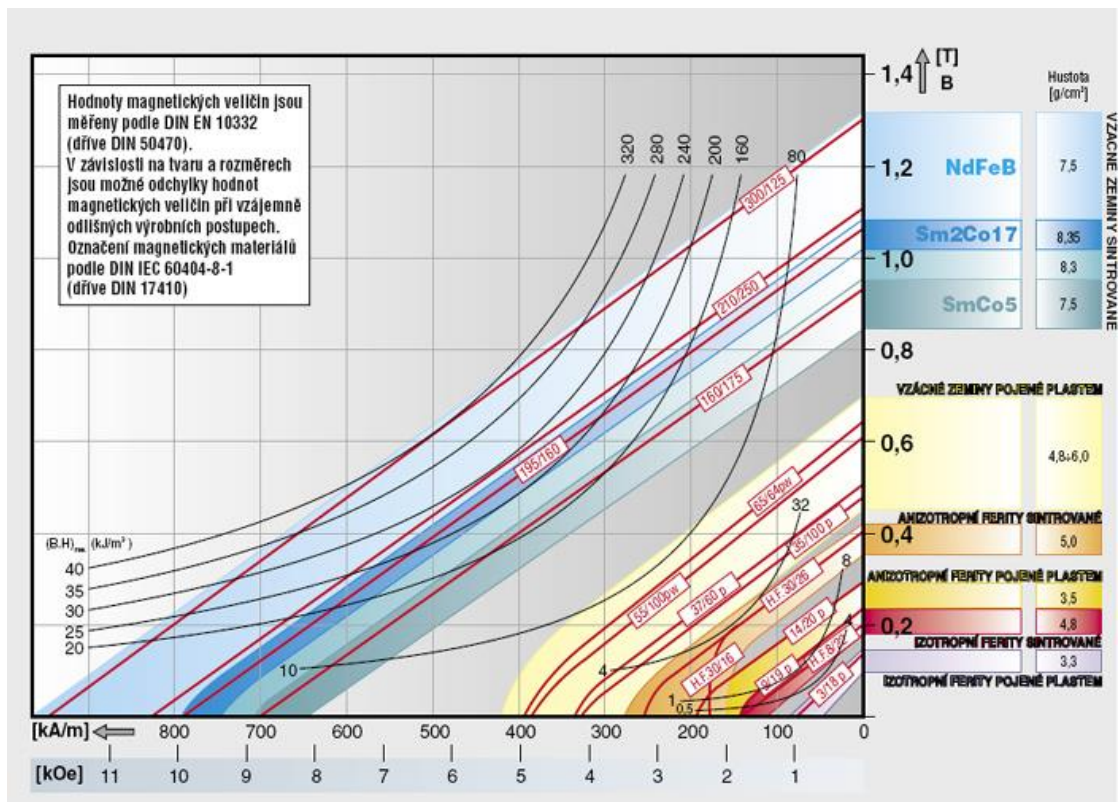
Mají vyšší poměr magnetického prášku vůči nemagnetickému pojivu, což jim dává lepší magnetické vlastnosti než vstřikovaným plastem pojeným magnetům. Obvykle se nemusí dále mechanicky obrábět (lisování je přesné), ale jsou omezeny do jednodušších tvarů jako obdélníky, kruhy, válce, apod. Hodí pro velkosériovou výrobu. [10]

3.4.2 Vstřikované plastem pojené magnety

Jejich předností je možnost realizace složitějších tvarů, případně vrstvení různých magnetických materiálů s různými koncentracemi prášků na sebe. Jsou odolnější proti odštěpování než lisované plastem pojené magnety, avšak mají nižší maximální energetický součin. [10]

3.5 Srovnání demagnetizačních charakteristik magnetů

Měření probíhá za vystavení materiálu působení vnějšího magnetického pole a následné změně jeho magnetického momentu. Hodnota maximálního energetického součinu $((BH)_{MAX})$ představuje maximální tok energie charakteristický pro každý materiál (podle jeho velikosti u magnetů se stejným objemem můžeme rozlišovat silnější a slabší magnety). Z Obr. 20 je zřejmé, že každý typ magnetu zastupuje určitou oblast magnetických hodnot (v Obr 20. jsou uvedeny minimální hodnoty maximálního energetického součinu pro každý materiál, avšak maximální hodnoty nemusí být aktuální, díky neustálému pokroku ve výrobě magnetů). Podle hodnot požadované magnetické energie volíme magnety pro konkrétní aplikace. [1]

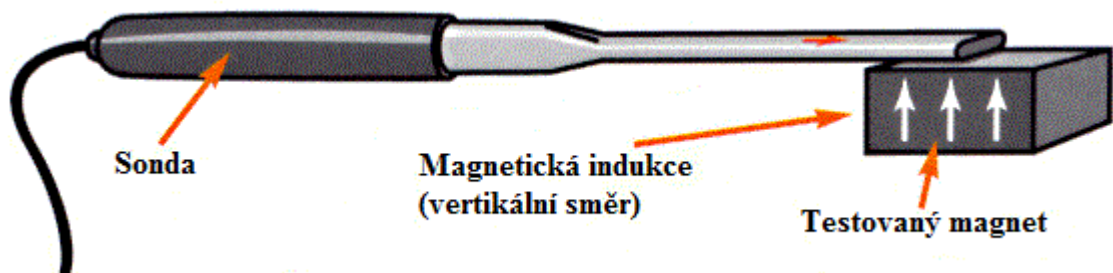


Obr. 20: Srovnání demagnetizačních charakteristik některých magnetických materiálů [1]

4 Testování a kontrola permanentních magnetů

4.1 Kontrola intenzity magnetické indukce

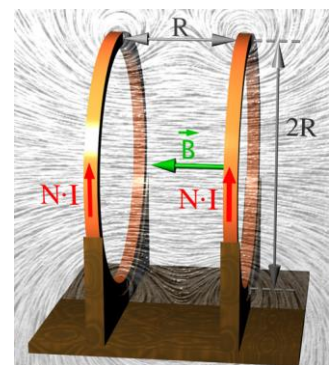
Tento test využívá měřící sonda (gaussmetr, teslametr,...) k měření intenzity magnetické indukce magnetu ve stanovené vzdálenosti. Typicky se měření provádí na povrchu magnetu, nebo na stejnou vzdálenost jako v magnetickém obvodu, kde bude magnet použit. Ověří se tedy, jestli magnetická indukce odpovídá vypočtené hodnotě. [13]



Obr. 21: Znárodnění měření intenzity magnetické indukce na povrchu magnetu (upraveno z [14])

4.2 Kontrola Helmholtzovou cívkou

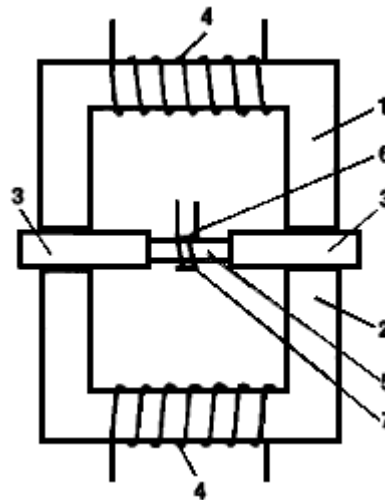
Používá se pro měření remanentní indukce (B_r), koercitivní intenzity (H_c), maximálního energetického součinu $((BH)_{\max})$ a orientace úhlu magnetické osy. Helmholtzova cívka je sada dvou identických kruhových cívek, umístěných ve stanovené vzdálenosti (R) se známým počtem závitů (N). Permanentní magnet známého objemu je umístěn ve středu mezi oběma cívkami, kterými protéká stejný proud ve stejném směru. Vytvoří se stacionární magnetické pole právě ve středu, mezi oběma cívkami. Permanentní magnet lze považovat za magnetický dipól, který se začne v tomto magnetickém poli pohybovat. Tento pohyb způsobuje časovou změnu magnetického indukčního toku, což generuje napěťový signál v cívce. Pokud je tedy známý pohyb magnetu, objem magnetu, koeficient permeance a permeabilita magnetu, můžeme určitě výše zmíněné hodnoty. [13]



Obr. 22: Znárodnění stacionárního magnetického pole mezi Helmholtzovými cívkami [15]

4.3 Vykreslení hysterezní smyčky (demagnetizační charakteristiky)

Ke sledování hysterezní smyčky, nebo její části mohou být použity např. permeametry (zařízení sloužící k měření magnetické indukce v materiálu za známé intenzity vnějšího magnetického pole, takto lze dopočítat permeabilita materiálu). Testovaný magnet je magnetizován až do bodu nasycení a poté demagnetizován během čehož je měřena jeho magnetická indukce, následně jsou hodnoty B a H zakreslovány do grafu. Výsledkem je hysterezní smyčka materiálu. [13]



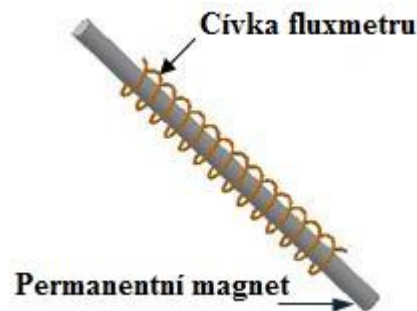
Obr. 23: Principiální schéma permeamtru [22]

Permeametr se skládá z rámu z magneticky měkkého materiálu (na Obr. 23 části 1 a 2) a je opatřen pólovými nástavci, nebo pohyblivými částmi (na Obr. 23 části 3) tak, aby upnutý vzorek tvořil s rámem uzavřený magnetický obvod s rámem. Magnetické pole se vytvoří magnetizačními cívkami (na Obr. 23 části 4). Magnetická indukce (B) v měřeném vzorku (na Obr. 23 část 5) se stanoví pomocí měřicího vinutí (na Obr. 23 část 6). Intenzita magnetického pole (H) se měří pomocí magnetického potenciometru (na Obr. 23 část 7), ale může být také měřena jinými způsoby (např. Halloovou sondou). [22]

4.4 Kontrola Fluxmetrem

Slouží ke změření celkového magnetického toku vycházejícího z magnetu. Fluxmetr se skládá z cívky se známým počtem závitů, která je omotána kolem permanentního magnetu a připojena na měřicí zařízení. Jak je magnetem pohybováno dovnitř a ven z cívky, dochází k indukci proudu v cívce, která se ve fluxmetru integruje a umožňuje tak zobrazení celkového magnetického toku vycházejícího z magnetu. Fluxmetry mohou být také použity na ověření

nasycení magnetu během jeho magnetizace. Vždy musejí být navrženy zvlášť na různé tvary magnetů. [13]



Obr. 24: Cívka fluxmetru omotaná okolo permanentního magnetu (upraveno z [13])

4.5 Mapování magnetických siločar

Mapy magnetických siločar jsou analogické s geografickými obrysovými mapami. Mohou být sestaveny ze skenů pole permanentního magnetu zařízením, které je vybaveno Hallovými sondami pro měření ve všech třech osách. Výsledná data jsou vynesena do prostorové mapy (podobnou mapu magnetického pole je možno vidět v příloze). [13]

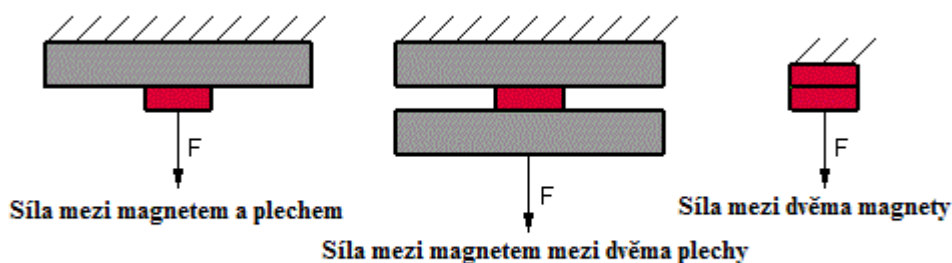
4.6 Kontrola přídržné síly

Na velikost přídržné síly má vliv mnoho faktorů a lze ji značně zvýšit vhodnou volbou směru magnetizace, popř. lze ještě upravit použitím různých pólových nástavců. Existuje velmi mnoho kombinací. Pro příklad je uvedeno několik materiálů, ze kterých je možno zhotovit pólové nástavce a jejich vliv na přídržnou sílu. [18]

Tab. 3: Srovnání některých materiálů pólových nástavců a jejich vlivu na velikost přídržné síly [1]

Koeficient	Materiál
1	12 013 (technicky čisté železo)
0,94	11 373
0,82	11 343
0,75	11 500
0,7	11 700
0,6-0,3	legované a nástrojové oceli

Tyto zkoušky se provádí v různých variantách souvisejících s požadavky na konkrétní použití magnetu. 3 nejobvyklejší varianty jsou: testování přídržné síly mezi magnetem a plechem, magnetem mezi dvěma plechy a dvěma magnety. Musí být dodržena jmenovitá vzduchová mezera, pro kterou má být síla testována. Existují různé metody realizace, např. zkouška tahem pomocí zkušebního zařízení, které umožňuje upevněný magnet odtáhnout od ocelového plechu ve vertikálním směru (síla mezi magnetem a plechem). Realizace ostatních zkoušek je velmi podobná a spočívá opět v odtahování magnetu od plechů, popř. dalšího magnetu a následném změření reálné přídržné síly, která se porovná s vypočtenou silou. Pokud jsou všechny podmínky definovány, je možno změřit přídržnou sílu obyčejným siloměrem. [18]

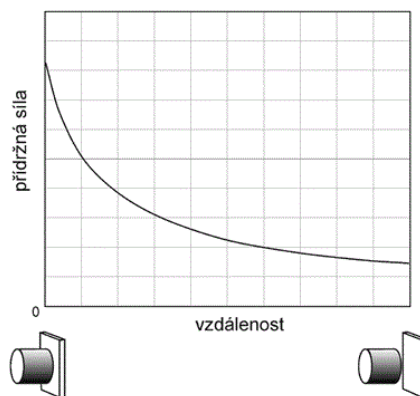


Obr. 25: 3 nejobvyklejší způsoby testování přídržné síly permanentních magnetů (upraveno z [17])

Příklad výpočtu přídržné síly (mezi magnetem a plechem) – Tato přídržná síla je přímo úměrná kvadrátu magnetické indukce magnetu (B) ve vzduchové mezeře a průřezu pólu magnetu (A), lze tedy zapsat jako:

$$F = (B^2 \cdot A) / (2 \cdot \mu_0) \quad [N; T, m^2, H/m] \quad (1.6)$$

Je zřejmé, že výsledná závislost bude hyperbolická. [18]



Obr. 26: závislost přídržné síly na vzdálenosti magnetu (upraveno z [18])

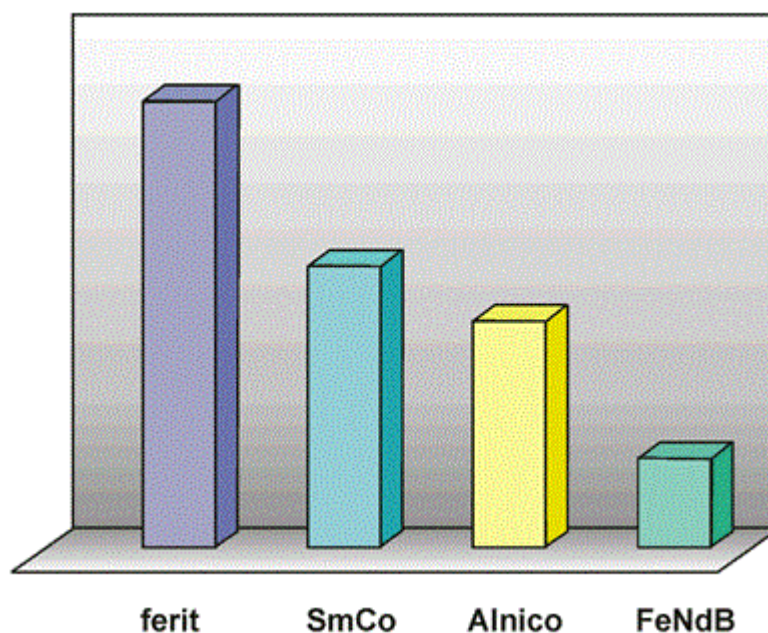
4.7 Ostatní zkoušky

4.7.1 Toxikologické testy

Jsou prováděné nejčastěji u magnetů používaných ve zdravotnictví. Obecně lze říci, že z feritových magnetů je vhodnější používat strontnaté ferity, protože v kyselém prostředí by mohlo dojít k uvolňování baria. U magnetů ze vzácných zemin je důležité zamezit vdechování jejich prachu při výrobě (zejména pokud obsahuje kobalt), což platí i pro magnety AlNiCo taktéž obsahující kobalt. [1]

4.7.2 Testy chemické odolnosti

Mapují vlastnosti různých typů magnetů za působení agresivních prostředí a zabývají se také jejich odolností proti korozi. Obecně lze říci, že proti korozi jsou nejodolnější plastem pojené magnety a velmi korozivní naopak sintrované NdFeB magnety. Chemická odolnost magnetů se dá značně vylepšit využitím povlakování (blíže popsáno ve 3.2). [18]



Obr. 27: Korozní odolnost magnetů (upraveno z [18])

Zkouška solnou mlhou – spočívá v ponechání magnetu v mlze s 5% koncentrací NaCl při teplotě kolem 35°C na dobu 24-72h (dle druhu povrchové úpravy) a vzorek nesmí jevit viditelné známky koroze. [18]

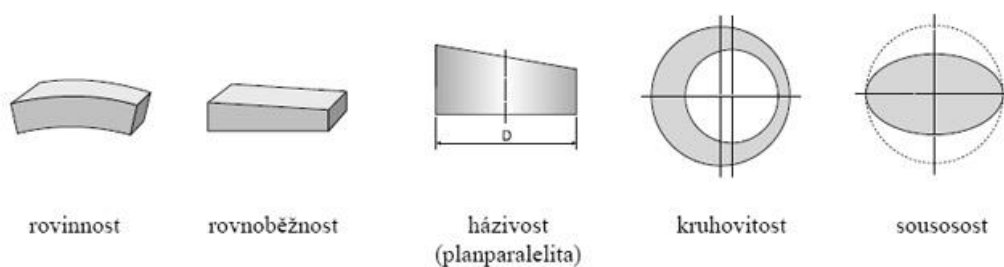
Zkouška v tlakové páře – spočívá v ponechání magnetu v páře o tlaku 270kPa (relativní vlhkost je 100%) na dobu 7 dnů. Maximální úbytek hmotnosti magnetu musí být 5mg/cm². [18]

4.7.3 Testy mechanické odolnosti

Zabývají se odolností magnetů v aplikacích, kde dochází k jejich mechanickému namáhání. Pokud jde o kontrolu, je magnet podroben namáhání v požadovaném směru (tahem, tlakem, stříhem, ...), které musí bez viditelných známek poškození vydržet (největší problémy jsou s vyštípáváním feritů, kterému se často nedá zabránit ani během výroby). Pokud jde o testování nového vzorku je magnet namáhán stále větší silou, dokud nedojde k jeho destrukci (destruktivní testování) a poté je možno obdobné vzorky bezpečně dimenzovat. [1]

4.7.4 Zkoušky rozměrů

Zkoušky, resp. měření rozměrů jsou běžnou součástí každé výstupní kontroly magnetu. Měření se provádí obvyklými měřidly délky (posuvné měřidlo, mikrometr) případně opatřenými digitálními ukazateli (nesmí být citlivé na magnetické pole). Pokud je třeba měřit složitější třírozměrné tvary je nutno použít specializovaná třírozměrně měřící zařízení s počítačovým vyhodnocením. Jsou definovány konkrétní výrobní rozměrové tolerance a stejně tak i odchylky geometrického tvaru a ploch magnetu. [18]



Obr. 28: Geometrické odchylky magnetů [1]

Kvůli relativně vysokým nákladům na dodatečné opracování jsou kladeny vyšší nároky na výrobu, aby docházelo k co nejmenším odchylkám. Vlastní rozměry povolených odchylek jsou definovány pro konkrétní zakázku. [18]

4.7.5 Teplotní testy

Jedná se jednak o testy závislosti magnetických vlastností na teplotě a jednak vlastní testy kritické (Curieovy) teploty. [18]

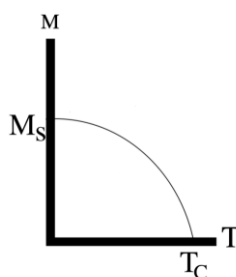
Curieova (kritická) teplota je teplota, při které dochází ke ztrátě magnetizace magnetu (feromagnetika se chovají jako paramagnetika). Přejít přes kritickou teplotu se skládá z vratné a nevratné části (nemá ostrý přechod). V praxi je třeba se vyvarovat přiblížení pracovní teploty ke Curieově teplotě (bezpečný koeficient je do 0,4 násobku hodnoty Curieovy teploty). [18]

Maximální teplota je teplota označující maximální teplotu, do které lze magnet použít.

Tab. 4: Kritické a maximální teploty permanentních magnetů [20]

Druh magnetu	Kritická teplota [°C]	Maximální teplota [°C]
Strontnaté ferity	460	300
Neodymové magnety	310	150
AlNiCo magnety	860	540
Samariové magnety	750	300

Testování kritické teploty – Magnet se neustále zahřívá, dokud jeho magnetizace neklesne na nulu. Konečná teplota se označí jako Curieova teplota daného materiálu. [18]



Obr. 29: Znárodnění grafické závislosti magnetizace na teplotě, kde v bodě M_s je magnet nasycen na maximální hodnotu magnetizace, bod T_c značí kritickou teplotu [20]

Testování změny magnetických vlastností se změnou teploty (testování teplotní odolnosti) – Jak bylo řečeno, přechod přes kritickou teplotu není ostrý (tzn. při zvyšující se teplotě magnetu dochází k postupným změnám jeho vlastností). Jednoduchá kontrola teplotní odolnosti lze provést jako měření povrchové magnetické indukce a magnetického toku v závislosti na teplotním cyklu. Magnet je vystaven jeho maximální teplotě (doba vystavení

maximální teplotě se určuje dle velikosti magnetu, ale minimum je 20min). Maximální dovolený pokles magnetické indukce a magnetického toku je 5%. [18]

5 Simulace magnetických obvodů s různými pólovými nastavci pro magnetické upínací systémy

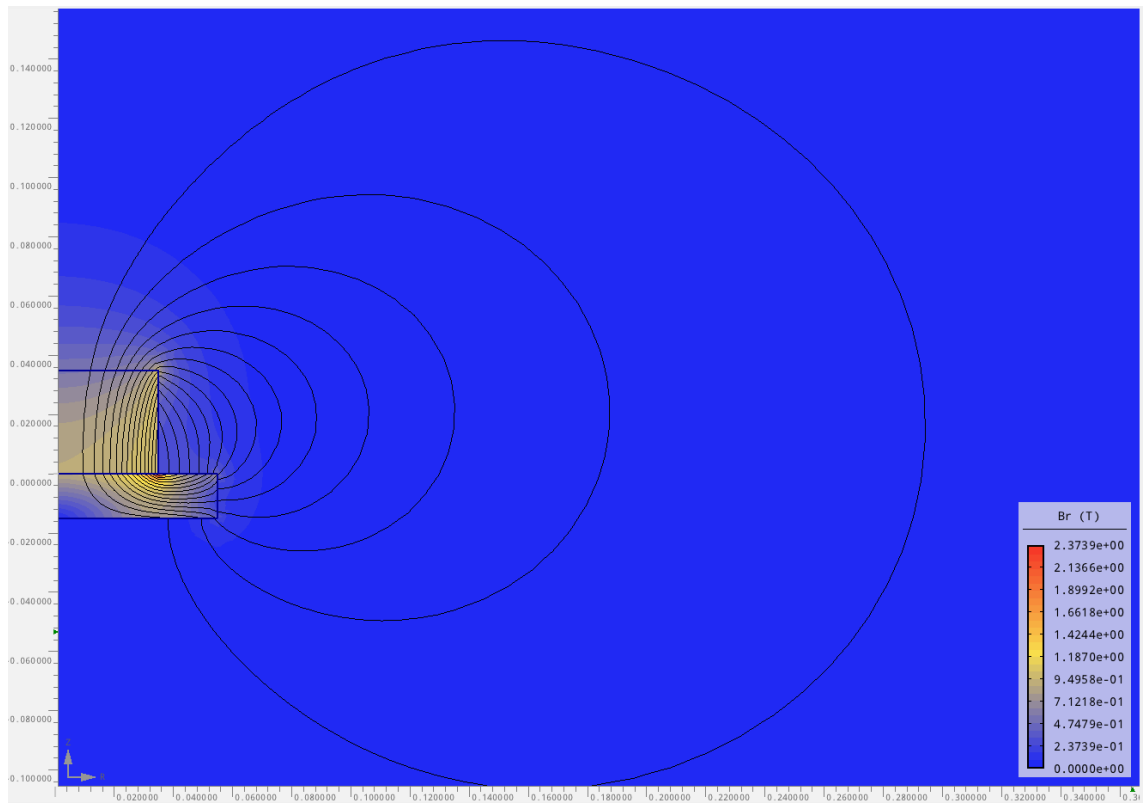
5.1 Úvod k simulacím

Ve strojírenství se používají různé typy upínacích systémů (mechanické, hydraulické, pneumatické), které jsou časově a manuálně náročné. Vznikly tak magnetické upínací systémy, které zkracují čas nutný k upnutí obrobku a zároveň umožňují upnutí více obrobků najednou (využití např. při hromadném broušení). Zpočátku byly upínače elektromagnetické, později vznikly také upínače s permanentními magnety, ve kterých se v současnosti využívají zejména neodymové magnety. Magnetické upínací systémy lze použít pouze pro upínání feromagnetických materiálů. [23]

U magnetických upínacích systémů s permanentními magnety je důležité, aby pro upnutí vlastního obrobku byla využita pokud možno maximální možná síla magnetu. Toho se docílí použitím vhodných pólových nastavců (nastavců z magneticky měkkého materiálu sloužících k usměrnění magnetického toku magnetu). Čím větší magnetický tok bude procházet přes feromagnetický obrobek, tím větší silou bude přitahován. [23]

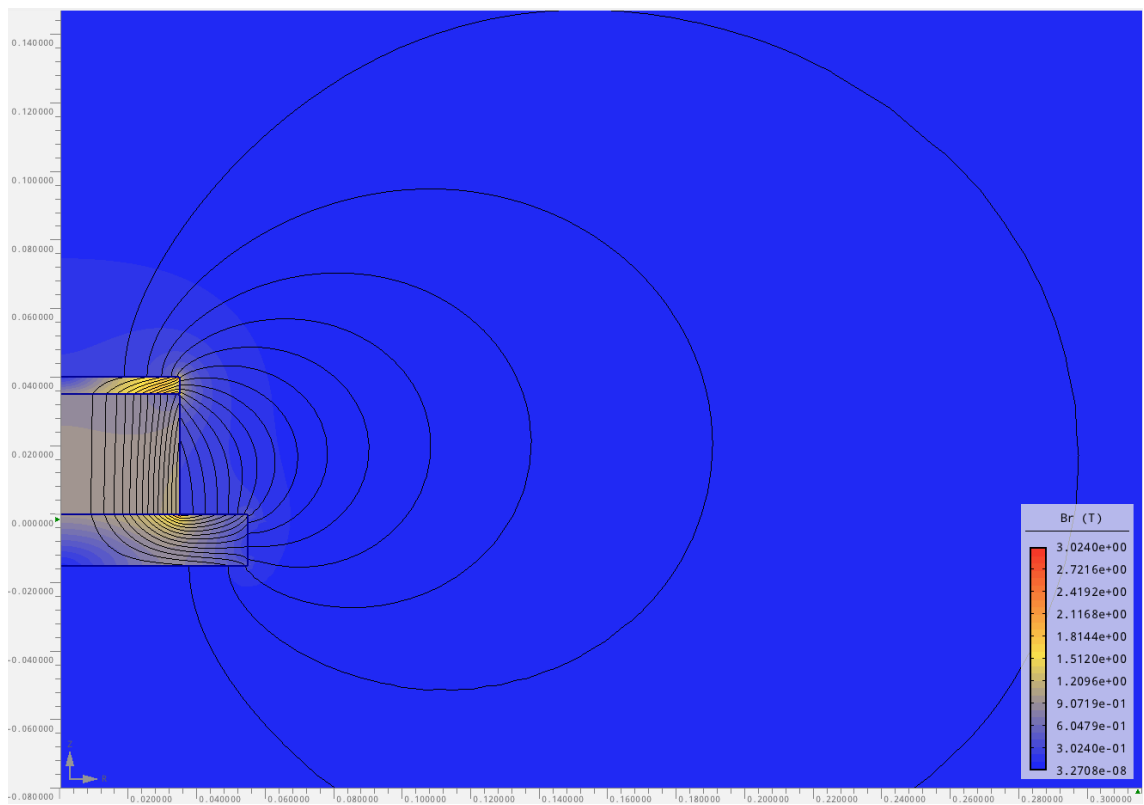
Simulace magnetických obvodů byly provedeny v prostředí výpočtového programu Agros2D. S neodymovým válcovým permanentním magnetem VMM8 o výšce 35mm a průměru 70mm (ve 2D simulaci je zobrazena pouze polovina magnetu s výškou 35mm a délkou 35mm) s remanentní indukci (B_r) o průměrné kusové hodnotě 1,35T vyráběným firmou MAGSY, s.r.o. Byl vybrán válcový magnet, protože Agros2D umožňuje využít osově symetrický souřadnicový systém a vytvořit tak trojrozměrný model magnetického systému (viz příloha). V praxi jsou magnetické obvody upínacích systémů složitější (obsahují ještě tzv. zkratovací desku sloužící pro vypnutí a zapnutí upínače), simulace se zabývají pouze problematikou vhodných pólových nastavců o šířce 5mm pro usměrnění magnetického toku (zvýšení přídržné síly) magnetu do feromagnetického materiálu symbolizujícího obrobek pod magnetem (výška 15mm, průměr 110mm). Relativní permeabilita (μ_r) magnetu byla nastavena na hodnotu 1,05, vzduchu na hodnotu 1 a magneticky měkkého železa, které je použito pro předmět pod magnetem i pólové nastavce na hodnotu 9300 (vyplnil Agros2D po nastavení položky „železo“ z knihovny materiálů). Je použit lineární výpočtový systém a magnetický obvod je v ustáleném stavu. Okrajová podmínka magnetického potenciálu v nekonečnu (tak daleko, aby rozhraní neovlivnilo simulaci) je nastavena na hodnotu 0.

5.2 Otevřený magnetický obvod (bez pólových nástavců)



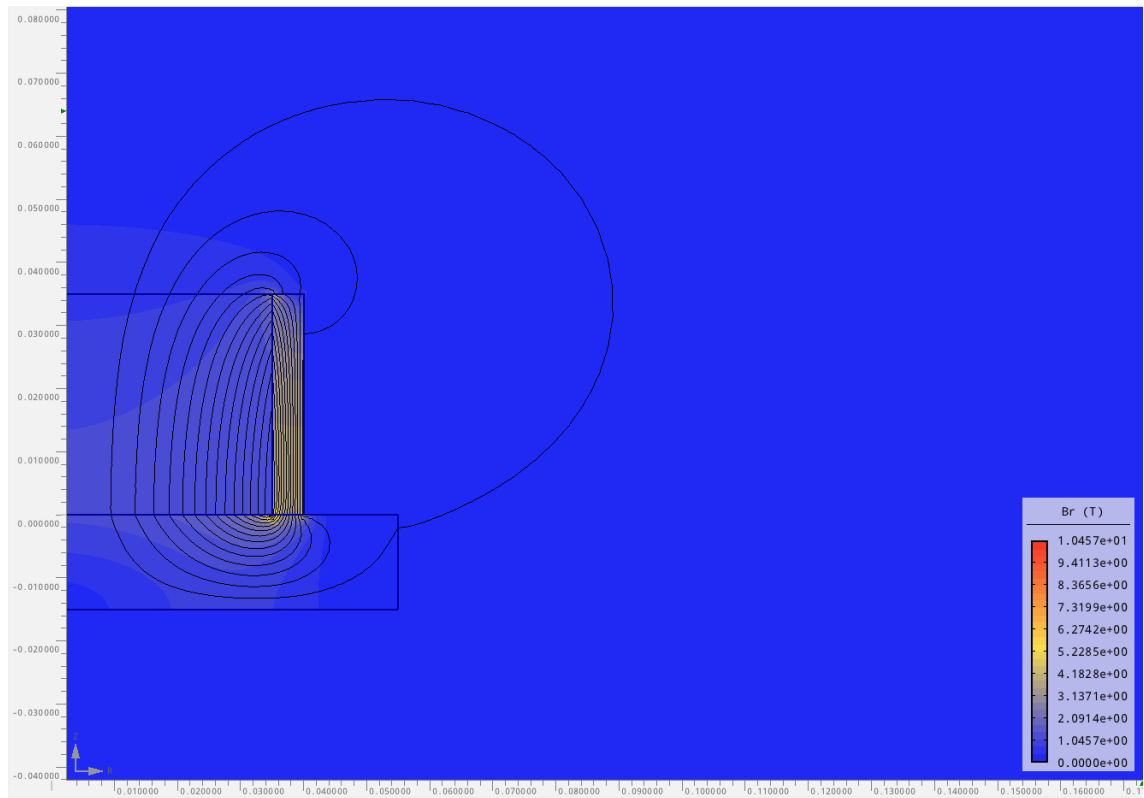
Obr. 30: Simulace otevřeného magnetického obvodu

5.3 Magnetický obvod s pólovým nástavcem na magnetu



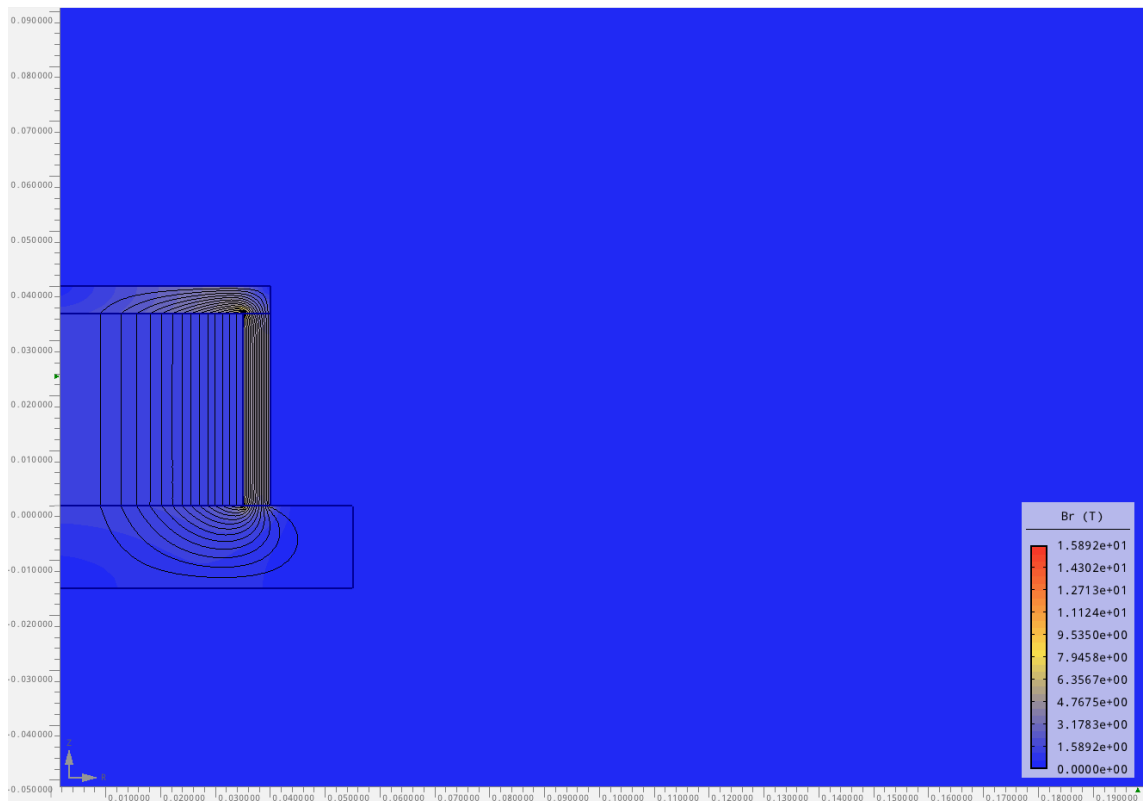
Obr. 31: Simulace magnetického obvodu s pólovým nástavcem na magnetu

5.4 Magnetický obvod s pólovým nástavcem kolem magnetu



Obr. 32: Simulace magnetického obvodu s pólovým nástavcem kolem magnetu

5.5 Magnetický obvod s pólovými nástavci na magnetu i kolem magnetu



Obr. 33: Simulace magnetického obvodu s pólovými nástavci kolem magnetu i na magnetu

Závěr

Popsání složení a vlastností nejběžnějších zástupců permanentních magnetů bylo naznačeno ve druhé kapitole a způsobu jejich výroby a vzájemného srovnání ve třetí kapitole. V oblasti permanentních magnetů dochází k neustálému vývoji a vylepšování jejich vlastností. AlNiCo magnety jsou pomalu nahrazovány v točivých strojích o větších výkonech magnety ze vzácných zemin (hlavně neodymovými, jejichž typickým použitím jsou synchronní motory), ale stále se hojně využívají u točivých strojů s menšími výkony, měničů, snímačů, atp. Feritové magnety je výhodné použít v aplikacích, kde se nepředpokládá rozpojení magnetického obvodu (např. mikrofony, reproduktory). Nejširší oblast využití zaujímají plastem pojené magnety a to díky téměř nekonečným možnostem výroby z hlediska magnetických vlastností i tvarů a možností kombinací prášků různých typů magnetů.

Výsledky simulací ukazují, že pólové nástavce mají značný vliv na magnetické obvody. V magnetickém obvodu bez pólových nástavců (Obr. 30) je značná část energie magnetu vyzařována do okolí (uzavírání siločar přes vzduch), čímž by v praxi docházelo k velkému slábnutí přídržné síly. V magnetickém obvodu s pólovým nástavcem na magnetu (Obr. 31) je patrné malé usměrnění magnetického toku, ale stále se velká část energie magnetu vyzařuje do okolí. Nejvhodnější se jeví pólové nástavce kolem magnetu (Obr. 32) a kolem i na magnetu (Obr. 33, tzv. zvoncovité pólové nástavce), které magnetický tok magnetu usměrní do obrobku značně efektivněji než zbylé porovnávané typy. Obrobek tak bude přitahován téměř maximální možnou silou daného magnetu. Oba typy těchto pólových nástavců se používají v praktických aplikacích, simulace tedy potvrdily správnost jejich použití.

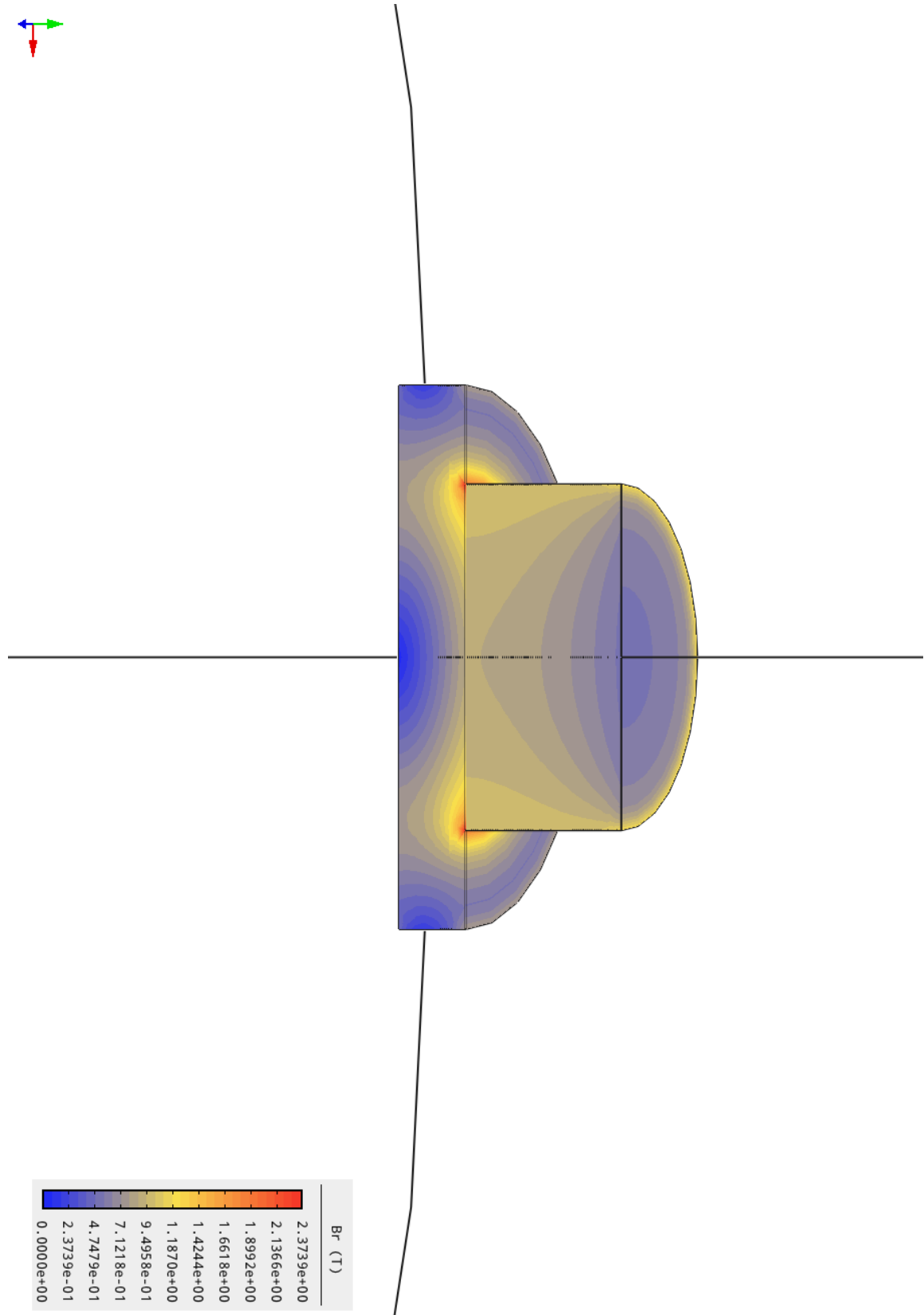
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SINOMAG, s. r. o. [online]. *Magnety a teorie: Co je třeba vědět o permanentních magnetech*. ©2016. [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [2] SPŠE MOHELNICE, [online]. *Vznik a zobrazení magnetického pole*. ©2016. [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
- [3] PODPORA TECHNICKÉHO VZDĚLÁVÁNÍ, RIENT, Walter [online]. *Hysterézní smyčka vzorová úloha SŠ*. ©2016. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: http://wiki.cichnovabrno.cz/groups/podporatechnickehovzdlavani/wiki/297c9/Hystere_zni_smyka_vzorova_uloha_S.html
- [4] NANOSHEL, LLC [online]. *High Purity Compound Nano Powders Strontium Ferrite Powder* ©2016. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.nanoshel.com/product/strontium-ferrite-powder/>
- [5] SOVEREIGN SPECIALTY CHEMICAL, INC. [online]. *UV/EB Cured Integrated Magnets- Composition and Method of fabrication*. ©2016. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/WO2004002731A1?cl=en>
- [6] K&J MAGNETICS, INC. [online]. *How Neodymium Magnets are Made*. ©2016. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=how-neodymium-magnets-are-made>
- [7] MAGNET APPLICATIONS, INC. [online]. *Magnetization*. ©2016. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.magnetapplications.com/design-guidelines/magnetization>
- [8] E-MAGNETS UK, [online]. *How Alnico Magnets are made*. ©2016. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://www.alnico-info.com/alnico_magnets_made.aspx
- [9] BUNTING MAGNETICS EUROPE, LTD. [online]. *Manufacturing*. ©2016. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.plasticbondedmagnets.co.uk/manufacturing/>
- [10] ECLIPSE MAGNETICS, LTD. [online]. *Magnetic materials plastic covered magnets*. ©2016. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <http://www.eclipsemagnetics.com/row/magnetic-materials-plastic-covered-magnets/>
- [11] CAPITAL ENERGY, [online]. *Hexagonal close-packed (HCP) crystal structure*. ©2016. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://capitalenergy.biz/?p=25611>
- [12] SINFONIA TECHNOLOGY CO., LTD. [online]. *For Rare-earth with turn Table Casting Metal Vacuum Melting Furnace*. ©2016. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: https://www.sinfo-t.jp/eng/product_info/elec_mecha/no16.html
- [13] INTEGRATED MAGNETICS, [online]. *Magnet Testing*. ©2016. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.intemag.com/magnetic_testing.html

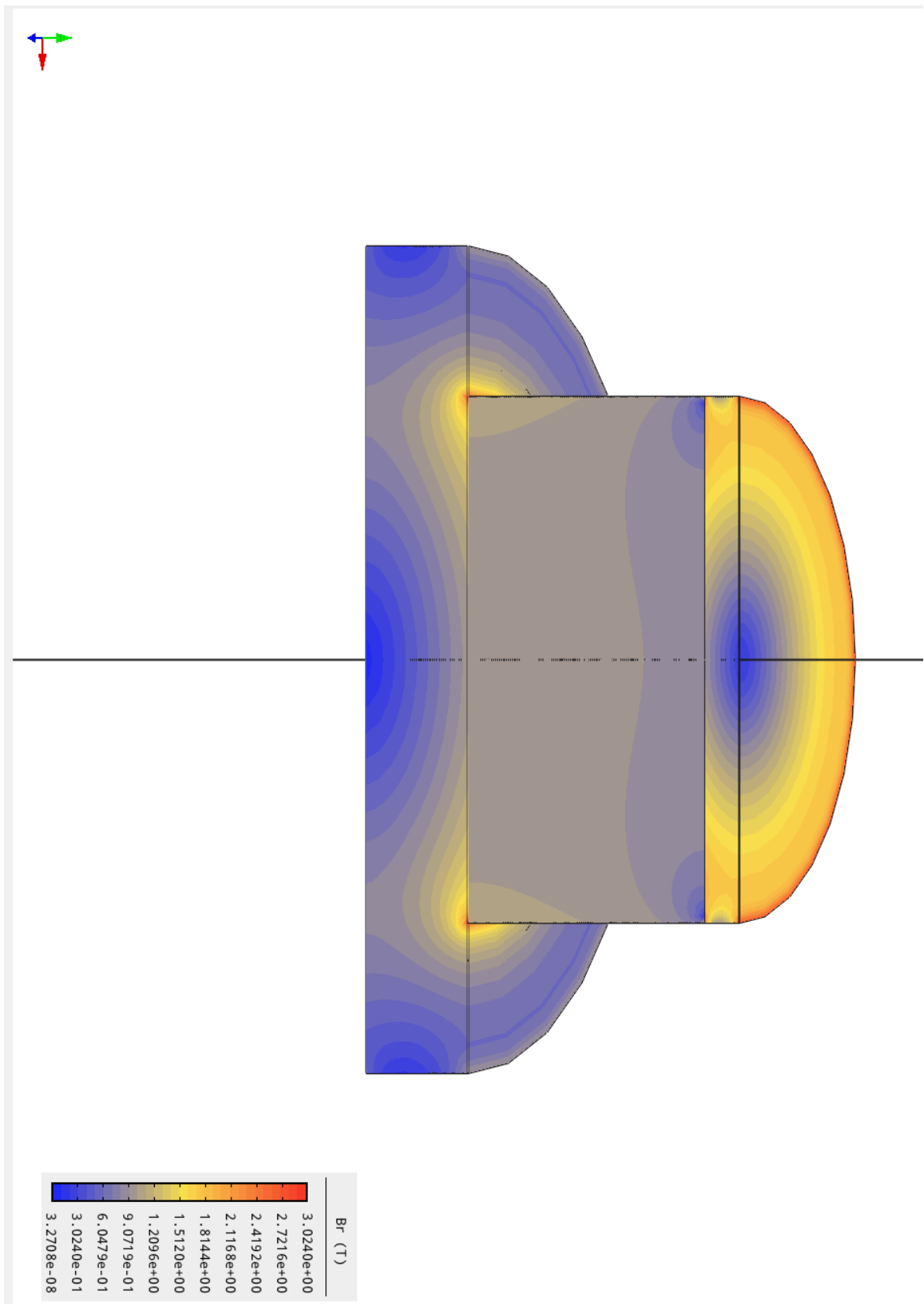
- [14] ALL MAGNETICS, INC. [online]. *Micropower Gaussmeter*. ©2016. [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <https://www.allmagnetics.com/device/gaussmeter.htm>
- [15] LOOSER, H. [online]. ©2016. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.hlooser.ch/seite%201.html>
- [16] E-MAGNETS UK, [online]. *Coating*. ©2016. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.ndfeb-info.com/coatings.aspx>
- [17] K&J MAGNETICS, INC. [online]. *How is the pull force of each magnet determined*. ©2016. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.kjmagnetics.com/faq.asp>
- [18] ABC MAGNET, s. r. o. [online]. *Měření magnetických vlastností*. ©2016. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/testy.php>
- [19] UCDAVIS CHEMWIKI, [online]. *Ferromagnetism*. ©2016. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://chemwiki.ucdavis.edu/Core/Materials_Science/Magnetic_Properties/Ferromagnetism
- [20] MAGMA MAGNETIC TECHNOLOGIES, LTD. [online]. ©2016. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.magmamagnets.com/magnets-technical-information/permanent-magnet-stability/>
- [21] ABC MAGNET, s. r. o. [online]. *Technologie výroby*. ©2016. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/technologie-vyroby.php>
- [22] THE FREE DICTIONARY, [online]. *Permeameter*. ©2016. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Permeameter>
- [23] ČEZ, a. s. [online]. *Vývojové trendy magnetických upínačů pro upínání feromagnetických předmětů*. ©2016. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/14-volny.pdf>

Přílohy

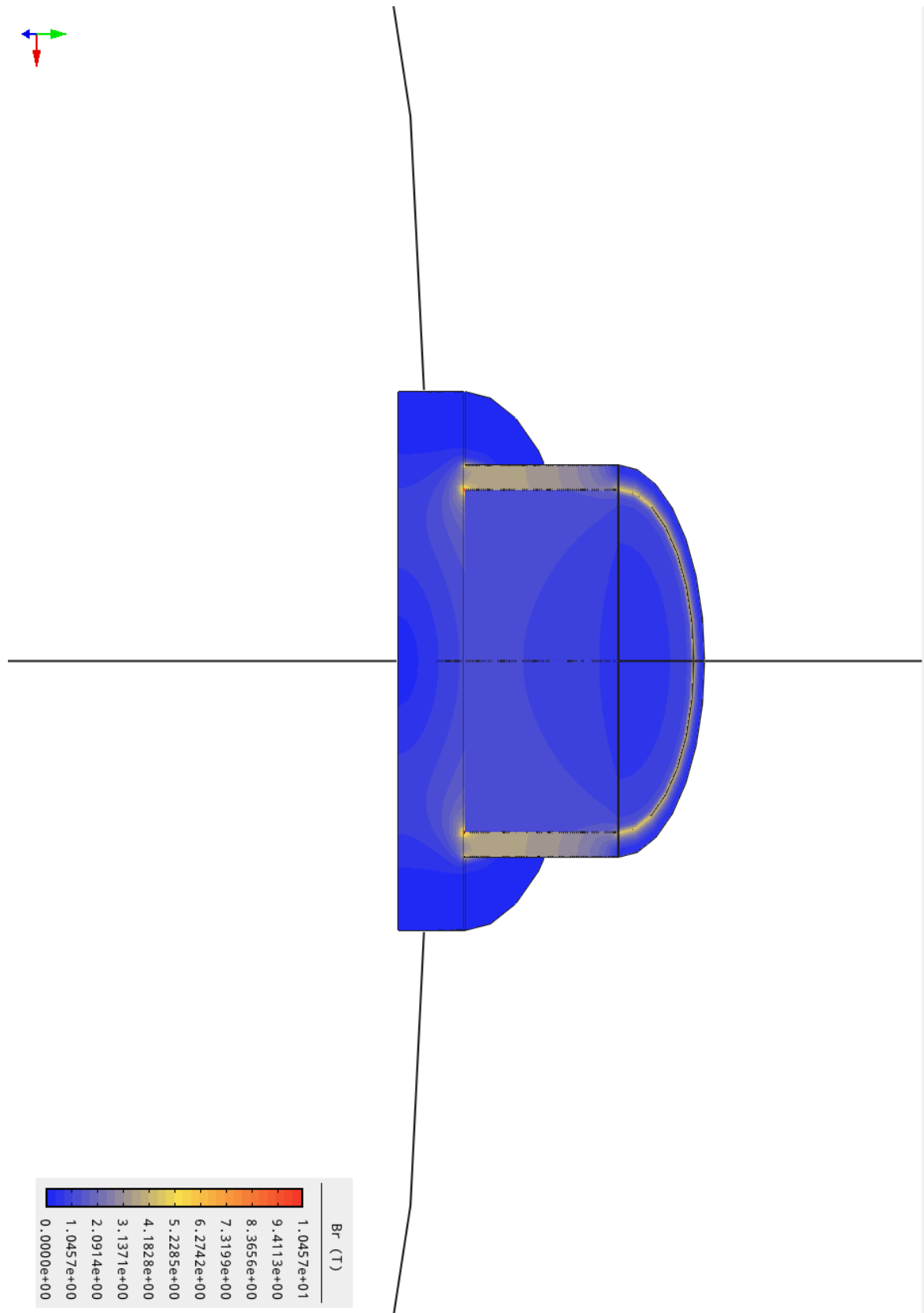
Příloha A – Simulace magnetického obvodu bez pólových nástavců 3D v řezu



Příloha B – Simulace magnetického obvodu s pólovým nástavcem z magneticky měkkého železa na magnetu 3D v řezu



Příloha C – Simulace magnetického obvodu s pólovým nástavcem z magneticky měkkého železa kolem magnetu 3D v řezu



Příloha D – Simulace zvonovitého magnetického obvodu 3D v řezu

