

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko - geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

MAGNETICKÉ VLASTNOSTI HUTNICKÉHO ODPADU A MOŽNOSTI JEHO RECYKLACE POMOCÍ MAGNETICKÝCH SEPARÁTORŮ

Magnetic Properties of the Metallurgical Waste and Recycling them
Using Magnetic Separators

diplomová práce

Autor:

Bc. Martina Mahuliaková

Vedoucí diplomové práce:

Mgr. Petr Jandačka, Ph.D

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martina Mahuliaková**
Studijní program: N2102 Nerostné suroviny
Studijní obor: 3904T022 Zpracování a zneškodňování odpadů
Téma: **Magnetické vlastnosti hutnického odpadu a možnosti jeho recyklace pomocí magnetických separátorů**
Magnetic Properties of the Metallurgical Waste and Recycling them Using Magnetic Separators

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl diplomové práce
2. Teoretická část
 - 2.1 Hutnické odpady
 - 2.2 Magnetické vlastnosti látek
 - 2.3 Magnetické separátory
3. Praktická část
 - 3.1 Metody práce
 - 3.2 Výsledky
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. MECHLOVÁ, E. a kol. Výkladový slovník fyziky. Prometheus, Praha 1999.
2. FRIES, J.: Stroje pro zpracování odpadu. VŠB-TUO, Ostrava 2007.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

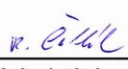
Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Petr Jandačka, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2011

Datum odevzdání: 30.04.2012


prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.
vedoucí institutu




prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Prohlášení

Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevydělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.

Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 26. dubna 2012

Martina Mahuliaková

.....
Martina Mahuliaková

Anotace

Tato předložená diplomová práce se zabývá problematikou zpracování odpadů z hutnického průmyslu pomocí magnetické separace. Stručně popisuje odpady vznikající v této oblasti průmyslu, jejich základní vlastnosti, možnosti likvidace a recyklace. Dále se zaměřuje na fyzikální zákonitosti související s magnetickou separací a magnetickými separátory. V kapitolách experimentální části je podrobně popsáno chemické složení, magnetické vlastnosti a analýza možnosti rozdělování vybraných druhů hutnických odpadů prostřednictvím magnetických separátorů, především u kalů a odprašků.

Klíčová slova: magnetická separace, kaly, odprašky, hutní odpady, rozdělování, magnetické separátory

Summary

This presented thesis deals with issues treatment of waste from metallurgical industry. Briefly describes wastes resulting from this kind of industry, their basic properties, and possibilities of disposal and recycling. Also describes laws of physics related with magnetic separation and magnetic separators. In the experimental chapters of the detailed chemical composition, magnetic properties and analysis of selected types of metallurgical wastes by magnetic separators, especially for sludge and dusts.

Keywords: magnetic separation, sludge, dusts, metallurgical waste, separation, magnetic separators

Poděkování

Autorka by ráda touto cestou poděkovala vedoucímu práce panu Mgr. Petru Jandačkovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost, zodpovědný přístup a připomínky, které během zpracovávání diplomové práce poskytoval. Dále by ráda poděkovala za poskytnutí vzorků kalů z Třince panu doc. Ing. Jiřímu Botulovi, Ph.D. a za poskytnutí vzorků odprašků a kalů, včetně chemického rozboru, paní prof. Janě Seidlerové, CSc. A zároveň, za zpracování RTG difrakce a fotografických snímků kalů z Třince, panu Dr. Ing. Daliborovi Matýskovi.

Obsah

1. Úvod a cíl práce.....	1
2. Teoretická část	2
2.1 Hutnické odpady - problematika	2
2.1.1 Hutnické odpady – obecný přehled z pohledu metalurgie železných a neželezných kovů	3
2.1.2 Vybrané hutnické odpady – základní členění	4
2.1.3 Vznik a zpracování hutních odpadů.....	5
2.1.4 Úpravnické procesy zpracování hutních odpadů	10
2.1.5 Pyrometalurgické a hydrometalurgické zpracování hutních odpadů.	10
2.1.6 Produkce odpadů pocházející z výroby železa a oceli	12
2.2 Magnetické vlastnosti látek	15
2.2.1 Základní magnetické veličiny	15
2.2.2 Para-, dia-, fero- a ferimagnetické látky	16
2.2.3 Magnetizační křivka.....	19
2.3 Magnetická separace	21
2.3.1 Magnetické separátory – přehled	22
2.3.2 Magnetické separátory – firmy v ČR.....	25
3. Praktická část.....	27
3.1 Metody práce a materiál	27
3.2 Výsledky.....	36
3.2.1 Měření magnetizační křivky materiálů a určení susceptibility	36
3.2.2 Popis modelového chování vybraných látek v magnetickém separátoru - radiální rychlost částic.....	42
3.2.3 Kvalitativní popis separace nehomogenních materiálů	47

4. Závěr	49
SEZNAM použité literatury	50
SEZNAM obrázků	54
SEZNAM tabulek	55
SEZNAM grafů	55

SEZNAM použitých zkratk

č. - číslo

EOP – elektrické obloukové pece

HK – hysterezní křivka

hm. – hmotnostní/ch

KK – kyslíkové konvertory

KKO – kyslíkové konvertorové ocelárny

MK – magnetická křivka

MŽP – Ministerstvo životního prostředí

S-M – Siemens-Martinské pece

Sb. – sbírky

TŽ – Třinecké železárny

1. Úvod a cíl práce

Hutnický průmysl patří celosvětově mezi odvětví, ve kterém vznikají kromě produktů výroby také velké množství nepotřebných materiálů v podobě odpadů. Tyto odpady mohou být dále po recyklaci využity jako cenný zdroj druhotných surovin, které mohou být opětovně použity v procesu výroby.

Recyklace odpadů, zkoumaných v této diplomové práci (kalů a odprašků), může mít pozitivní vliv na životní prostředí, ekonomiku, energetiku a jiné aspekty lidské činnosti. Vzhledem k množství hutnických odpadů, jež vznikají právě při procesech hutní výroby, je tato problematika klíčovým tématem odpadového hospodářství v současnosti a je v největším zájmu se právě touto problematikou zabývat.

Diplomová práce se věnuje možnostem recyklace velmi jemnozrnných kalů a odprašků na základě jejich magnetických vlastností pomocí magnetických separátorů. Jednotlivé kapitoly se zabývají samotnou problematikou hutnických odpadů, jejich rozdělením a současným zpracováním.

Dále se tato práce zaměřuje na magnetické vlastnosti látek, potažmo vymezením základních fyzikálních magnetických veličin a popisem magnetizačních křivek. V závěru teoretické části je vysvětlen princip magnetické separace s uvedením příkladů magnetických separátorů.

Cílem této diplomové práce je provést měření magnetických vlastností vybraných odpadů z hutnického průmyslu, analyzovat proces jejich magnetické separace a diskutovat možnosti a postup celého procesu recyklace.

2. Teoretická část

Následující jednotlivé podkapitoly se věnují, jak již bylo uvedeno v úvodu práce, hutnickým odpadům, jejich rozdělení a zpracování prostřednictvím pyrometalurgických, hydrometalurgických a také úpravnických procesů. Dále pojednávají o magnetických vlastnostech látek obecně a rozboru základního principu magnetické separace, nakonec magnetickým separátorům.

2.1 Hutnické odpady - problematika

Česká republika patří jak v minulosti, tak i dnes, stále za stát s velmi širokým rozsahem hutní výroby. Problém ČR je její vnitrozemská poloha a s ní spojený nedostatek významných vstupních surovin, jež jsou zapotřebí pro výrobní procesy. Tyto suroviny musí být dováženy do ČR ze zahraničí, čímž stoupají náklady na výrobu hutních produktů. Z tohoto hlediska vyvstává nutnost zdokonalovat recyklační procesy a zpracování produkovaných odpadů (jako druhotných surovin) z výroby metalurgie. Správným přístupem a novými, stále se rozvíjejícími, technologiemi se může pomoci především životnímu prostředí a také ekonomice hutních společností. Ještě dnes stále nejsou odpady z této oblasti bohužel v takové míře recyklovány a zpracovávány jako velmi cenný zdroj druhotných surovin. Odpady jsou neustále ukládány na haldy hutních provozů nebo v jejich bezprostřední blízkosti, i přes to, že obsahují nežádoucí látky, které mají škodlivý dopad na ekologii v místě uložení těchto odpadů. [1, 2, 3]

Při výrobě surového železa ve vysokých pecích vznikají jako odpadní produkty *struska a jemné odpady a vysokopecní výhoz*. Jemný metalurgický odpad vzniká při čištění vysokopecních plynů a lze jej zařadit do skupiny velmi žádoucích odpadů pro opětovné použití při výrobě železa i oceli, neboť takovýto odpad je železonosný. Problém těchto jemnozrnných odpadů spočívá v tom, že obsahují také neželezné těžké kovy (zdraví škodlivé), jako je zinek, olovo, kadmium, což v tomto případě znamená nežádoucí příměs pro další zpracování, které je možné aplikovat až po odstranění těchto nežádoucích složek (kromě těžkých kovů je možné i organické znečištění). [1, 4, 5, 6]

Odpady vznikající při výrobě železa a oceli patří mezi druhotné sekundární suroviny, jež se dále mohou využít nejen pro výrobu surového železa, ale také ve stavebnictví. Je tudíž nutné, aby jednotlivé zbytkové složky odpadů z hutnického průmyslu

byly na základě svého rozmanitého charakteru dále zpracovány a recyklovány – pro další uplatnění v různých procesech výroby. [1, 4]

Hutnické odpady mohou pocházet jak z výroby železných tak i neželezných kovů. Kovy, slitiny kovů a mnohé další metalurgické výrobky se vyrábí především z rud prostřednictvím pyrometalurgie (surové železo, neželezné kovy), hydrometalurgie (neželezné kovy) nebo také elektrometalurgie (neželezné kovy). [7]

2.1.1 Hutnické odpady – obecný přehled z pohledu metalurgie železných a neželezných kovů

V metalurgii se rozlišuje hutnictví železných a neželezných kovů. Tyto procesy bude doprovázet vznik odpadních produktů v plynném, kapalném i tuhém skupenství u jednotlivých výrobních procesů. [1, 7]

Metalurgie železných kovů

Při výrobě surového železa jsou odpadními produkty plynné exhaláty, kdy vzniká *vysokopecní prach*, obsahující Fe (5-40 hm. %), SiO₂ (9-30 hm. %), CaO (7-28 hm. %), MgO (1-5 hm. %), Al₂O₃ (9-15 hm. %), Mn (0,3-1,5 hm. %), P (0,3-1,2 hm. %), C (5-10 hm. %), S (0,1 hm. %), Zn (0-35 hm. %), Pb (0-15 hm. %), zásady (0-20 hm. %) a Cu ve stopovém množství. Dále pak *odpadní vody* obsahující nerozpuštěné látky, kyanidy aj. zdraví škodlivé látky a *tuhé odpady – struska*, o složení SiO₂ (38-40 hm. %), CaO (40 hm. %), MgO (10-12 hm. %), Al₂O₃ (7-8 hm. %). Výroba oceli probíhá v konvertorech, Siemens-Martinských anebo elektrických obloukových pecích. Proces je doprovázen únikem prachu, jenž obsahuje jak oxidy železa, tak také sloučeniny křemíku, manganu, fosforu a hliníku a je také uvolňován SO₂ v případě Siemens-Martinských pecí. Z konvertorů mohou, kromě výše zmíněných látek, unikat také CO a CO₂. Výrobu feroslitin doprovází vznik velmi jemného prachu, který se filtruje v látkových filtrech a obsahuje oxidy křemíku, železa, hliníku a hořčíku. [7]

Metalurgie neželezných kovů

Jedná se o výroby hliníku (základní surovina – bauxit), olova (základní surovina - galenit PbS), výroba mědi (základní surovina – chalkopyrit CuFeS₂), výroba zinku (základní surovina sfalerit, ZnS) a výroba niklu (základní suroviny pro výrobu –

kyslíkaté a sulfidové rudy). Při výrobě *Al* dochází k úletu prachových částic do ovzduší, vzniká i červený kal (využívá se pro výrobu cementu nebo se z něj získává galium), po procesech filtrace vznikají odpadní vody a po elektrolytické výrobě hliníku vznikají plynné exhaláty (sloučeniny fluoru a CO). Výroba *Pb* je doprovázena vznikem odpadních vod po procesu flotace – tato voda, obsahující xantogenany, fenoly, oleje, je čištěna chemickým srážením. I v případě výroby olova unikají plynné exhaláty s obsahem *Pb* a SO_2 . V tomto procesu vzniká jako tuhý odpad struska. Při procesu výroby *mědi* vzniká anodový kal po flotaci, uniká SO_2 (výroba kyseliny sírové) a těžké složky např. (*Pb*, *Sn*), po procesech redukce se vypařuje *Sb* a *As*. I zde při výrobě vzniká jako tuhý odpad struska. Prachové částice jsou odstraněny v suchých elektrických odlučovačích nebo na látkových filtrech. Toto zpracování je podobné i při výrobě zinku. U výroby niklu je škodlivou látkou vznikající oxid siřičitý, tuhý odpad v tomto případě obsahuje až 52 % železa a jedná se o louženec železoničkovité rudy. [7]

2.1.2 Vybrané hutnické odpady – základní členění

Zpracování jemnozrnných železonošných odpadů se řídí několika hledisky:

- chemické složení (výskyt *Fe*, těžkých kovů, příměsí, hlušín, aj.);
- fyzikální vlastnosti (granulometrie, hustota, aj.);
- forma, ve které se odpad vyskytuje (kal, filtrační koláč, aj.);
- místní soustředěnost jemnozrnných odpadů;
- ekonomické hledisko (náklady na manipulaci a zpracování). [5]

Členění odpadů na základě povahy, vznikající v hutních podnicích, lze rozdělit na:

- kovové – navraceny zpět do výrobního procesu (např. kov, slitina, odřezky, odštěpky, aj.);
- kovonosné – obsahují zastoupení chemických prvků v různých formách (tyto prvky mohou být dále předmětem zpracování nebo recyklace);
- nekovové – obvykle obsahují malé zastoupení kovových prvků. [1]

Odpady z výroby železa a oceli se vyskytují v různých formách – souvisí s tím i zachycení a následné zpracování těchto *kovonosných odpadů*, u nichž nejvyšší podíl zastoupení tvoří strusky a jemnozrné železonosné odpady v podobě prachu nebo kalu [4]:

- kaly a úlety z aglomerací a vysokých pecí;
- ocelářenské úlety a kaly;
- okuje a okujové kaly;
- kovonosné podíly z přepracovaných ocelářenských strusek;
- mořirenské kaly;
- kaly z čištění vod;
- odpady z výroby feroslitin. [3, 6]

2.1.3 Vznik a zpracování hutních odpadů

V procesech zpracování železa (při zpracování primárních i sekundárních surovin) vzniká velké množství hutnických odpadů. Jedná se o provozy aglomerace, koksovny, vysoké pece, ocelárny nebo slévárny. Výroba (případně sekundární zpracování) železa a oceli je doprovázena vznikem *odprašků* (prachových úletů) – vznikají z vysokoteplotních procesů v hutích (forma tuhé částice o charakteristickém šedohnědém zbarvení a velmi jemné zrnitosti) a řadí se mezi nebezpečný odpad. Odprašky, které obsahují cca 35-67 % Fe jsou v těchto procesech zachyceny v čistírnách plynu a mohou být i skrápěny – vzniká kal. V této podobě jsou obvykle odprašky uloženy na skládce a kaly uloženy v kalových rybnících. [5, 8, 10]

Odprašek z výroby litiny je suchého a sypkého charakteru. Vzniká v procesu výroby litiny, a to zachycením pevných částic v kupolových pecích a následné kondenzaci a zachycení v elektrostatických odlučovačích. Tento typ odpadu může být znečištěn železnými i neželeznými kovy (převážně se jedná o Zn, Cd, Pb). [11]

Chemické složení *vysokopecních a ocelářenských odprašků* závisí na systému výroby oceli, fyzikálně jsou si jinak tyto materiály podobné a částice odprašků jsou obvykle o velikosti 0,1 mm a menší. Na základě velikosti částic je manipulace s tímto druhem odpadu mnohem složitější. *Vysokopecní a ocelářenské kaly* patří také do kategorie nebezpečných odpadů podle Katalogu odpadů (381/2001 Sb., ve znění pozdějších

předpisů), obsahují těžké kovy, které se v procesu tavení Fe odpařují spolu se zplodinami, nebo se kondenzují na prachových částicích, jež jsou unášené odcházejícími plyny a poté zachyceny v čistících zařízeních. Tyto odpady jsou tvořeny úlomkovitými částicemi magnetitu, hematitu nebo koksu o velikosti až 0,0060 mm. [8, 12]

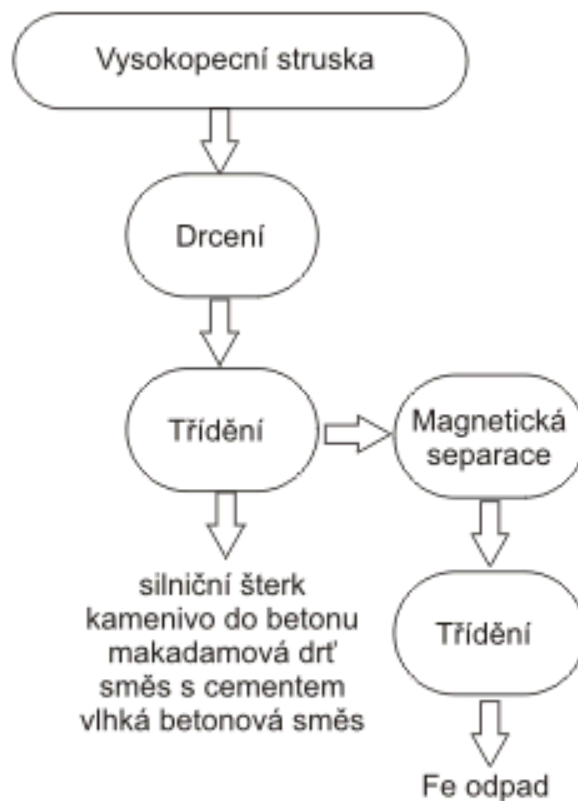
Vysokopecní kaly obsahují, jak již bylo výše zmíněno, těžké kovy - ty mají z části původ v rudních surovinách a z části mají původ ve vsázce, do které se dostanou na základě cirkulace plynné fáze ve vysoké peci. Dochází tak k jejich akumulaci a tím snižují i chod vysoké pece. Především se jedná o akumulaci zinku – jeho podíl (cca 75 – 80 %) odchází spolu s vysokopecním plynem. Plynočistírny pak odstraňují prach z plynu, který je dále podroben suchému a hrubému čištění, při němž se zachycují největší částice v „prašníku“ – tento typ hrubozrnných odprašků je možné recyklovat. Jemné částice se oddělují ve zkrápěných proudových pračkách – skrápěcí voda a zachycený kal je poté podroben separaci v usazovacích nádržích typu DORR a následně jsou tyto kaly skládkovány. [6] Obsah volné vody v kalu se pohybuje kolem 20 – 30 hm. %, po vysušení je získán jemnozrnný materiál s podílem 99 hm. % zrna pod 0,1 mm. [8, 9]

Ocelářenské kaly mají velmi jemné granulometrické složení (v řádech 10 - 100 μm). Chemické složení tohoto typu odpadu závisí především na způsobu výroby oceli a složení vstupní vsázky [11]. Závisí také, z mineralogického hlediska, zdali je převládající složkou železo a další složky, které tvoří magnetit, hematit, úlomky strusky, wüstit, zinek nebo olovo. Ocelářenské kaly mají na rozdíl od vysokopecních kalů kulovitý (zaoblený) tvar. [5, 6]

Struska se může využívat jako plnivo, i když může pocházet z různých hutnických provozů. Jestliže struska vykazuje hydraulické vlastnosti, může být využita jako pojivo ve směsi (musí mít však upravený povrch na 400 m^2/kg a chemismus strusky - poměr $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ větší než 1). Možné využití strusky jako umělého kameniva ve stavebnictví - železoportlandský cement s 30 % strusky se sádrovcem, vysokopecní cement, který obsahuje mezi 40 – 80 % vysokopecní alkalické strusky. Pokud struska obsahuje fosfor, bývá využívána jako hnojivo v zemědělském průmyslu. [1, 12]

Zpracování vysokopeční strusky

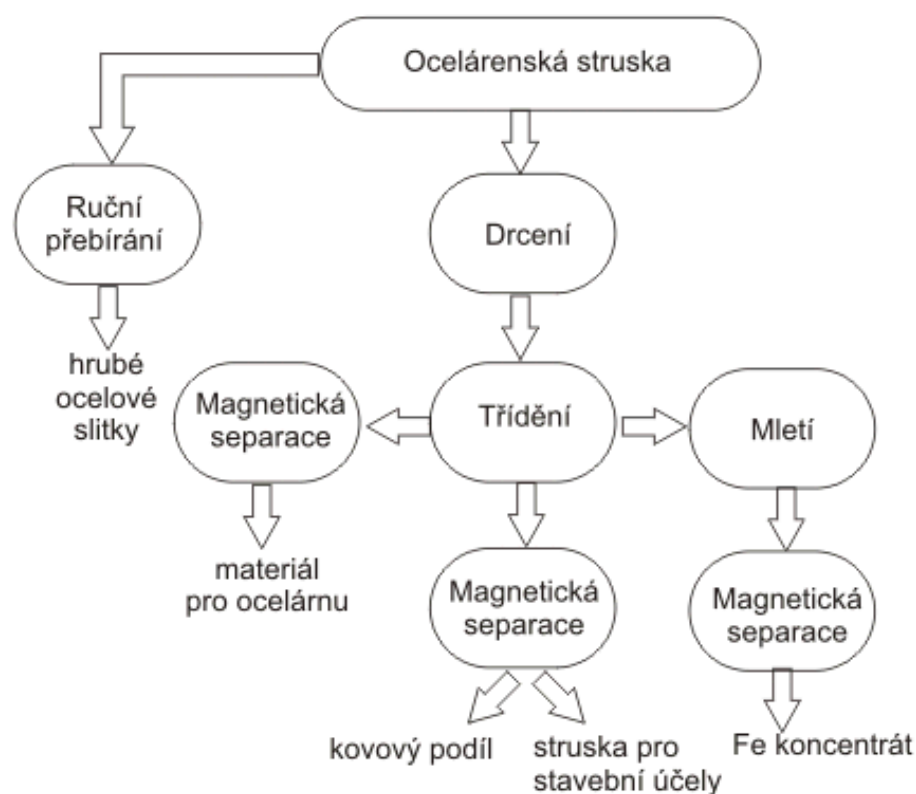
Výsledkem drcení vysokopeční strusky pomocí kladivových nebo čelistových drtičů, třídění a magnetické separace (uvedeno na obrázku 1) vzniká železitý odpad, který je vrácen zpět do metalurgické výroby a další odpad různé zrnitosti. [6] Mezi jiné procesy zpracování vysokopeční strusky je zpěňování pomocí vody, čímž vzniká strusková pěna nebo granulace. Výsledkem pak je tekutá struska vháněná do vody, ve které se roztříští a po usazení je dále ji možné využít i jako stavební materiál.



Obrázek 1 Schéma zpracování vysokopeční strusky [6]

Zpracování ocelářenské strusky

Ocelářenská struska může také podstoupit drcení, třídění, magnetickou separaci a také úpravu mletím. Výsledky jednotlivých procesů úpravy ocelářenské strusky je znázorněno na obrázku 2. Odpadem po těchto úpravách je Fe koncentrát, kovové podíly nebo struska pro stavební účely.

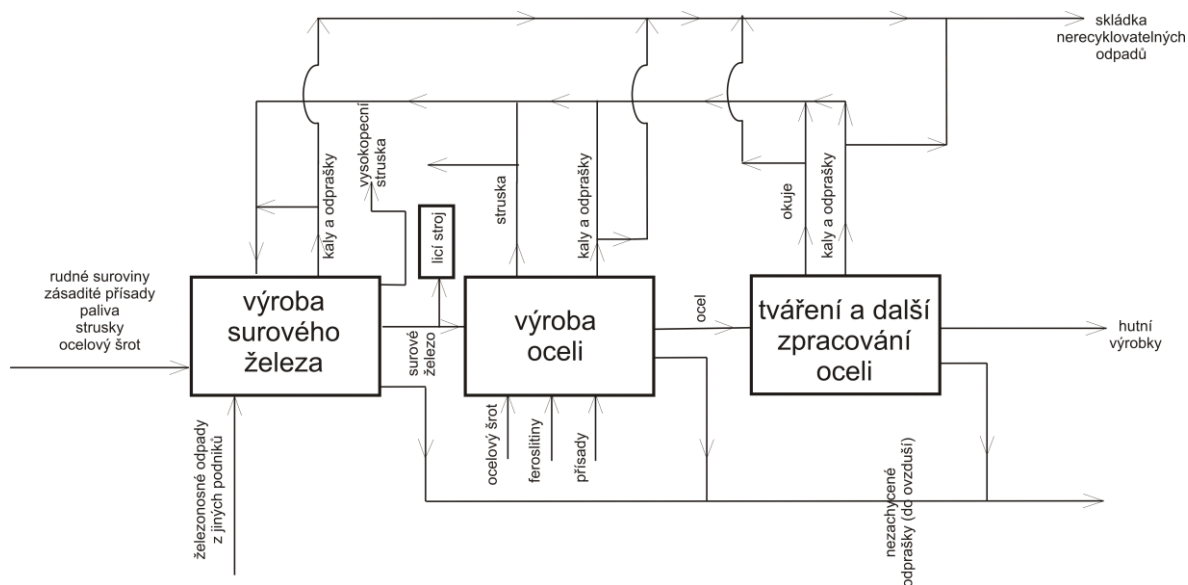


Obrázek 2 Schéma zpracování ocelářenské strusky [6]

Okuje a okujové kaly patří mezi významné kovonosné odpady, které vznikají ohřevem a válcováním oceli. Mají vysoký podíl oxidů železa a nízké podíly příměsí, z čehož vyplývá, že je vhodným materiálem k recyklaci. Zpracovává se na základě druhu, zrnitosti anebo znečištění příměsemi. Okujové kaly – jemné okuje, které jsou v procesu vybírány drapáky, jsou poté odeslány do zpracovatelského závodu (ocelárna) a zpracovávají jako oxidační přísada do pecí. Kaly bývají přečerpávány do sedimentačních nádrží a po procesu sedimentace částic jsou vybírány a sváženy na haldy. [5]

Vysokopecní výhoz s vysokým podílem obsahu uhlíku, patří mezi materiály s hrubým podílem prachu z „prašníků“ vysokých pecí. Granulometrie tohoto odpadu je 75 hm. % zrn pod 0,1 mm. Množství vody je u tohoto odpadu v rozmezí 5 -10 hm. %. Chemické složení vysokopecního výhozu závisí na vsázce – složení a denní množství. [1]

Na následujícím obrázku 3 je přehledně znázorněn základní tok pevných hutních odpadů.



Obrázek 3 Schéma toku hutních odpadů [14]

Kaly z kyslíkových konvertorových oceláren lze rozdělit podle zrnitosti na jemné a hrubé kaly. Jemné kaly mají 95 hm. % prachu pod 0,1 mm a hrubé kaly mají 30 hm. % prachu pod 0,1 mm. Hlavní složka jemných kalů je Fe v kovové formě, které se rychle oxiduje na wüstit. Jemné kaly obsahují mimo jiné také 20 – 30 hm. % volné vody. Hrubé kaly jsou na tom podobně jako jemné kaly – tzn., že hlavní složku tvoří Fe v kovové formě a obsah volné vody činí 20 – 30 hm. %. [1]

Procesu recyklace lze podrobit jen hrubé frakce odpadů, které lze aglomerovat, neboť recyklace jemnozrnných hutních odpadů (odprašky a kaly) by vedla ke zvýšení koncentrace nežádoucích látek v produktech hutní výroby. [1, 8] Následující tabulka 1 pro představu udává složení chemických odpadů v hmotnostních procentech.

Tabulka 1 Chemické složení hutních odpadů [2, 6]

Druh odpadu	Chemické složení odpadů (hm. %)						
	Fe	S	Zn	Pb	Cd	As	Cr
Aglomerační prach	43,1	0,035	0,013	0,066	0,009	0,001	0,01
Vysokopecní výhoz	38,8	0,33	0,03	0,01	0,0004	0,001	0,15
Vysokopecní kal	35,3	0,47	0,52	0,13	0,015	0,001	0,017
Hrubé kaly KKO	82,1	0,052	0,073	0,02	0,0006	0,001	0,063
Jemné kaly KKO	63	0,14	0,38	0,06	0,0015	0,002	0,06
Odprašky S-M pecí	17,5	3,05	14,5	2,63	0,18	0,014	0,11
Okuje čisté	72	0,041	0,004	0,006	0,0007	0,002	0,07
Okuje zaolejované	69,8	0,062	0,014	0,012	0,0008	0,002	0,07

2.1.4 Úpravnické procesy zpracování hutních odpadů

Procesy jsou založené na odlišných fyzikálních nebo fyzikálně – chemických vlastnostech složek surovin u vysokopecních/ocelářenských prachů a kalů. Mezi metody zpracování se řadí gravitační rozduřování (využití hydrocyklonu), magnetická separace, popř. také flotace. Provozní problematika gravitačního rozduřování v hydrocyklonech a následně i magnetického rozduřování kalů, spočívá především v rozdílném granulometrickém složení zpracovávaných kalů, i přesto se pro nakoncentrování neželezných kovů do jednoho produktu dají tyto metody využívat. Pro jemnozrné ocelářenské odpady není dekontaminace pomocí hydrocyklonu vhodná na základě velmi jemné granulometrie těchto odpadů, distribuci Zn a Pb a přítomnosti Zn ve formě feritů – zde se doporučuje využívat jednu z následujících pyrometalurgických nebo hydrometalurgických metod. [6]

2.1.5 Pyrometalurgické a hydrometalurgické zpracování hutních odpadů

Recyklace v případě hutnických odpadů se uskutečňuje prostřednictvím pyrometalurgických a hydrometalurgických procesů. Předstupněm těmto recyklačním procesům je však nutné u jemnozrných hutních odpadů vysokopecními (ocelářskými) procesy dekontaminovat přítomné neželezné kovy (především se jedná o zinek a olovo). Po této dekontaminaci je možné dále podrobit tyto odpady pyrometalurgickým a hydrometalurgickým procesům. [6]

Pyrometalurgické procesy

Účinnost pyrometalurgických procesů je závislá přímo na vazbě zinku, kadmia a dalších neželezných kovů v jemnozrných hutních odpadech. Procesy zpracování těchto jemnozrných hutních odpadů pyrometalurgicky se dělí na dva základní způsoby redukční a chloridační. [2,3]

a) redukční procesy

- dochází k redukci oxidů železa a k odpaření těkavých oxidů neželezných kovů (podstata je v co nejlepším a nejrychlejším oddělení železa od neželezných kovů) z jemnozrných hutnických odpadů;

- využívají se při tom Siemens-Martinské pece nebo Waelzovy rotační pece, ocelářské kyslíkové konvertory, elektrické obloukové nebo plazmové pece;
- procesy s vnějším redukovadlem (zkusování odpadů a následné vypalování např. v rotační peci, redukovadlem může být černé nebo hnědé uhlí) nebo procesy s vnitřním redukovadlem (zkusování odpadů spolu s redukovadlem – práškový koks a následné vypalování např. v šachtové peci. [6]

b) chloridační procesy

- založeno na tvorbě chloridů těžkých kovů z jejich oxidů nebo sulfidů;
- využíváno u surovin s obsahem nežádoucích neželezných kovů;
- proces peletizace původní suroviny s pevným chloridačním činidlem (CaCl_2) – dochází k vypalování pelet v šachtové/rotační peci při 1200 - 1300°C;
- proces peletizace jemnozrnných hutních odpadů a jejich následné oxidační vypalování – po výpalu jsou pelety vystaveny působení plynného chloru. [3, 6]

V oblasti pyrometalurgických procesů vznikla celá škála technologických procesů a zpracování jemnozrnných hutnických odpadů. Patří mezi ně např. proces Wälz, INMETCO, Lurgi, REDSMELT a mnohé jiné. [6]

Hydrometalurgické procesy

Procesy založené na loužení – získávání kovů, rud, koncentrátů a odpadů. Principem je „převedení určitého kovu do roztoku selektivním loužením původního materiálu vodným roztokem chemické reagentie a následným vyloučením rozpuštěného kovu v kovové formě nebo ve formě sloučeniny“ [6]. V hydrometalurgických procesech je možné využívat k vyluhování zinku amoniakální, kyselinové loužení anebo loužení v roztoku. Stejně jako u pyrometalurgických procesů i zde vznikli technologické procesy, mezi něž patří proces ZINCEX nebo EZINEX. [6]

Pro představu je v následující tabulce uvedeno jednotlivé zastoupení železa a neželezných prvků v hmotnostních %. I přes viditelně nízké podíly Zn, Pb a Cd, je nutné

tyto nežádoucí prvky z hutnických odpadů selektovat a tím je dekontaminovat pro další zpracování.

2.1.6 Produkce odpadů pocházející z výroby železa a oceli

Vzhledem k vybraným materiálům v praktické části (kaly a odprašky) této práce bylo pro demonstraci problematiky hutnických odpadů vybrána skupina odpadů pocházející z tepelných procesů – odpadů ze zpracování železa a oceli. Podle *Katalogu odpadů* (Příloha č. 1 vyhlášky MŽP ČR 381/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů) se jedná o:

10 Odpady z tepelných procesů

10 02 Odpady z průmyslu železa a oceli

10 02 01 Odpady ze zpracování strusky

10 02 02 Nezpracovaná struska

10 02 07* Pevné odpady z čištění plynů obsahující nebezpečné látky

10 02 08 Jiné pevné odpady z čištění plynů neuvedené pod číslem 10 02 07*

10 02 10 Okuje z válcování

10 02 11* Odpady z čištění chladicí vody obsahující ropné látky

10 02 12 Jiné odpady z čištění chladicí vody neuvedené pod číslem 10 02 11*

10 02 13* Kaly a filtrační koláče z čištění plynu obsahující nebezpečné látky

10 02 14 Kaly a filtrační koláče z čištění plynu neuvedené pod číslem 10 02 13*

10 02 15 Jiné kaly a filtrační koláče

10 02 99 Odpady jinak blíže neurčené. [13]

Produkce *odpadu ze zpracování strusky* v roce 2006 činila 663 830,58 t, v porovnání s rokem 2010 je toto množství sníženo na 2 176,048 t (v podstatě dáno útlumem průmyslu v této oblasti po celé ČR). V tomtéž roce bylo 1 188,76 t tohoto odpadu

recyklováno a na skládky bylo uloženo 722,75 t. *Nezpracovaná struska* a její produkce v roce 2006 byla 269 521,485 t, v roce 2010 toto množství kleslo na 140 099,928 t.

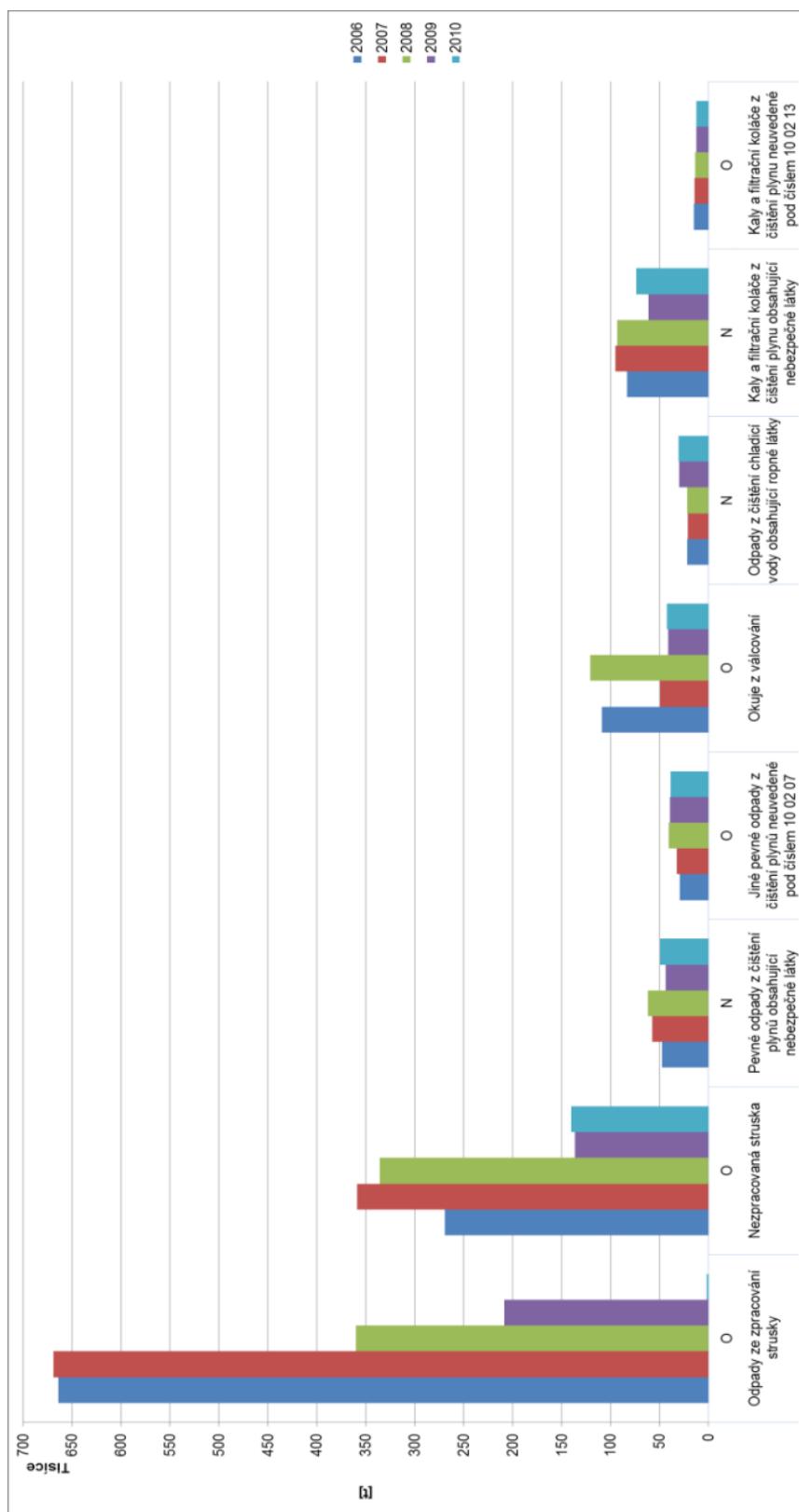
Pevných odpadů z čištění plynů obsahující nebezpečné látky bylo v roce 2006 vyprodukováno 47 617,402 t, rok 2010 měl překvapivě vyšší hodnotu produkce 49 312,886 t tohoto odpadu. Zároveň bylo recyklací/znovuzískání kovů zpracováno 37 920 t. Fyzikálně chemickou úpravou se snížila produkce odpadů o 6 816,72 t. Produkce *jiných pevných odpadů z čištění plynů neuvedených pod číslem 10 02 07** činila 29 279,76 t v roce 2006 a v roce 2010 bylo již množství produkce těchto odpadů navýšeno na 38 755,243 t, z čehož recyklací/znovuzískání kovů podstoupilo 38 056,226 t těchto odpadů.

Produkce odpadů - *okují z válcování* pro rok 2006 byla 109 153,121 t, pro rok 2010 naopak pokles 42 606,353 t. Recyklací/znovuzískání kovů se v roce 2010 využilo 29 637,688 t z produkce těchto odpadů.

Opadů z čištění chladicí vody obsahující ropné látky bylo v roce 2006 produkováno 21 868,168 t, rok 2010 zaznamenal zvýšenou hodnotu produkce těchto odpadů 30 722,54 t. Recyklací/znovuzískáním kovů v tomtéž roce se snížila hodnota produkovaných odpadů o 14 505 t.

Produkce *kalů a filtračních koláčů z čištění plynu obsahující nebezpečné látky* v roce 2006 činila 83 516,31 t, v roce 2010 byla produkce odpadů snížena - 74 132,62 t. Recyklací/znovuzískáním kovů byla hodnota produkce snížena o 16 652 t. Množství odpadů u *kalů a filtračních koláčů z čištění plynu neuvedené pod číslem 10 02 13** bylo v roce 2006 produkováno 15 270,35 t a v průběhu dalších let ve stejné míře. Rok 2010 zaznamenal produkci 12 596,33 t tohoto odpadu.

V následujícím grafu 1 jsou znázorněny produkce některých výše jmenovaných odpadů za posledních pět let (2006 - 2010).



Graf 1 Produkce odpadů z výroby Fe a oceli 2006 – 2010 [14]

2.2 Magnetické vlastnosti látek

Magnetismus patří mezi vědní obor, do kterého spadají veškeré magnetické jevy. [15] Z hlediska magnetismu se mohou materiály členit na:

- diamagnetika
 - platí $\kappa < 0, \mu_r < 1$, velmi malá a negativní susceptibilita κ v rozmezí od -10^{-6} do -10^{-3} ;
- paramagnetika
 - platí $\kappa > 0, \mu_r > 1$, typická susceptibilita κ v rozmezí 10^{-6} až 10^{-1} ;
- feromagnetika, platí $\kappa \gg 0, \mu_r > 1$;
- ferimagnetika. [16,17]

kde: κ ... susceptibilita látek (viz 2.2.1)

μ_r ... relativní permeabilita (viz 2.2.1)

Všechny skupiny výše uvedených materiálů a jejich vlastnosti jsou podrobněji probrány a zmíněny v podkapitole 2.2.2 a 2.2.3 včetně modelového znázornění vnitřního magnetismu látky a magnetické indukce.

2.2.1 Základní magnetické veličiny

Mezi základní magnetické veličiny se vztahuje relativní permeabilita prostředí μ_r , pro niž platí vztah (1). Permeabilita prostředí μ je vyjádřena jakou součin relativní permeability μ_r a permeability vakua μ_0 (2).

$$\mu_r = 1 + \kappa_m \quad (1)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2)$$

Magnetická indukce B (jednotka Tesla) jako další základní magnetická veličina je vyjádřena vztahem (3) a je dána součinem permeability prostředí μ a intenzity magnetického pole H (jednotka $A \cdot m^{-1}$).

$$B = \mu \cdot H \text{ jednotka [T]} \quad (3)$$

Dále může platit (pro feromagnetika) také vztah $B = \mu \cdot (H + M)$.

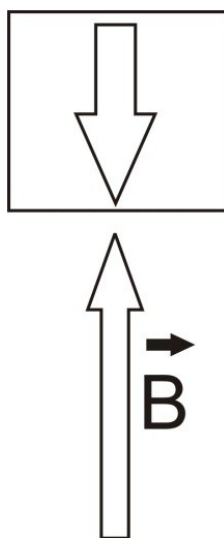
Magnetizace (4) je dána podílem magnetického momentu m (jednotka $A \cdot m^2$) a objemu V (jednotka m^3). Jednotkou magnetizace je $A \cdot m^{-1}$. Susceptibilita materiálu κ je definována vztahem (5) jako podíl magnetizace M a magnetického pole H . [17]

$$M = \frac{m}{V} \text{ jednotka } [A \cdot m^{-1}] \quad (4)$$

$$\kappa = dM/dH \text{ bezrozměrná jednotka} \quad (5)$$

2.2.2 Para-, dia-, fero- a ferimagnetické látky

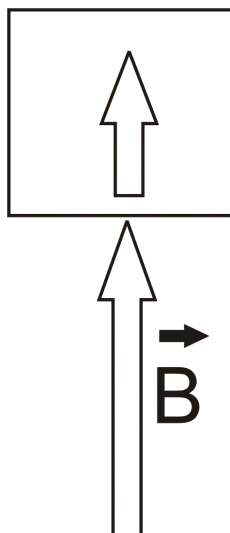
Diamagnetická látka – diamagnetiky označujeme látky, které vykazují pouze diamagnetismus. Tento jev lze vysvětlit tak, že když tuto látku umístíme do vnějšího magnetického pole – je v ní posléze vyvolán magnetický dipólový moment, který má opačný směr než vnější magnetické pole (viz obrázek 4). Vnitřní magnetismus látky se tedy pohybuje proti siločarám magnetické indukce. U těchto látek nezávisí magnetická susceptibilita, na rozdíl od paramagnetika, na intenzitě magnetického pole ani na teplotě. [15]



Obrázek 4 Diamagnetický materiál - modelové znázornění vnitřního magnetismu látky a vnější magnetické indukce

Paramagnetická látka – paramagnetiky označujeme látky, které vykazují pouze paramagnetismus. Paramagnetismus se vyskytuje u látek, jež obsahují přechodové prvky nebo prvky vzácných zemin. Stejně jako u diamagnetických látek – pokud takovouto látku umístíme do vnějšího magnetického pole, vytváří se v ní magnetický dipólový moment,

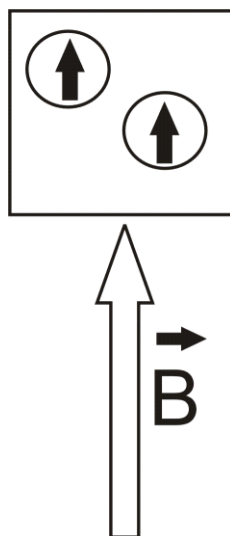
avšak na rozdíl od diamagnetika je ve směru siločár magnetické indukce (viz obrázek 5). Magnetická susceptibilita závisí v tomto případě na teplotě a s rostoucí teplotou klesá, vlivem tepelného pohybu atomů. Tepelný pohyb atomů oslabuje magnetický moment paramagnetika. [18]



Obrázek 5 Paramagnetický materiál - modelové znázornění vnitřního magnetismu látky a vnější magnetické indukce

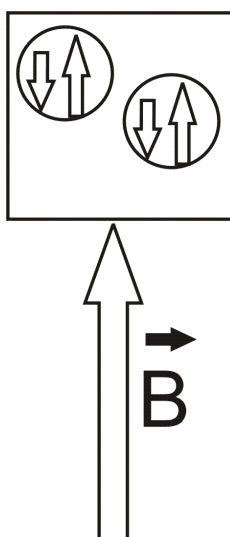
Látky jako diamagnetika a paramagnetika jsou magnety, které mají dočasné a slabé magnetické vlastnosti. Pokud zmizí magnetické pole, paramagnetikum se nadále nechová jako magnet. Toto neplatí u následujících feromagnetických a ferimagnetických látek.

Feromagnetická látka – je látka, která se vykazuje silným permanentním magnetismem. Mezi tyto feromagnetismus vykazující látky patří především železo, kobalt a nikl. [18] U feromagnetických látek dochází ke kolektivnímu chování atomů – vytvoření doménové struktury (viz obrázek 6). Pokud na tyto látky začne působit vnější magnetické pole (zvyšuje se intenzita magnetického pole), dochází tak ke změně uspořádání domén - magnetizaci materiálu. [18, 19]



Obrázek 6 Feromagnetický materiál - modelové znázornění vnitřního magnetismu látky a vnější magnetické indukce

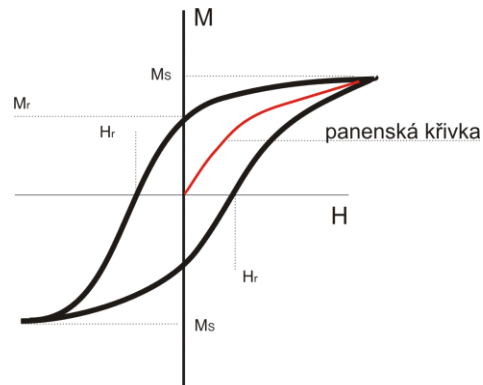
Ferimagnetická látka – u těchto látek dochází také k samovolné lokální (doménové) magnetické polarizaci, aniž by působilo vnější magnetické pole. Pokud zvýšíme teplotu, může tato látka přejít z ferimagnetismu do paramagnetismu. Mezi ferimagnetické látky, které spadají do této skupiny feritů (mohou být magneticky měkké i magneticky tvrdé), patří oxidy železa a jiných kovů. [15] U těchto látek dochází k tvorbě domén, avšak část domény je ve směru pole a část proti směru magnetické indukce \vec{B} (viz obrázek 7).



Obrázek 7 Ferimagnetický materiál - modelové znázornění vnitřního magnetismu látky a vnější magnetické indukce

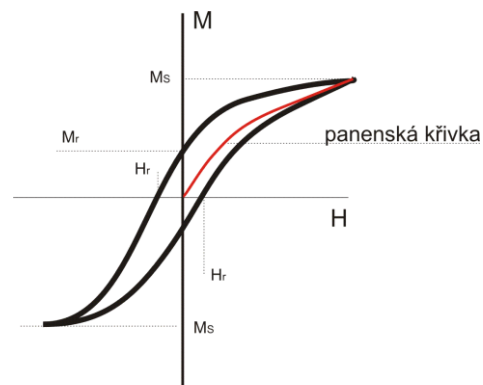
2.2.3 Magnetizační křivka

Magnetizační křivka je středově souměrná funkce a vyjadřuje závislost magnetizace na vnějším magnetickém poli. Níže jsou uvedeny dva typy hysterezních křivek (obrázek 8 a 9), znázorňující *magneticky tvrdé* („široká“ hysterezní křivka) a *magneticky měkké* („úzká“ hysterezní křivka) materiály. Hystereze je vyjádřena jako nevratnost polarizačních procesů [15].



Obrázek 8 MK pro magneticky tvrdé materiály [18]

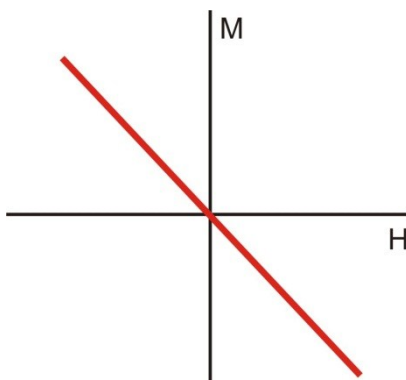
Mezi magneticky tvrdé materiály s širokou hysterezní křivkou patří např. permanentní magnety - naopak magneticky měkké materiály s úzkou hysterezí se používají v obvodech střídavého proudu. [20] „Panenská křivka“ v tomto případě znázorňuje prvotní magnetizaci, při níž dochází k nasycení látky [15, 20] Saturační magnetizace M_S označuje bod, kdy látku nelze dále zmagnetizovat a zbytková magnetizace M_r je magnetizace při $H = 0$. Magnetické pole H_r odpovídá velikosti vnějšího pole, které je schopno vynulovat magnetizaci látky.



Obrázek 9 MK pro magneticky měkký materiál [18]

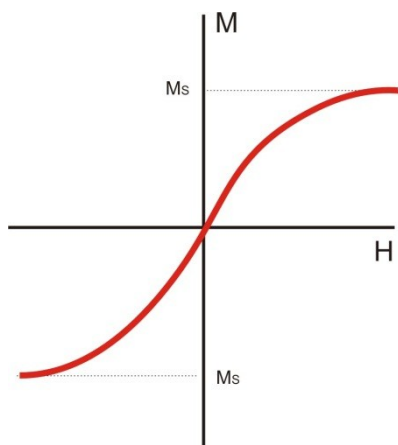
Pozn.: Následující grafy jsou obecným znázorněním závislosti magnetizace M na intenzitě magnetického pole H .

U diamagnetických látek je magnetizační křivka znázorněna na obrázku 10. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.2.2, u těchto látek dochází k zeslabení vnějšího magnetického pole.



Obrázek 10 MK pro diamagnetický materiál [18]

Magnetizační křivka (obrázek 11) paramagnetických látek nabývá saturační magnetizace M_s , tzn., že látku nelze dále magnetizovat.



Obrázek 11 MK pro paramagnetický materiál [18]

V následující tabulce 2 jsou uvedeny pro přehlednost základní fyzikální vlastnosti pro silně magnetické materiály jako je železo, kobalt a nikl.

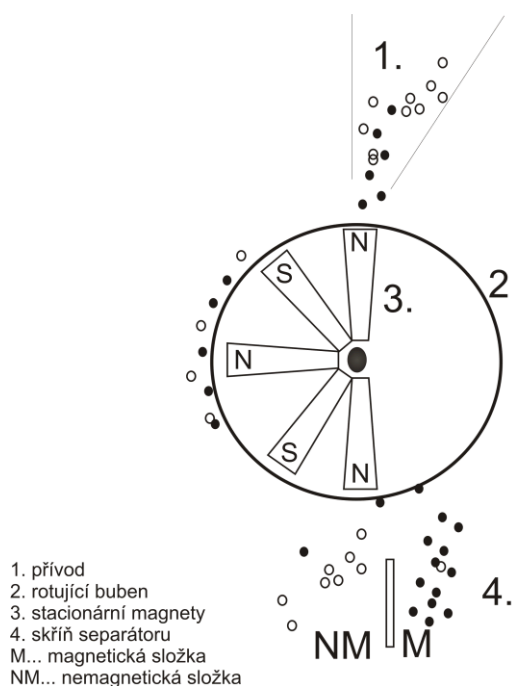
Tabulka 2 Základní vlastnosti pro magnetické látky [21]

	Jednotka	Fe	Ni	Co
M_S při 20°C	[A/m]	$1710 \cdot 10^3$	$485 \cdot 10^3$	$1431 \cdot 10^3$
T_C	[°C]	770	358	1121
H_r	[A/m]	30	1500 - 100	70 - 10
μ_r	[-]	5000	600	80 - 200
κ	[-]	3000	3000	3000

Pozn.: M_S (saturační magnetizace), T_C (Curierova teplota), H_r (zbytkové magnetické pole), μ_r (relativní permeabilita) a κ (susceptibilita).

2.3 Magnetická separace

Podstatou procesu magnetické separace jsou rozdílné magnetické vlastnosti separovaných látek – jde o rozdělení na složku *užitkovou* a *odpadní* neboli na *magnetické* a *nemagnetické* podíly. [22] Na Obrázku 12 je znázorněn základní princip magnetické separace pomocí magnetického bubnového separátoru (separace probíhající za sucha).



Obrázek 12 Základní princip suché bubnové separace [23]

Při tomto typu separací hrají důležitou roli vlastnosti rozdrůžovaných látek jako je magnetická vodivost (magnetizace látek), magnetická permeabilita a magnetická susceptibilita (viz 2.2.1). [24] Po přívodu materiálu k bubnu separátoru začíná na separovaný materiál působit magnetický systém. V tomto uvedeném případě setrvává

separovaný magnetický materiál (v závislosti na jeho vlastních magnetických vlastnostech) v prostředí kolem magnetického systému až do oblasti za přepážku, kde je sveden do shromažďovacích nádob pro magnetické podíly. Nemagnetické materiály, na které nepůsobí magnetický systém separátoru, jsou shromažďovány v zásobnících pro nemagnetické podíly.

2.3.1 Magnetické separátory – přehled

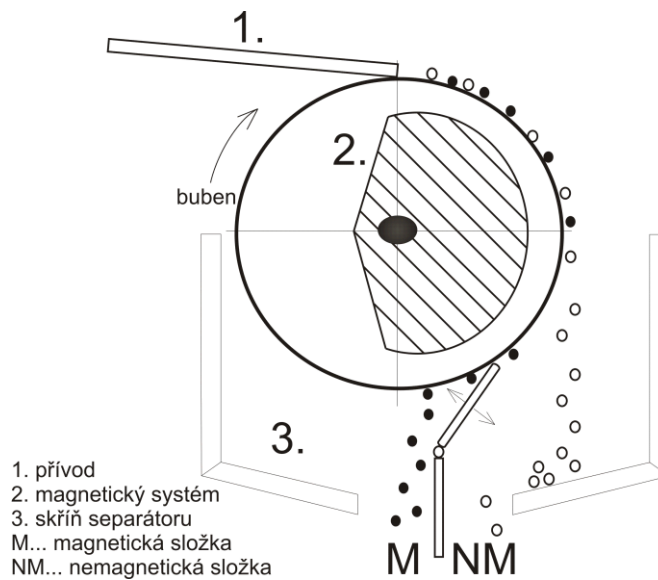
Charakteristický znak magnetických separátorů je ten, že se v procesu magnetické separace vytváří v jejich pracovní zóně magnetické pole. Separované (rozduřované) materiály se v tomto procesu rozdílně pohybují, jak již bylo zmíněno v kap. 2.3, podle svých magnetických vlastností, a tím se docílí separace na magnetické a nemagnetické podíly. Na rozduřované materiály působí kromě magnetických sil také síla gravitační, odpor prostředí a odstředivá síla. [25]

Znamená to, že u magnetických separátorů je nutné dodržet podmínky pro *magnetickou složku* (přitažlivé magnetické síly jsou větší než síly mechanické, které působí na separované částice) a pro *nemagnetickou složku* (přitažlivé magnetické síly jsou menší než síly mechanické). [25]

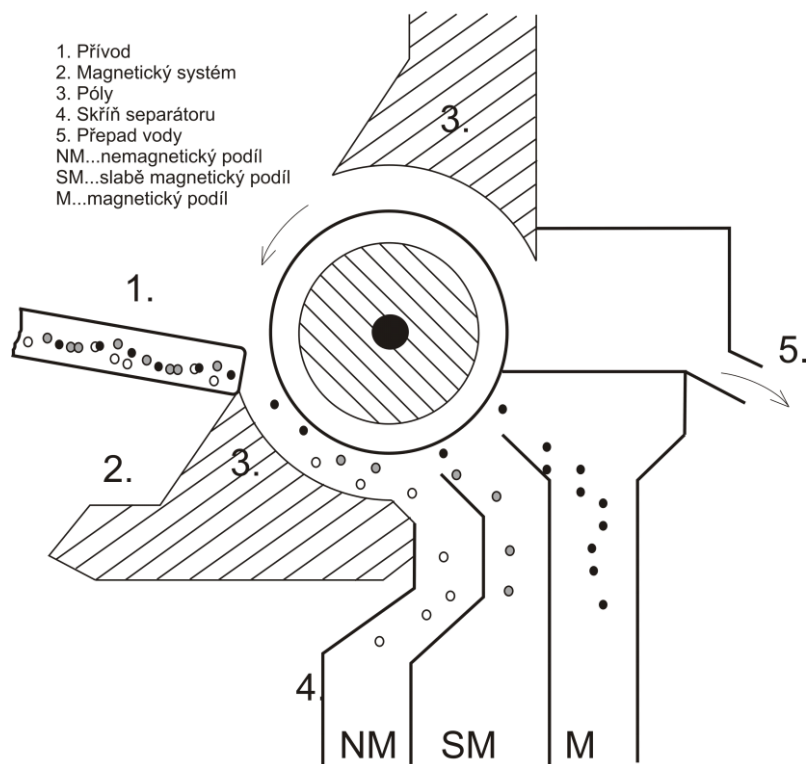
V následující tabulce 3 jsou přehledně členěny magnetické separátory podle intenzity magnetického pole na nízkointenzitní a vysokointenzitní. Dále pak v závislosti na prostředí, ve kterém probíhá separace (vzduch/voda), podle způsobu přívodu separovaného materiálu, konstrukce, a v neposlední řadě je v tabulce doporučena použitelnost pro materiály dané granulometrie.

Tabulka 3 Základní rozdělení magnetických separátorů [22]

$H < 100\ 000$ až $130\ 000$ A/m	Nízkointenzitní magnetické separátory (rozdružovače)				
	Zpravidla otevřený magnetický systém (magnetické póly jsou umístěné na obvodu bubnu nebo v rovině vedle sebe)				
Rozdružovací prostředí	Vzduch		Voda		
Způsob přívodu	Přívod shora		Přívod zespodu		
	Deviační rozdružovače		Extrakční rozdružovače		
Konstrukce	MR suché, bubnové s pomalými otáčkami <i>Obrázek 13</i>	MR suché, bubnové s větším počtem otáček	MR mokré, bubnové i mokré pásové; indukční válečkové mokré	MR mokré, bubnové	MR mokré, bubnové i mokré pásové; (indukční válečkové mokré)
Použitelnost	Silně magnetický produkt (<100 mm)	Silně magnetický produkt (<5 mm)	Silně až středně magnetický produkt (<6 mm)	Silně magnetický produkt (<6 mm)	Silně magnetický produkt (<0,2 mm)
$H = 480\ 000$ až $2\ 000\ 000$ A/m	Vysokointenzitní magnetické separátory (rozdružovače)				
	Zpravidla uzavřený magnetický systém (magnetické póly jsou umístěné proti sobě)				
Rozdružovací prostředí	Vzduch		Voda		
Způsob přívodu	Přívod shora	Přívod zespodu	Přívod zespodu	Přívod shora	Přívod shora
	Deviační rozdružovače	Extrakční rozdružovače	Extrakční rozdružovače	Deviační rozdružovače	Přerušovaný zachycovací rozdružovač
Konstrukce	MR válečkové indukční	MR s příčnými pásy, rozdružovače kotoučové indukční	MR indukční válečkové; MR mokré indukční válečkové; MR mokré kotoučové <i>Obrázek 14</i>	MR mokré indukční	Polygradientní magnetické rozdružovače (žebrovitá výplň - magnetická tělíska)
Použitelnost	Slabě magnetický produkt (<10 mm)	Slabě magnetický produkt (<5 mm)	Slabě až středně magnetický produkt (<5 mm)	Slabě magnetický produkt (<5 mm)	Slabě magnetický jemnozrnný produkt (<0,2 mm)



Obrázek 13 Schéma magnetické separace na magnetickém bubnovém separátoru (suchý s horním přívodem) [22]



Obrázek 14 Schéma indukčního válečkového separátoru (mokrý se spodním přívodem - extrakční) [22]

2.3.2 Magnetické separátory – firmy v ČR

Na českém trhu se vyskytují více či méně známé firmy, které se zabývají výrobou zařízení pro magnetickou separaci s širokým polem působnosti (od potravinářského průmyslu až po těžký průmysl). Jedním ze známých výrobců magnetických separátorů k separaci kovů z proudu sypkých materiálů i tekutin pro využití v těžkém průmyslu je JELÍNEK - TRADING spol. s r. o. Mezi jejich produkty patří kromě zmíněných separátorů (bubnový, potrubní, rotační, automatický) také výsuvné magnetické rošty, magnety nad dopravníky anebo magnetické bubny. [26]

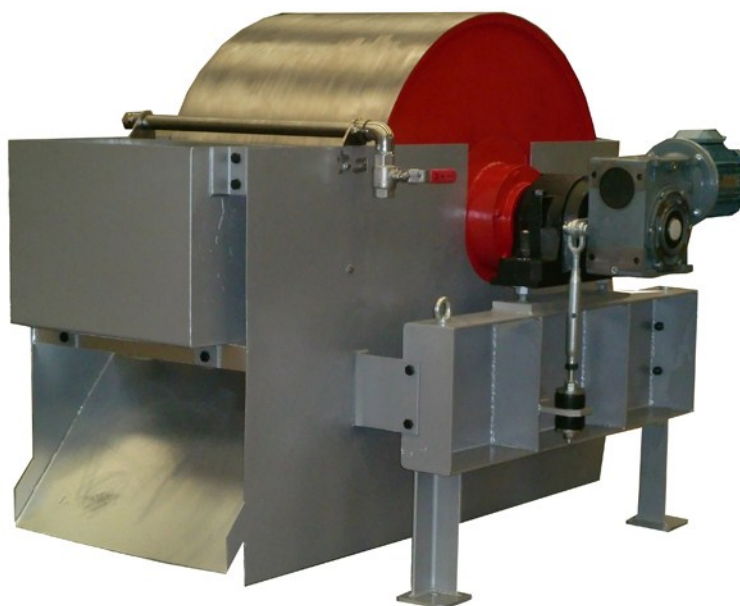
WAMAG, spol. s r.o. je další společností působící na českém trhu v oblasti výroby a distribuce magnetických separátorů. Produkty sloužící k magnetické separaci společnost WAMAG člení na několik typů: statické – bez čistícího pásu, samočistící – umístění nad dopravníkovými pásy a podélné samočistící, které jsou umístěné až na koncích dopravníkových pásů. Magnetické systémy se speciálním tvarem magnetického pole (feritové magnety) zaručují, v případě společnosti WAMAG, dostatečně velkou sílu ve značné vzdálenosti od povrchu separátoru. [27]

ADREMOT Technologies, spol. s r.o. je společnost působící na Ostravsku již 14 let a významným výrobcem a specialistou na dodávky všech druhů permanentních magnetů i magnetických systémů - magnetické separátory pro sypké materiály, kaskádové magnetické separátory, magnetické separátory pro tekuté směsi, bubnové magnetické separátory, pásové separátory nad dopravníkové pásy a separátor neželezných kovů. [28]

Poslední ze zde uvedených společností vyrábějící magnetické i elektromagnetické separátory je společnost sídlící ve Slavkově u Brna - PROFIMAGNET s.r.o. Jejimi produkty jsou již zmíněné elektromagnetické separátory – přepadový (Obrázek 15) nebo ručně čistěný, a také permanentní elektromagnetické separátory – např. mokré magnetické separátory (Obrázek 16), magnetický bubnový separátor, aj. [29]



Obrázek 15 Elektromagnetický přepadový separátor [29]



Obrázek 16 Mokrý magnetický separátor [29]

3. Praktická část

Praktická část diplomové práce je zaměřena na čtyři vybrané druhy velmi jemnozrnných odpadů z hutnického průmyslu – kaly pocházející z Třince, kaly z kyslíkových konvertorů (KK), odprašky z litiny a odprašky z elektrických obloukových pecí (EOP). Tato část se zmiňuje také o chemickém a mineralogickém složení, především kalů z KK, odprašků z výroby litiny a odprašků z EOP.

Na základě naměřených magnetických vlastností u všech čtyř zkoumaných jemnozrnných odpadů, se na konci praktické části modeluje průběh mokré magnetické separace, probíhající podle granulometrie.

3.1 Metody práce a materiál

Metody práce

V rámci přípravy všech čtyř materiálů proběhlo seznámení se zařízením, na němž proběhlo samotné měření – *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*, který patří mezi snadno použitelné magnetometrické přístroje. Toto VSM zařízení poskytuje velice přesné magnetické měření magnetických momentů, koercivity tenkých filmů nebo magnetických vlastností kapalin, [30] popř. pro účely této práce - přesné magnetické měření jemnozrnných prášků v podobě kalů a odprašků.

Kromě seznámení se se samotným VSM proběhlo také krátké školení se softwarem k VSM a následná kalibrace přístroje a zadání příslušných receptů pro měření práškových materiálů umístěných do kyvetek. Měřené materiály jsou podrobně probrány v následující části práce. Veškeré výpočty vyplývající z tohoto měření prostřednictvím VSM byly provedeny pomocí programu Excel, fitování naměřených dat pocházejících z průběhů magnetizace jednotlivých materiálů pak pomocí programu Matlab.

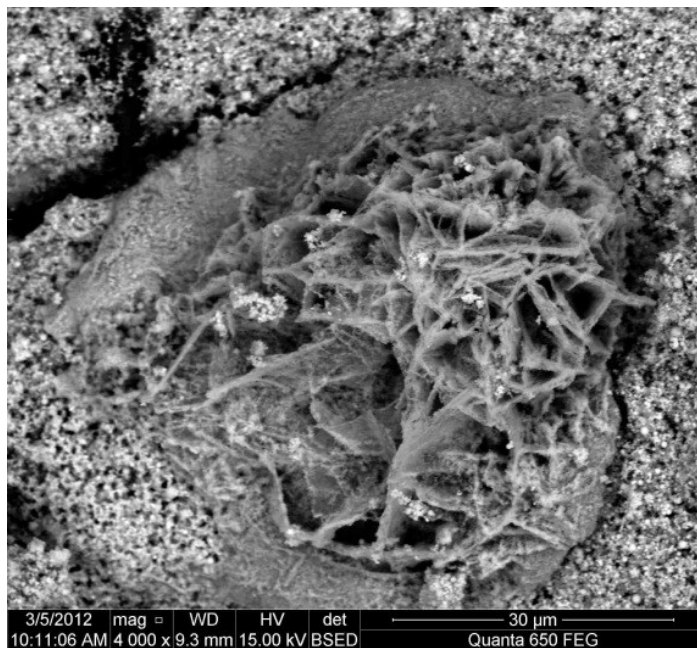
Materiál

Materiály pro účely této diplomové práce poskytl pan *doc. Ing. Botula Jiří, Ph.D.* (kaly pocházející z Třince) a paní *prof. Ing. Seidlerová Jana, CSc.* (kaly z kyslíkových konvertorů, odprašky z výroby litiny a odprašky z elektrických obloukových pecí).

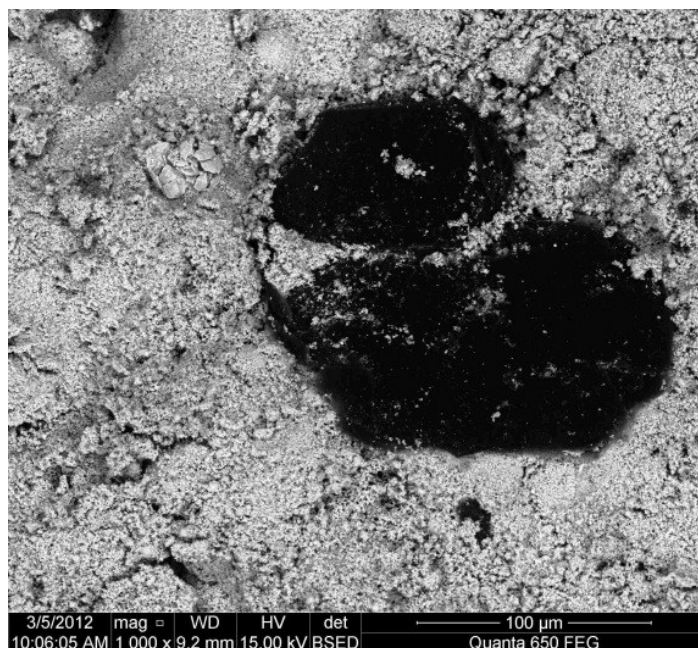
Kal pocházející z TŽ Třinec

Kaly pocházející z TŽ Třinec (dále jen kal z Třince) poskytl, jak již bylo uvedeno, pan doc. Ing. Jiří Botula, Ph.D. Jedná se o jemnozrný kal s různým zastoupením prvků (graf 2, str. 30) – magnetického i nemagnetického charakteru. Na následujících obrázcích (17, 18) je patrná jemnozrná struktura kalu. Fotografie a RTG difrakce kalu z Třince byly vyhotoveny prostřednictvím elektronového mikroskopu panem Dr. Ing. Daliborem Matýskem.

Pozn.: Na následujících fotografických snímcích v této diplomové práci (obrázky 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24 a 25) je patrné, že není možné rozlišit jednotlivé nanočástice, neboť se jedná o shluky velmi malých částic.

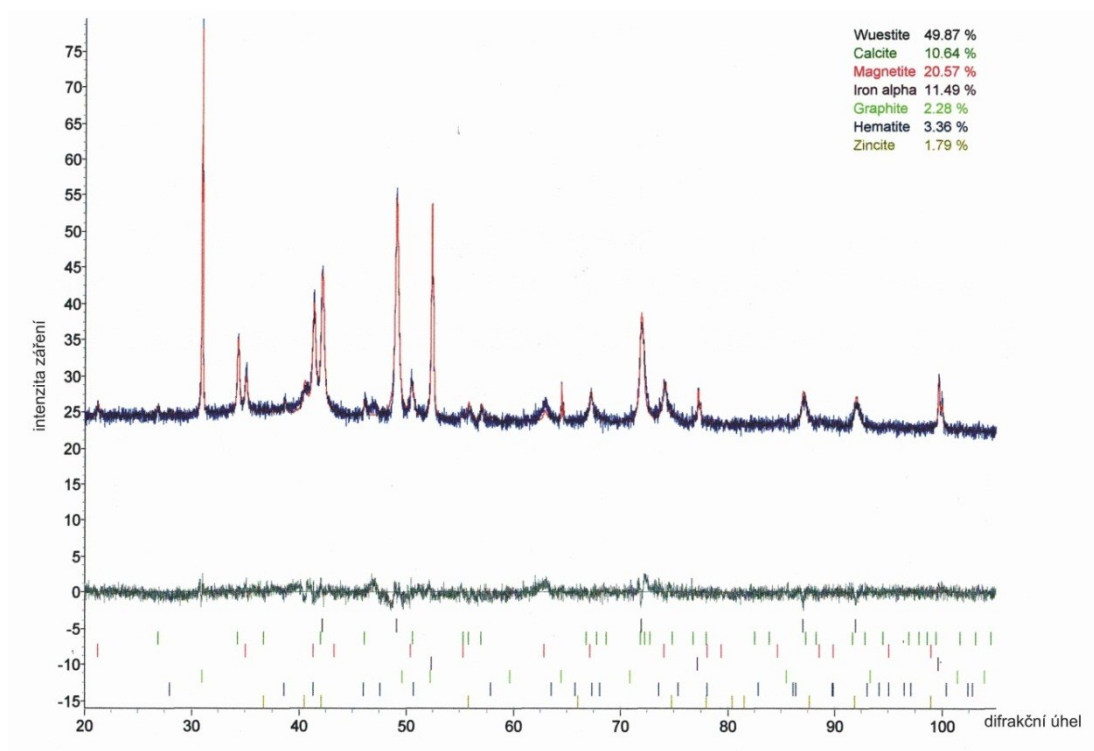


Obrázek 17 Kal z Třince 30 μm



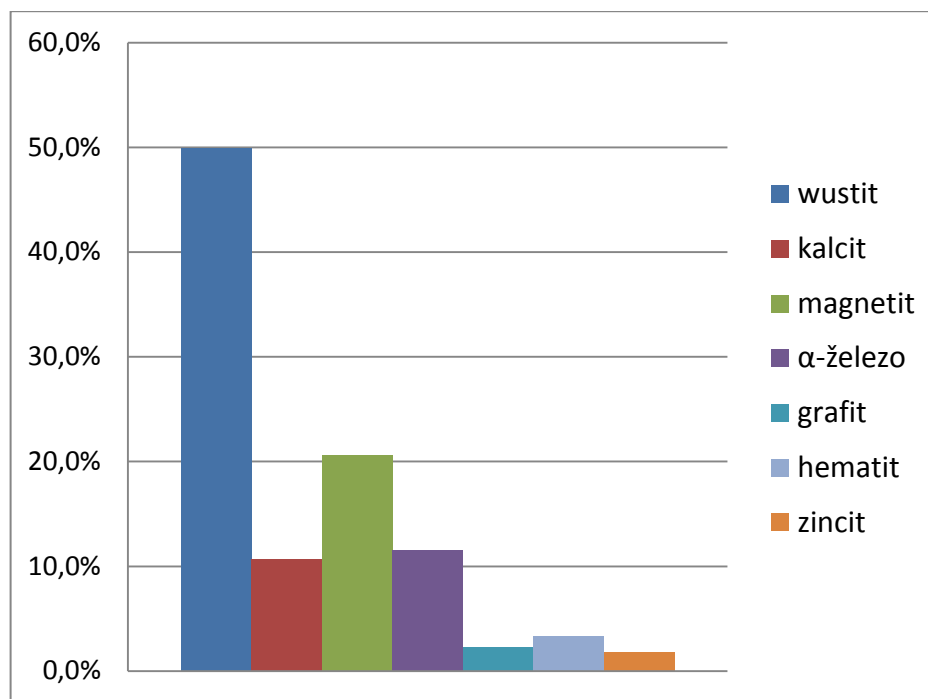
Obrázek 18 Kal z Třince 100 μm

RTG difrakce kalu z Třince, zobrazena na obrázku 19, prokázala přítomnost a zastoupení wüstitu, kalcitu, alfa železa, grafitu, hematitu a zincitu v hmotnostních procentech.



Obrázek 19 RTG difrakce kalu z Třince (zdroj Dr. Ing. Matýšek)

Na základě RTG difrakce kalu z Třince (Obrázek 19) jsou v následujícím grafu 2 přehledněji vyjádřena hmotnostní procenta zastoupení jednotlivých výše uvedených podílů.

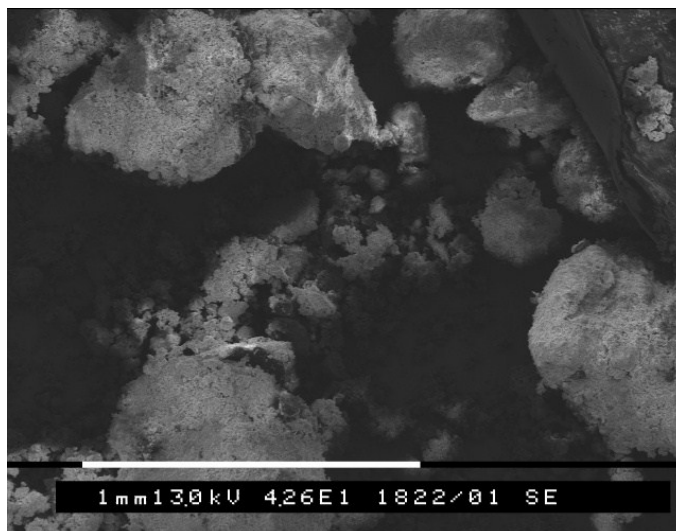


Graf 2 Hmotnostní zastoupení podílů v % u kalu z Třince po RTG difrakci

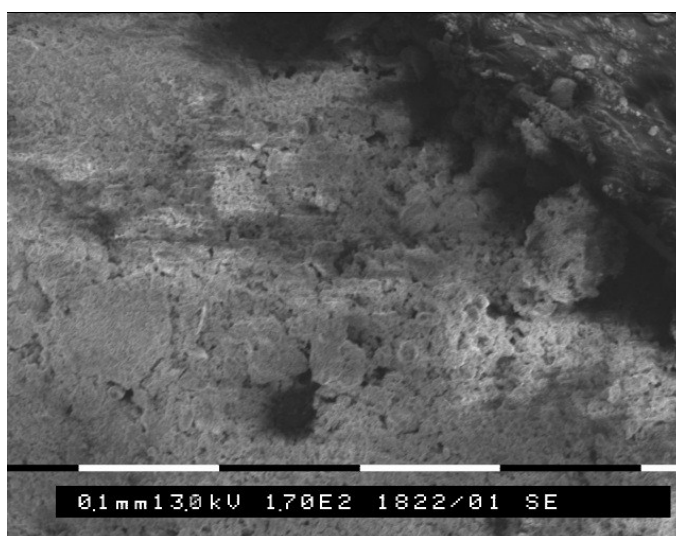
Následující jemnozrnné odpady z hutnického průmyslu (kaly z kyslíkových konvertorů, odprašky z EOP a odprašky z výroby litiny) včetně níže uvedeného zastoupení jednotlivých prvků (tabulka 4) a fázového složení, dokázaného prostřednictvím RTG difrakce (tabulka 5) poskytla, jak již bylo uvedeno na začátku praktické části, paní *prof. Ing. Seidlerová Jana, CSc.*

Na níže uvedených snímcích (obrázky 20, 21, 22, 23, 24 a 25), které byly pořízeny pomocí elektronového mikroskopu Philips SEM 515 vedoucím práce, jsou zobrazeny kaly z kyslíkových konvertorů, odprašky z EOP a odprašky z výroby litiny vždy v měřítku 1 mm a 0,1 mm.

Kal z kyslíkových konvertorů (kal KK)

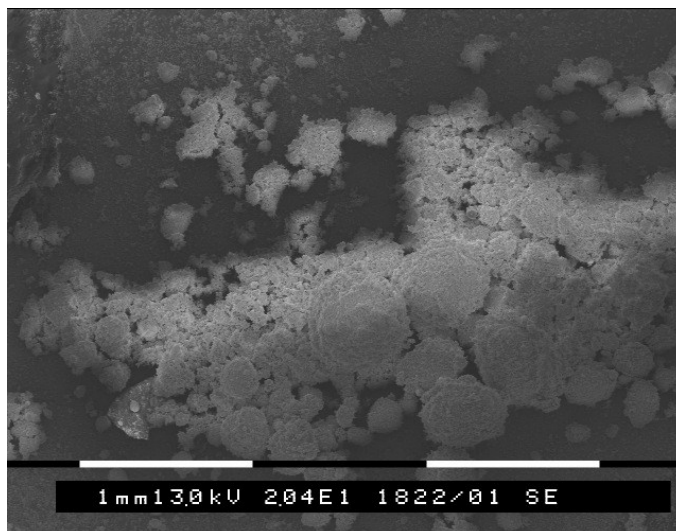


Obrázek 20 Kal KK 1 mm

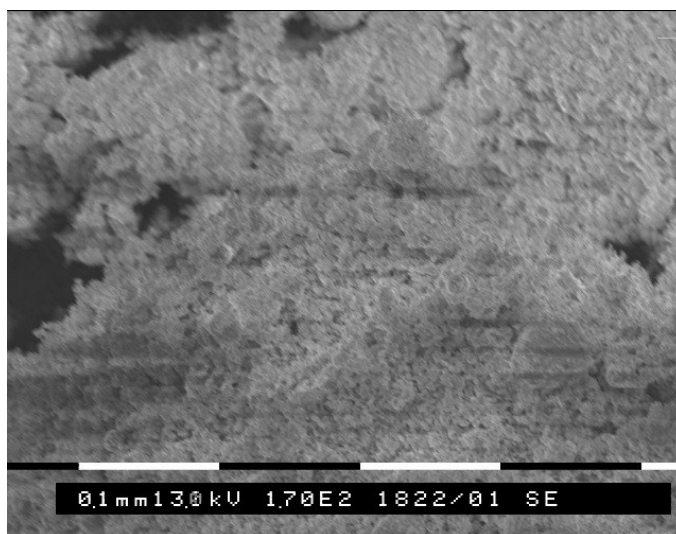


Obrázek 21 Kal KK 0,1 mm

Odprašky pocházející z elektrické obloukové pece (Odprašky z EOP)

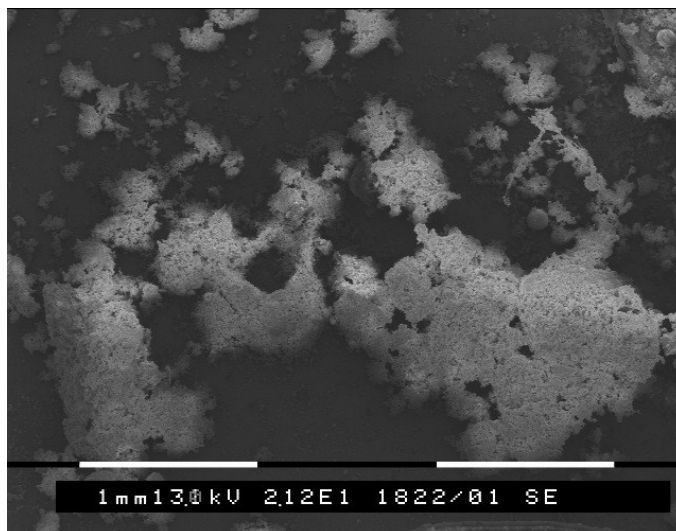


Obrázek 22 Odprašky z EOP 1 mm

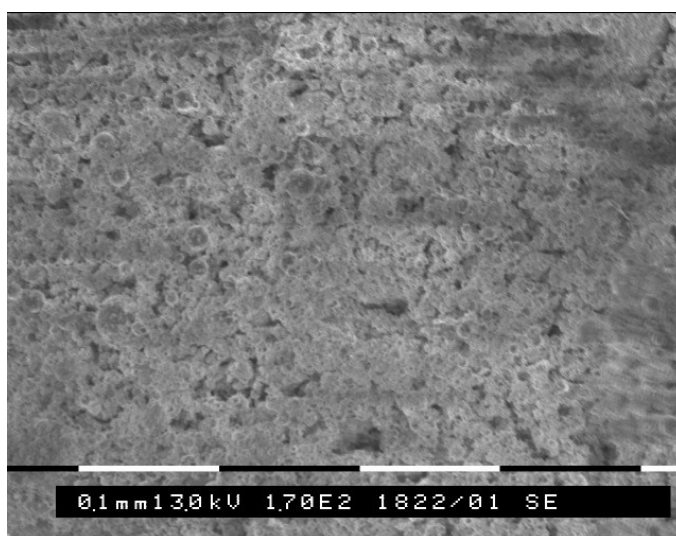


Obrázek 23 Odprašky z EOP 0,1 mm

Odprašky vznikající při výrobě litiny (Odprašky z výroby litiny)



Obrázek 24 Odprašky z výroby litiny 1 mm



Obrázek 25 Odprašky z výroby litiny 0,1 mm

U všech výše uvedených obrázků je patrná jemnozrná charakteristika odpadů, která patří v procesu úpravy a recyklace k jedné z největších problémů při jejich zpracování. V této jemnozrné formě jsou zastoupeny mimo jiné také nebezpečné prvky (Pb, Zn, aj.), škodlivé nejen životnímu prostředí, ale i ohrožující zdraví obyvatel.

Následující tabulka 4 demonstruje množství kadmia a hmotnostní zastoupení prvků (železa, manganu, olova, zinku, sulfátů, karbonátů, chloridů) u vybraných odpadů odprašků z EOP, odprašků z výroby litiny a u kalu KK.

Tabulka 4 Zastoupení prvků u vybraných materiálů (zdroj prof. Seidlerová [31])

	jednotka	odprašky z EOP	odprašky z výroby litiny	Kal KK
Cd	mg · kg ⁻¹	290 ± 20	390 ± 20	480 ± 30
Fe (celkové)	hm. %	45,1 ± 1,80	47,6 ± 1,90	48,7 ± 2,00
Mn	hm. %	4,83 ± 0,20	0,122 ± 0,005	0,82 ± 0,03
Pb	hm. %	2,04 ± 0,13	3,24 ± 0,20	1,21 ± 0,08
Zn	hm. %	7,50 ± 0,30	10,0 ± 0,40	5,38 ± 0,22
Sulfáty	hm. %	1,25 ± 0,05	0,60 ± 0,03	0,14 ± 0,01
Karbonáty	hm. %	0,36 ± 0,02	0,46 ± 0,03	10,0 ± 0,60
Chloridy	hm. %	2,03 ± 0,11	1,71 ± 0,10	0,06 ± 0,01
Velikost částic	mm	< 10	< 100	< 500

Pozn. k tabulce: ± střední hodnota čtyř nezávislých měření

Tabulka 5 Fázové složení dokázané RTG difrakcí pro odprašky z výroby litiny (zdroj prof. Seidlerová [31])

	odprašky z EOP	odprašky z výroby litiny	kal KK
Ca	3,87	0,67	11,00
CaCO ₃ (Kalcit)	-	-	+
CaSO ₄ · nH ₂ O	+	-	-
Si	0,92	1,79	0,17
SiO ₂	+	+	-
K	1,38	0,30	0,07
KCl (Sylvit)	+	-	-
Mn	4,83	0,12	0,82
(Zn · Mn · Fe ²⁺)(Fe ³⁺ · Mn) · 2O ₄ Franklinit	+	-	+
Fe ³⁺	39,00	43,70	3,67
Fe ₂ O ₃ (Hematit)	+	+	-
ZnFe ₂ O ₄ Franklinit (FeFe ₂ O ₄ Magnetit)	-	+	+
Fe ²⁺	5,57	3,72	38,10
FeO (Wüstit)	+	-	+
Fe	0,50	0,14	6,93
Femet. (Železo)	-	-	+
Pb	2,40	3,24	1,21
PbSO ₄ (Anglesit)	+	+	-
PbCl ₂ (Kotunit)	+	+	-
Zn	7,50	10,00	5,38
ZnO (Zincit)	+	-	-
CaZn ₂ (OH) ₆ · 2H ₂ O	-	-	+
SO	1,25	0,60	0,14
Cl	2,30	1,71	0,06
CO	0,36	0,46	10,00

Pozn. k tabulce: +/- označují přítomnost/absenci daných elementů.

3.2 Výsledky

V následujících podkapitolách praktické části jsou uvedeny naměřené magnetizační křivky materiálů, včetně příslušných grafů a výpočtů jejich susceptibility. Další části práce se zabývají popisem modelového chování vybraných látek v magnetickém separátoru a výpočtem radiální rychlostí částic. Poslední kapitola se věnuje kvalitativnímu popisu separace nehomogenních materiálů demonstované na recyklaci magnetitu.

3.2.1 Měření magnetizační křivky materiálů a určení susceptibility

Prvními praktickými výsledky diplomové práce jsou magnetizační křivky (MK) naměřené pro kal z Třince na obrázku 26 a grafu 3 na str. 37, pro kal KK jsou magnetizační křivky zobrazeny na obrázku 27 a grafu 4 na str. 38. Pro odprašky z EOP jsou na obrázku 28 a grafu 5 na str. 39 a pro odprašky z výroby litiny MK na obrázku 29 a grafu 6 na str. 40. Celkové porovnání MK je uvedeno na grafu 7, str. 41.

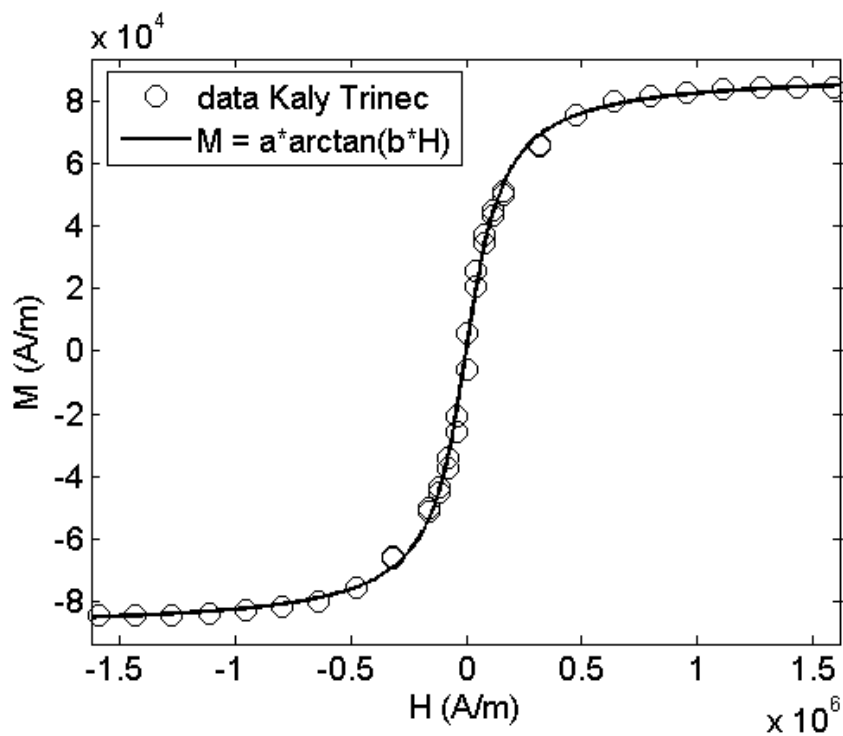
Tyto následující magnetizační křivky pro výše zmíněné materiály vyjadřují, jak již bylo uvedeno v teoretické části této práce (viz 2.3), závislost M na H .

Druhými praktickými výsledky této práce bylo určení susceptibilit zkoumaných materiálů. Ve spolupráci s vedoucím práce a za použití programu Matlab se fitoval průběh funkce magnetizace prostřednictvím modelového vztahu $M = a \cdot \arctan(b \cdot H)$, kde platí: $\kappa = \frac{dM}{dH}$. Derivací modelového vztahu pro M platí pro výpočet susceptibility $\kappa = \frac{a \cdot b}{(1+b^2 \cdot H^2)}$.

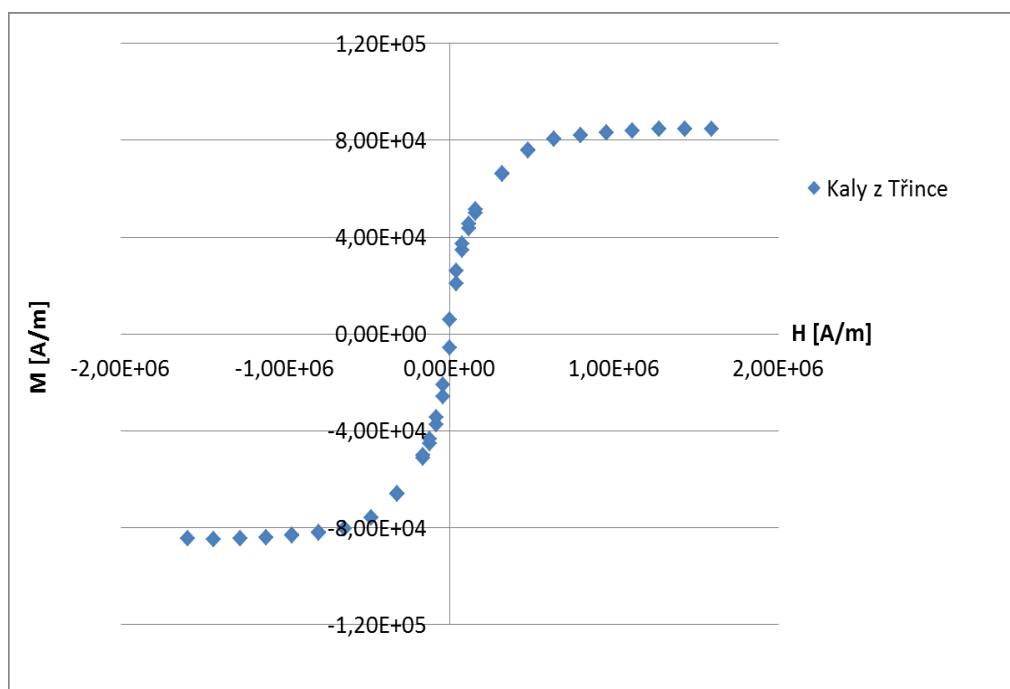
Vypočtené hodnoty susceptibility pro jednotlivé odpady podle tohoto vzorce, za pomoci programu Excel, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 6 Hodnoty susceptibility pro vybrané materiály

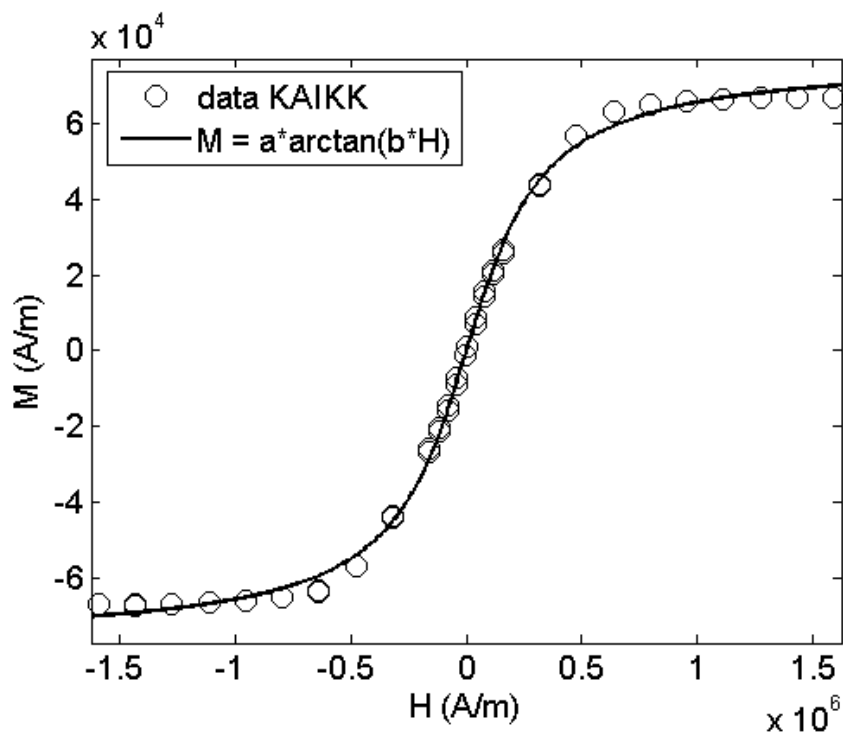
	parametr a	parametr b	susceptibilita κ
Kal z Třince	$5,69 \cdot 10^4$	$8,55 \cdot 10^{-6}$	$4,87 \cdot 10^{-1}$
Kal KK	$4,92 \cdot 10^4$	$4,06 \cdot 10^{-6}$	$2,00 \cdot 10^{-1}$
Odprašky z EOP	$5,19 \cdot 10^4$	$1,97 \cdot 10^{-5}$	1,02
Odprašky z výroby litiny	$5,53 \cdot 10^4$	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$8,96 \cdot 10^{-1}$



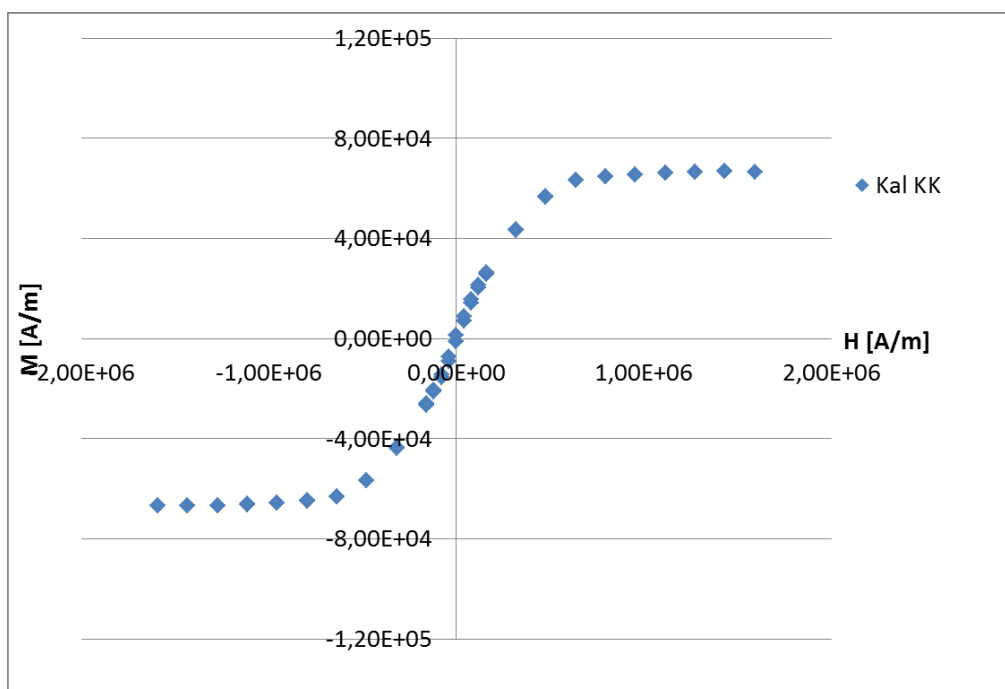
Obrázek 26 MK pro kal z Třince



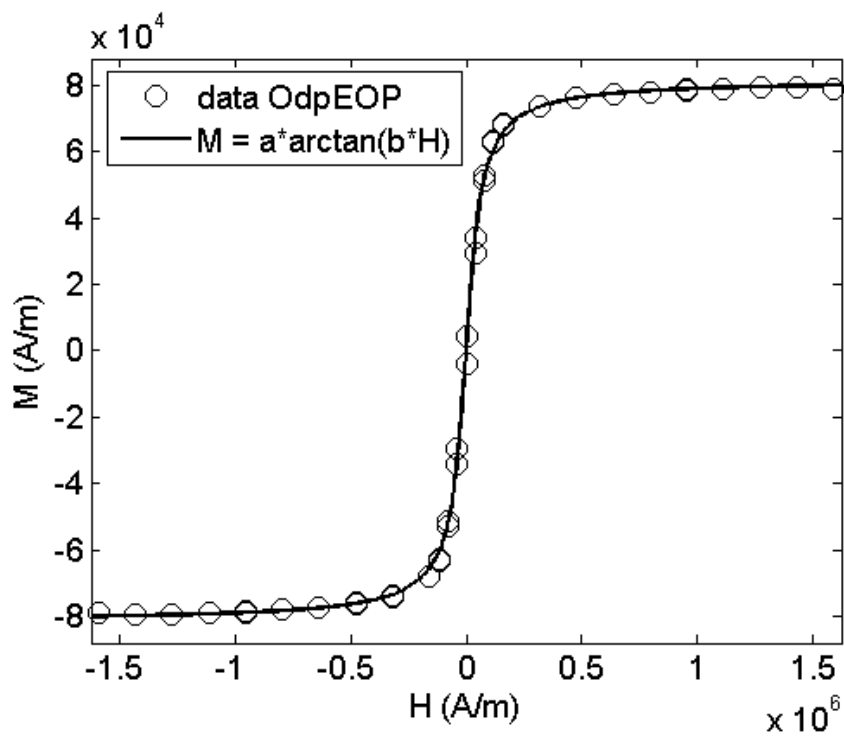
Graf 3 Kal z Třince



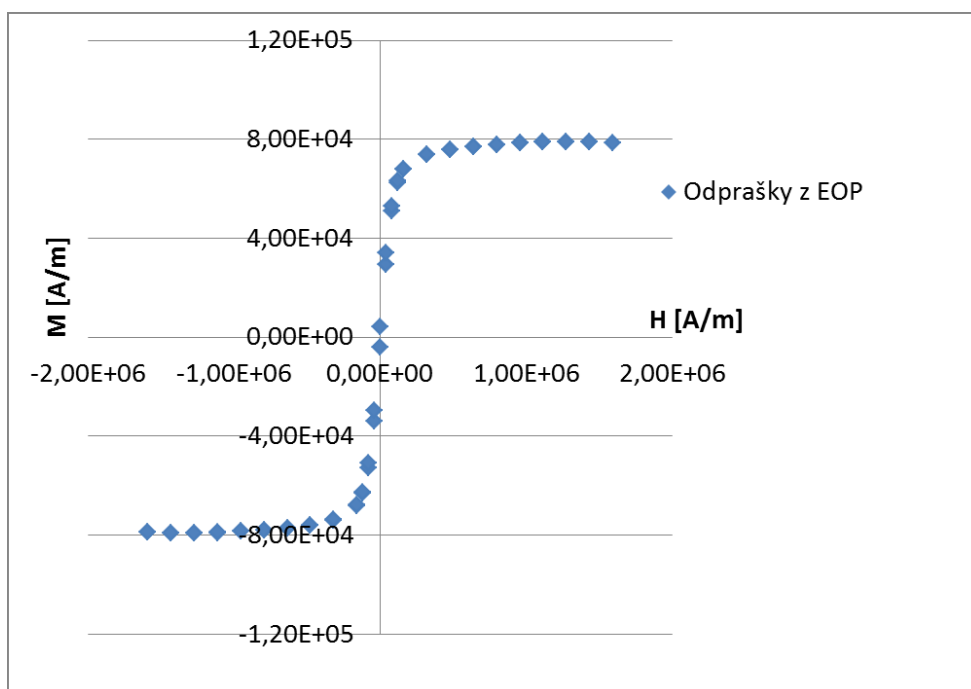
Obrázek 27 MK pro kal z KK



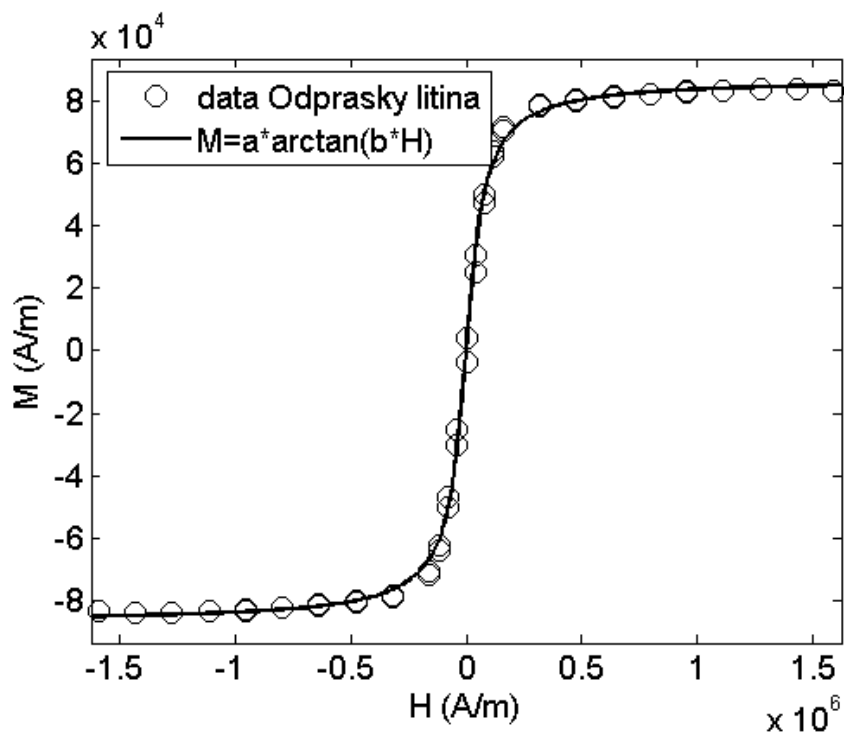
Graf 4 Kal KK



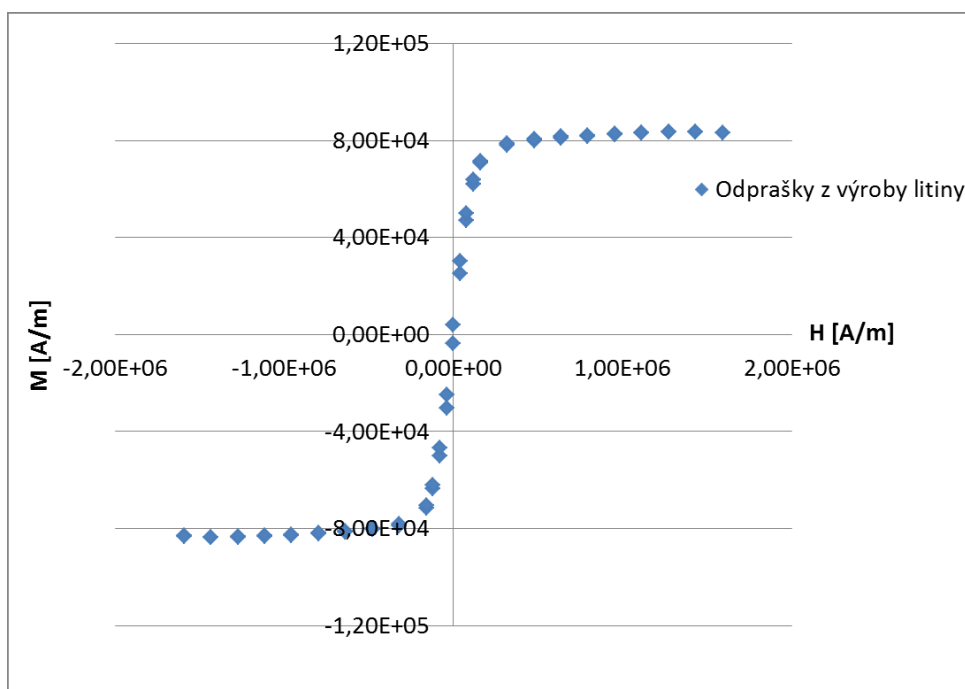
Obrázek 28 MK pro odprašky z EOP



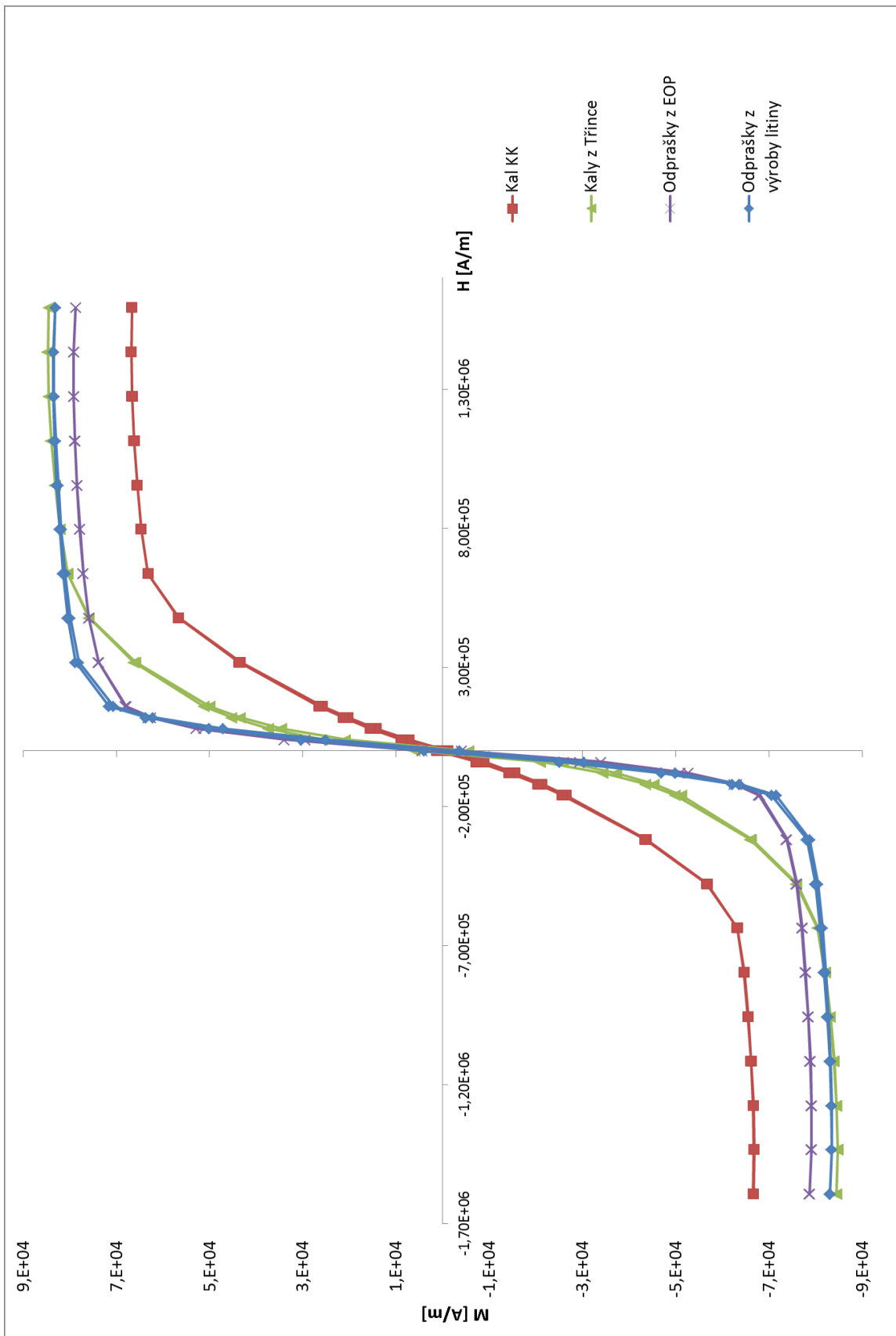
Graf 5 Odprašky z EOP



Obrázek 29 MK pro odprašky z výroby litiny



Graf 6 Odprašky z výroby litiny

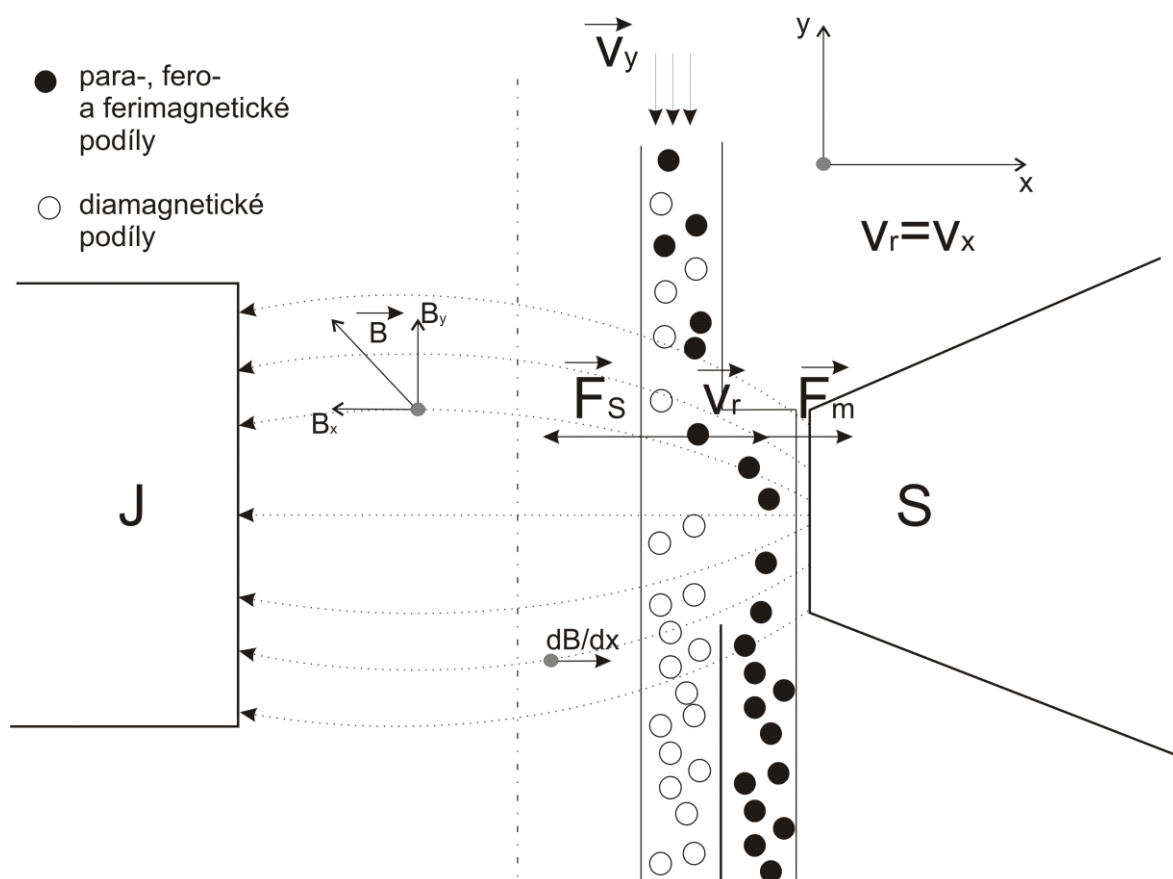


Graf 7 Porovnání MK mezi jednotlivými materiály

3.2.2 Popis modelového chování vybraných látek v magnetickém separátoru - radiální rychlost částic

Naměřené magnetické vlastnosti zkoumaných práškových látek byly využity pro výpočet modelového chování v magnetickém separátoru za toho předpokladu, že mají všechny částice prášku stejné magnetické vlastnosti. To reálně neodpovídá skutečnosti, viz obrázek 19 z RTG, protože se jedná o nehomogenní práškové směsi. Takové zjednodušení bylo nutno v rámci této práce použít, protože by se v opačném případě jednalo, z hlediska teoretického popisu, o velmi komplikovaný problém.

Určení radiální rychlosti (v_r) částic (zrn) zkoumaných materiálů v jednoduchém modelovém magnetickém separátoru (viz obrázek 30) vychází z pohybové rovnice posuvného pohybu v radiálním směru.



Obrázek 30 Modelové schéma separace v magnetickém poli

$$\sum_{i=1}^n F_i = m \cdot a_r = m \cdot \frac{dv_r}{dt} \quad (6)$$

$$F_m + F_S = m \cdot \frac{dv_r}{dt} \quad (7)$$

$$F_m = \frac{\kappa}{\mu_0} \cdot V \cdot B_x \cdot \frac{dB_x}{dx} \quad (8)$$

$$F_S = -3\pi\eta d v_r \quad (9)$$

kde F_m je magnetická a F_S Stokesova síla.

Směr magnetické síly udává směr gradientu B a platí pro lineární závislost mezi M a H .

Lze předpokládat, že v silně viskózním prostředí jako je voda, dojde okamžitě k vyrovnání magnetické a viskózní (Stokesovy) síly, která působí opačným směrem než síla magnetická. Můžeme proto považovat člen $m \cdot \frac{dv_r}{dt} = 0$ a zjednodušit tak silovou rovnici na následující tvar:

$$-F_S = F_m \quad (10)$$

$$3\pi\eta d v_r = \frac{\kappa}{\mu_0} \cdot V \cdot B_x \cdot dB_x/dx \quad (11)$$

Vzhledem k aproximaci tvaru separovaných zrn tvarem koule je objem $V = \frac{\pi d^3}{6}$.

$$v_r = \frac{\kappa V B_x dB_x/dx}{3\pi\eta\mu_0 d} \quad (12)$$

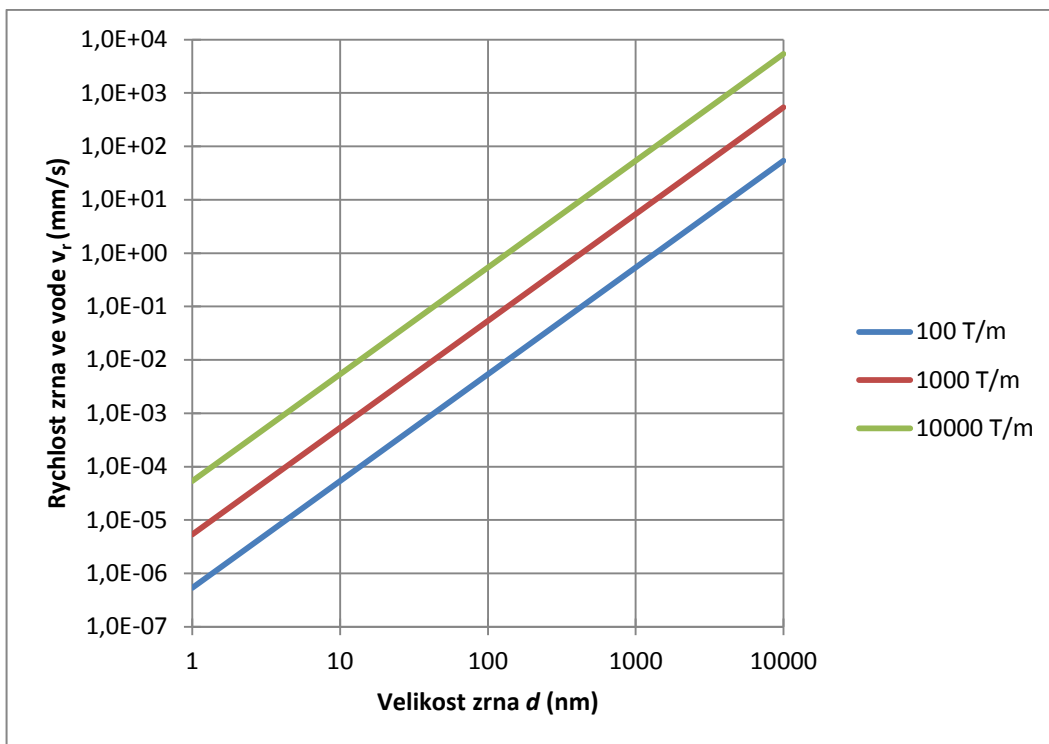
$$v_r = \frac{\kappa d^2 B_x dB_x/dx}{18\eta\mu_0} \quad (13)$$

V rámci odvození byly zanedbány tíhová a vztlaková síla. Rovnici (13) je možno použít pro magneticky měkké a paramagnetické materiály. Uvedené výpočty se vztahují k modelové situaci pouze tehdy, předpokládá-li se, že gradient pole dB_x/dx je v určité oblasti separátoru přibližně konstantní stejně jako hodnota magnetického pole B .

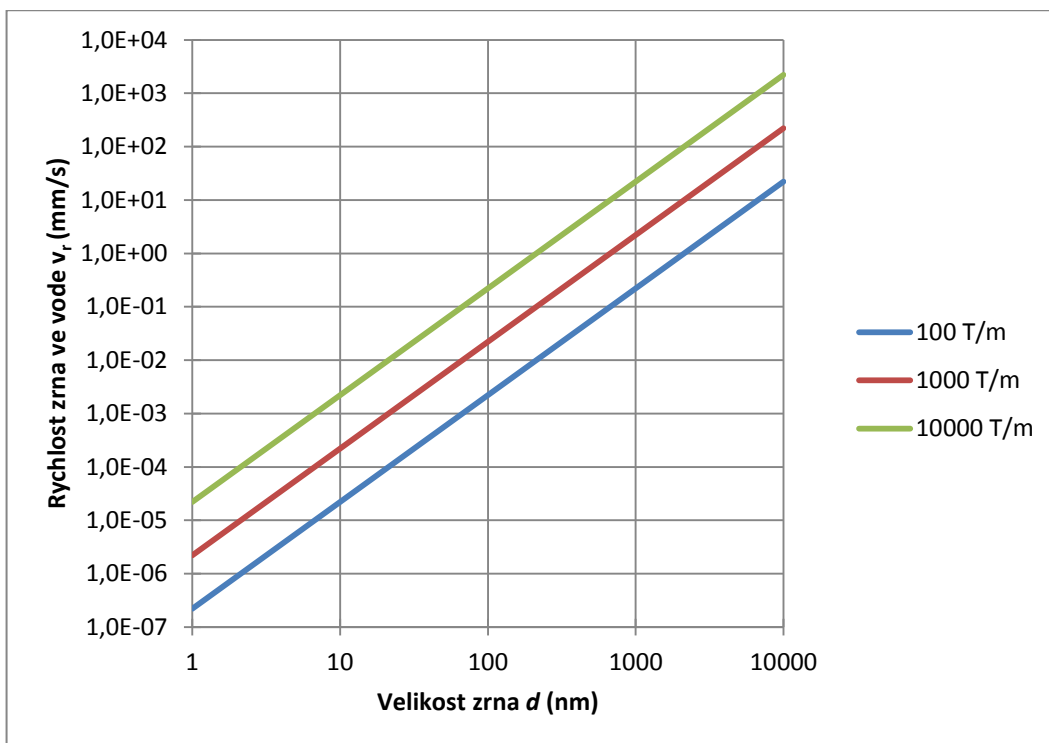
V následující tabulce 5 jsou uvedeny radiální rychlosti separace zrn při modelových parametrech a po ní následují schématická zobrazení (graf 8 – 11) pro všechny níže uvedené odpadní materiály.

Tabulka 7 Radiální rychlosti separace zrn při modelových parametrech

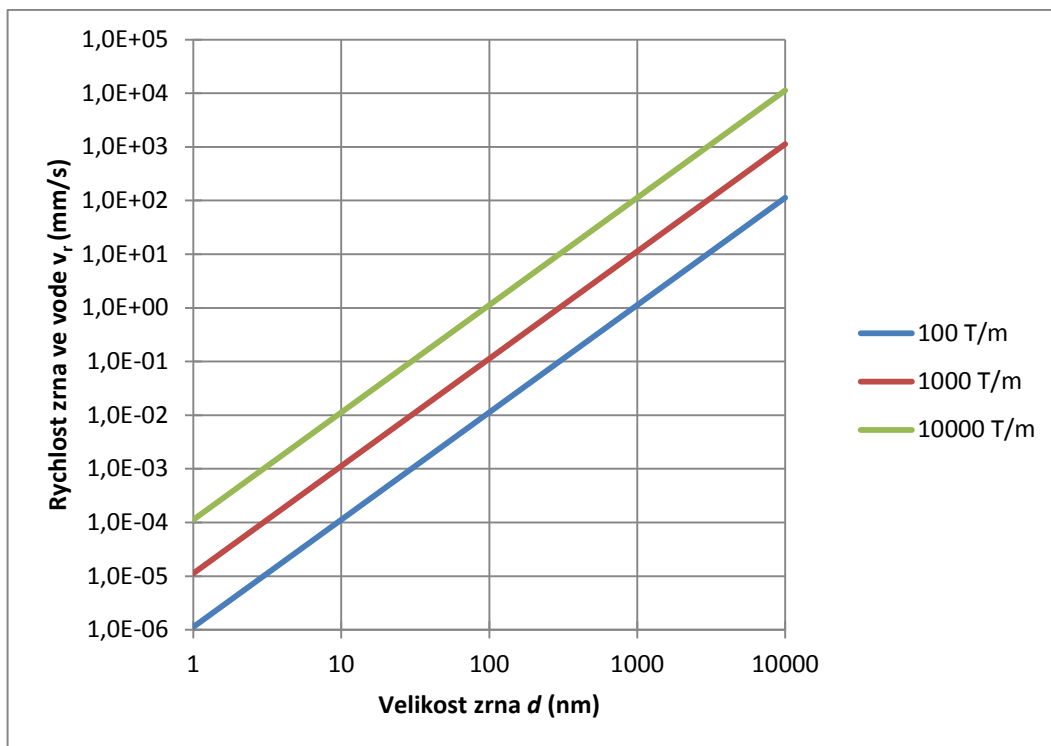
	Velikost zrna d	pro 100 [T/m]	pro 1000 [T/m]	pro 10000 [T/m]
	[nm]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]
Kal z Třince (graf 8)	1	$5,39 \cdot 10^{-7}$	$5,39 \cdot 10^{-6}$	$5,39 \cdot 10^{-5}$
	10	$5,39 \cdot 10^{-5}$	$5,39 \cdot 10^{-4}$	$5,39 \cdot 10^{-3}$
	100	$5,39 \cdot 10^{-3}$	$5,39 \cdot 10^{-2}$	$5,39 \cdot 10^{-1}$
	1000	$5,39 \cdot 10^{-1}$	5,39	$5,39 \cdot 10^1$
	10000*	$5,39 \cdot 10^1$	$5,39 \cdot 10^2$	$5,39 \cdot 10^3$
* platí pro laminární proudění				
	[nm]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]
Kal KK (graf 9)	1	$2,21 \cdot 10^{-7}$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$
	10	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$
	100	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$2,21 \cdot 10^{-1}$
	1000	$2,21 \cdot 10^{-1}$	2,21	$2,21 \cdot 10^1$
	10000*	$2,21 \cdot 10^1$	$2,21 \cdot 10^2$	$2,21 \cdot 10^3$
* platí pro laminární proudění				
	[nm]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]
Odprašky z EOP (graf 10)	1	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$
	10	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$
	100	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	1,13
	1000	1,13	$1,13 \cdot 10^1$	$1,13 \cdot 10^2$
	10000*	$1,13 \cdot 10^2$	$1,13 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^4$
* platí pro laminární proudění				
	[nm]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]	v_r [mm/s]
Odprašky z výroby litiny (graf 11)	1	$9,91 \cdot 10^{-7}$	$9,91 \cdot 10^{-6}$	$9,91 \cdot 10^{-5}$
	10	$9,91 \cdot 10^{-5}$	$9,91 \cdot 10^{-4}$	$9,91 \cdot 10^{-3}$
	100	$9,91 \cdot 10^{-3}$	$9,91 \cdot 10^{-2}$	$9,91 \cdot 10^{-1}$
	1000	$9,91 \cdot 10^{-1}$	9,91	$9,91 \cdot 10^1$
	10000*	$9,91 \cdot 10^1$	$9,91 \cdot 10^2$	$9,91 \cdot 10^3$
* platí pro laminární proudění				



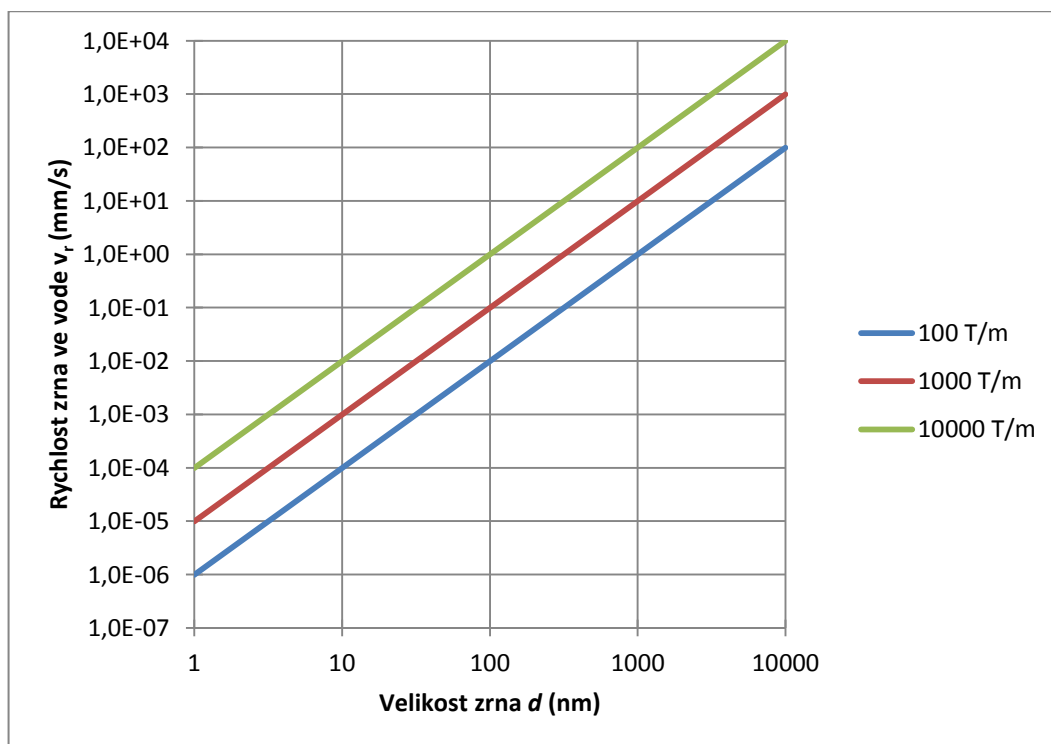
Graf 8 Znárodnění závislosti radiální rychlosti zrn ve vodě na velikosti zrn u kalu z Třince



Graf 9 Znárodnění závislosti radiální rychlosti zrn ve vodě na velikosti zrn u kalu KK



Graf 10 Znázornění závislosti radiální rychlosti zrn ve vodě na velikosti zrn u odprašků z EOP



Graf 11 Znázornění závislosti radiální rychlosti zrn ve vodě na velikosti zrn u odprašků z výroby litiny

3.2.3 Kvalitativní popis separace nehomogenních materiálů

V případě, že by se magneticky separovali odpady (kaly a odprašky), musí být zohledněna jejich nehomogenost. Tzn., že tyto odpady obsahují v různé míře magnetické podíly s odlišnou hodnotou susceptibility, která zásadně ovlivňuje proces magnetické separace. Dále pak mají tyto odpady odlišnou hustotu i granulometrii, z čehož vyvstává potřeba individuálního nastavení zařízení pro účinnou separaci v provozu právě na základě podrobné charakteristiky separovaného materiálu.

Modelové schéma úpravy a recyklace demonstrované na magnetitu (magnetit s příměsí, obr. 31, str. 48)

I. fáze: zahušťovací

Materiály, které podstoupí zahušťování, jsou přiváděny z hald nebo usazovacích nádrží. Tato navržená modelová fáze probíhá nejdříve v prostředí magnetického zahušťovače. Zařízení zahušťovače má za úkol zahušťovat v běžném provozu jemně mleté (jemnozrnné) materiály, tak že po průchodu kolem magnetického pole (remanentní magnetismus) vytvoří částice magnetitu „vločky“ – shluky větších částic. Zahušťovač bývá zařazen před samotnou magnetickou separací.

II. dvoustupňová mokrá bubnová magnetická separace

Shluky magnetitových vloček z předchozí fáze úpravy a recyklace, (předpokládáme, že jsou stále velmi jemnozrnné) postupují dále do prostředí dvoustupňové mokré bubnové magnetické separace. V prvním i druhém stupni magnetické separace jsou výstupem magnetické a nemagnetické podíly.

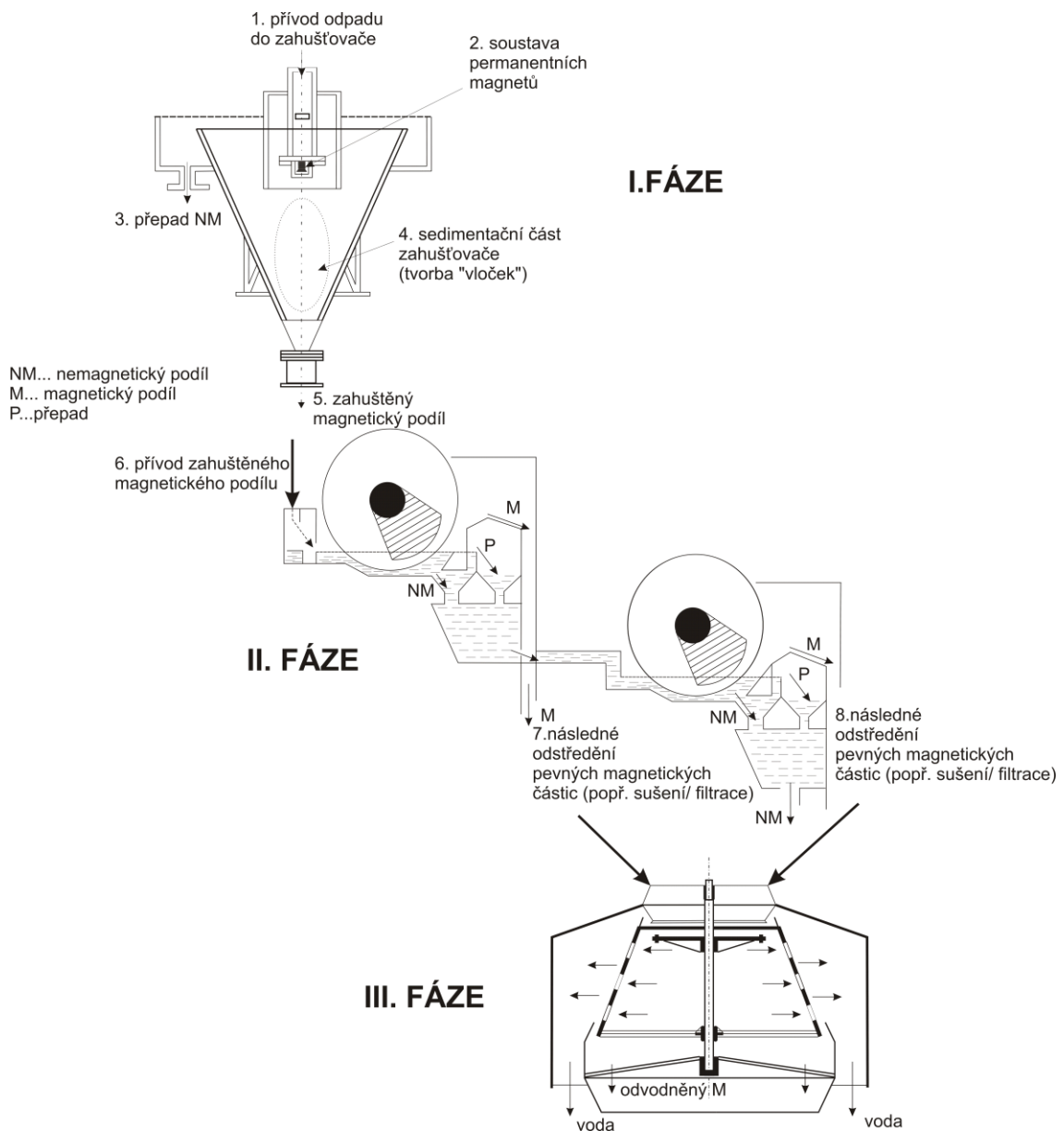
III. odvodňování ve vertikální odstředivce

Po druhé fázi dvoustupňové mokré bubnové magnetické separace mohou být magnetické podíly z první i druhé fáze odvodněny v prostředí odstředivky (konstrukčně jednoduché a nenáročné na energii provozu).

V případě, že by nebylo vhodné využívat odstředivky pro účinné odvodnění, je možné vysušit magnetický podíl pomocí průmyslových sušáren nebo také

zachycením magnetických podílů na filtrech. Vždy závisí na zohlednění všech parametrů účinné recyklace a charakteristice materiálů.

Po třetí konečné fázi, tyto odvodněné magnetické materiály, mohou sloužit jako druhotné suroviny k opětovnému využití v hutnickém průmyslu.



Obrázek 31 Modelové schéma recyklace magnetitu s využitím magnetické separace [22, 32]

4. Závěr

Diplomová práce byla věnována měření magnetických vlastností vybraných odpadů z hutnického průmyslu a analýze procesu jejich magnetické separace s návrhem celého postupu procesu recyklace.

Prokázaným magnetismem zkoumaných odpadových materiálů z hutnického průmyslu je možné tyto jemnozrnné materiály podrobit mokré magnetické separaci, která byla nastíněna v minulé podkapitole za pomoci mokrých bubnových MS.

Měřené vzorky odpadů jsou prokazatelně feromagnetické, jejichž naměřená susceptibilita pro kal z Třince činí $4,87 \cdot 10^{-1}$, pro kal z kyslíkových konvertorů $2,00 \cdot 10^{-1}$, u odprašků z elektrických obloukových pecí 1,02 a u odprašků vznikajících při výrobě litiny činí hodnota susceptibility $8,96 \cdot 10^{-1}$.

Radiální rychlost při modelovém pohybu částic u kalu z Třince o velikosti zrna 100 nm pro 1000 T/m (pole 0,25 T) činí $5,39 \cdot 10^{-2}$ mm/s, u kalu z kyslíkových konvertorů je za stejných parametrů hodnota radiální rychlosti $2,21 \cdot 10^{-2}$ mm/s, u odprašků z elektrických obloukových pecí je radiální rychlost $1,13 \cdot 10^{-1}$ mm/s a pro odprašky vznikající při výrobě litiny $9,91 \cdot 10^{-2}$ mm/s.

Vzhledem k uvedené problematice a každoročního vzniku obrovského množství produkovaných odpadů z oblasti tepelných procesů, by byl proces recyklace prostřednictvím magnetické separace vhodnou alternativou, ačkoliv v tomto případě je důležité počítat s mnoha faktory, které by mohli narušit celý proces – technické parametry jako je výkon, spotřeba elektrické energie, spotřeba vody, příp. množství chemikálií pro potřeby předúpravy vstupních odpadů, dále účinnost vhodných zařízení magnetické separace v závislosti na charakteristice materiálů (hustota, granulometrie, předúprava). Nezohledňuje se přítomnost nebezpečných prvků jako je olovo, zinek nebo kadmium, které by bylo vhodnější před samotnou separací odstranit.

Všechny aspekty, které tato práce nezohledňuje v procesu možné recyklace a rozdužovacích pochodů, mohou sloužit jako další z řady technických témat pro zpracování bakalářské nebo diplomové práce.

SEZNAM použité literatury

- [1] HLOUŠEK, Robin. *Jemnozrnné hutní odpady s obsahem neželezných kovů a možnosti jejich zpracování*. Ostrava, 2010. Dostupné z: <<https://dspace.vsb.cz/handle/10084/81925>>. Diplomová práce. VŠB-TUO.
- [2] KURSA, M., T. KÁRNÍK, D. KRIŠTOFOVÁ, J. LEŠKO, J. KRET a J. BOTULA. Možnosti odstranění neželezných kovů z jemnozrnných hutních odpadů: Metal 2000 sborník přednášek; 16. - 18.5.2000, Ostrava, Hotel ATOM/Hotel Harmony, Česká Republika. Vyd. 1. Ostrava: Tanger, 2000. ISBN 80-859-8848-8.
- [3] STANOVSKÁ, Barbora. Úpravy kovonosných odpadů pro potřeby hutního podniku. Ostrava, 2010. Dostupné z: <<http://hdl.handle.net/10084/82183>>. Bakalářská práce. VŠB-TUO.
- [4] ŘEPKA, V., J. BOTULA a R. SAMKOVÁ. Odpady z výroby železa a oceli a jejich recyklace. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2006, č. 12, s. 334-337. Dostupné z: <<http://web.tuke.sk/hf-knkaso/content/veda/konferencie/waste/repka.pdf>>.
- [5] MACOSZEK, M., P. ŠKUČA, M. RACLAVSKÝ, S. BROŽOVÁ a Z. BŮŽEK. Možnosti bezodpadové výroby oceli. *Hutnické listy*. Praha: Ocelot, 2001, 4-7. ISSN 0018-8069.
- [6] BOTULA, Jiří. *Recyklace odpadů kovových a kovonosných*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004, 87 s. ISBN 80-248-0495-6.
- [7] KEPÁK, František. *Průmyslové odpady*. Vyd. 2. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2005, 200 s. ISBN 978-80-7414-228-4.
- [8] WICHTERLE, Kamil, Jan CIESLAR a Jana SEIDLEROVÁ. *CHISA 2003: jubilejní 50. konference chemického a procesního inženýrství : 20.-23. října 2003 Srní, Šumava*. Vyd. 1. Editor Milan Drahovzal, Alena Tvrdíková. Praha: Jan Novosad - Procesní inženýrství, 2003, 182 s. ISBN 80-860-5936-7. Dostupné z: <homen.vsb.cz/~wih15/Publikace/WiCiSe_PVC_ftx.doc>.

- [9] FRIES, Jiří. *Stroje pro zpracování odpadu*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1511-4. Dostupné z: <www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/SZO/vyukovy_text.pdf10>.
- [10] OGROCKÁ, Simona. *Přehled a možnosti recyklace vybraných hutních odprašků*. Ostrava, 2010. Dostupné z: <<https://dspace.vsb.cz/handle/10084/82087>>. Bakalářská práce. VŠB-TUO>.
- [11] BARTOŠOVÁ, Květoslava. *Studium sorpčních vlastností fylosilikátů*. Ostrava, 2008. Dostupné z: <<https://dspace.vsb.cz/handle/10084/77199>>. Bakalářská práce. VŠB-TUO.
- [12] Centrum Výzkumu integrovaného systému využití vedlejších produktů z těžby, úpravy a zpracování energetických surovin CVVP. *Dilčí zpráva II. etapa 1.7. – 30.9. 2006*. 2006, 143 s. Dostupné z: <http://www.hgf.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/hgf/cvvp/cs/okruhy/vysledky/zpravy/dilci_zprava_II_etapa_2006.pdf>.
- [13] *Portál veřejné správy: Vyhledávání v zákonech - Katalog odpadů* [online]. 2012 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?page=0&idBiblio=51786&recShow=10&l_nr=381~2F2001~20Sb.&l_name=Katalog~20odpad~C5~AF&fulltext=381~2F2001&nr=&part=&name=&rpp=15#parCnt>.
- [14] INISOFT S.R.O. *Informační systém odpadového hospodářství* [online]. 2002-2012 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <<http://isoh.cenia.cz/groupisoh/>>.
- [15] MECHLOVÁ, Erika a Radek KOŠŤÁL. *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001, 588 s. ISBN 80-7196-151-5.
- [16] C. EICHHOLZ, M. STOLARSKI, V. GOERTZ, H. NIRSCHL. Magnetic field enhanced cake filtration of superparamagnetic PVAc-particles. *Chemical engineering science: Le Journal International de genie chimique*. Oxford: Pergamon Press, 2008, roč. 63, č. 12, s. 3193-3200. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250908001723>>.
- [17] HATCH, Gareth P. a Richard E. STELTER. Magnetic design considerations for devices and particles used for biological high-gradient magnetic separation (HGMS)

systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001, roč. 225, 1-2, s. 262-276.
ISSN 0304-8853. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885300012506>>.

[18] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Část 3: Elektrina a magnetismus*. Vyd. 1. M. ŠTRUNC, M. BARTLOVÁ, L. DĚDEK, M. HORÁK, V. MITVALSKÝ, V. NAVRÁTIL, P. TOMÁNEK, V. ZDRAŽIL. M. ŠTRUNC, J. OBDRŽÁLEK, P. DUB. Brno: Vutium, 2000, 577-888. ISBN 80-214-1868-0.

[19] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1983, 672 s.

[20] Magnetická hystereze. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/296-magneticka-hystereze>>.

[21] BROŽ, Jaromír, Vladimír ROSKOVEC a Miloslav VALOUCH. *Fyzikální a matematické tabulky*. Praha: SNTL, 1980.

[22] CAGAŠ, Zdeněk. *Fyzikální způsoby úpravy II*. Ostrava: VŠB-TUO, 1985, 264 s.

[23] OBERTEUFFER, John A. Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices, and Applications. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*. Oxford: Pergamon Press, 1974, roč. 10, č. 2, s. 223-238.

[24] SVOBODA, J. a T. FUJITA. Recent developments in magnetic methods of material separation. *Minerals Engineering*. 2003, roč. 16, č. 9, 785–792. ISSN 0892-6875. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687503002127>>.

[25] HENCL, Vladimír. *Mokrě magnetické rozdělování slaběmagnetických minerálů*. Praha: Nakladatelství technické literatury ve Středisku interních publikací, 1974.

[26] *Magnetické separátory* [online]. 2012 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <<http://www.magnety-separatory.cz/cz/kategorie/magneticke-separatory.aspx>>.

[27] *WAMAG, spol. s r.o. - magnetické systémy, separátory, filtry, dopravní systémy* [online]. 2012 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <<http://www.wamag.cz/17-zavesny-permanentni-magneticky-separator.html>>.

- [28] *Adremot technologies* [online]. 2007 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <<http://www.adremot.cz/magnetickeseparatory.html>>
- [29] *PROFIMAGNET s.r.o. - elektromagnety, separátory* [online]. 2010 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.profimagnet.cz/page.php?page=_1>.
- [30] VSM EV9 Microsense propagační letáky
- [31] SEIDLEROVÁ, Jana, Hana OTOUPALÍKOVÁ a Martina NOVÁČKOVÁ. Studie kinetiky vyluhovatelnosti polutantů z metalurgických odpadů. *Chemické listy*. 2007, roč. 101, č. 2, s. 165-170. ISSN 0009-2770. Dostupné z: <<http://hdl.handle.net/10084/59875>>
- [32] NOVÁČEK, Jiří. *Pomocné procesy I*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1997, 72 s. ISBN 80-707-8409-1.

SEZNAM obrázků

OBRÁZEK 1 SCHÉMA ZPRACOVÁNÍ VYSOKOPECNÍ STRUSKY [6]	7
OBRÁZEK 2 SCHÉMA ZPRACOVÁNÍ OCELÁRENSKÉ STRUSKY [6]	8
OBRÁZEK 3 SCHÉMA TOKU HUTNÍCH ODPADŮ [14]	9
OBRÁZEK 4 DIAMAGNETICKÝ MATERIÁL - MODELOVÉ ZNÁZORNĚNÍ VNITŘNÍHO MAGNETISMU LÁTKY A VNĚJŠÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	16
OBRÁZEK 5 PARAMAGNETICKÝ MATERIÁL - MODELOVÉ ZNÁZORNĚNÍ VNITŘNÍHO MAGNETISMU LÁTKY A VNĚJŠÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	17
OBRÁZEK 6 FEROMAGNETICKÝ MATERIÁL - MODELOVÉ ZNÁZORNĚNÍ VNITŘNÍHO MAGNETISMU LÁTKY A VNĚJŠÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	18
OBRÁZEK 7 FERIMAGNETICKÝ MATERIÁL - MODELOVÉ ZNÁZORNĚNÍ VNITŘNÍHO MAGNETISMU LÁTKY A VNĚJŠÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	18
OBRÁZEK 8 MK PRO MAGNETICKY TVRDÉ MATERIÁLY [18]	19
OBRÁZEK 9 MK PRO MAGNETICKY MĚKKÝ MATERIÁL [18]	19
OBRÁZEK 10 MK PRO DIAMAGNETICKÝ MATERIÁL [18]	20
OBRÁZEK 11 MK PRO PARAMAGNETICKÝ MATERIÁL [18]	20
OBRÁZEK 12 ZÁKLADNÍ PRINCIP SUCHÉ BUBNOVÉ SEPARACE [23]	21
OBRÁZEK 13 SCHÉMA MAGNETICKÉ SEPARACE NA MAGNETICKÉM BUBNOVÉM SEPARÁTORU (SUCHÝ S HORNÍM PŘÍVODEM) [22] [24]	24
OBRÁZEK 14 SCHÉMA INDUKČNÍHO VÁLEČKOVÉHO SEPARÁTORU (MOKRÝ SE SPODNÍM PŘÍVODEM - EXTRAKČNÍ) [22]	24
OBRÁZEK 15 ELEKTROMAGNETICKÝ PŘEPADOVÝ SEPARÁTOR [29]	26
OBRÁZEK 16 MOKRÁ MAGNETICKÝ SEPARÁTOR [29]	26
OBRÁZEK 17 KAL Z TŘINCE 30 μm	28
OBRÁZEK 18 KAL Z TŘINCE 100 μm	29
OBRÁZEK 19 RTG DIFRAKCE KALU Z TŘINCE (ZDROJ DR. ING. MATÝSEK)	29
OBRÁZEK 20 KAL KK 1 mm	31
OBRÁZEK 21 KAL KK 0,1 mm	31
OBRÁZEK 22 ODPRAŠKY Z EOP 1 mm	32
OBRÁZEK 23 ODPRAŠKY Z EOP 0,1 mm	32
OBRÁZEK 24 ODPRAŠKY Z VÝROBY LITINY 1 mm.....	33
OBRÁZEK 25 ODPRAŠKY Z VÝROBY LITINY 0,1 mm.....	33
OBRÁZEK 26 MK PRO KAL Z TŘINCE	37
OBRÁZEK 27 MK PRO KAL Z KK.....	38
OBRÁZEK 28 MK PRO ODPRAŠKY Z EOP	39
OBRÁZEK 29 MK PRO ODPRAŠKY Z VÝROBY LITINY.....	40
OBRÁZEK 30 MODELOVÉ SCHÉMA SEPARACE V MAGNETICKÉM POLI	42
OBRÁZEK 31 MODELOVÉ SCHÉMA RECYKLACE MAGNETITU S VYUŽITÍM MAGNETICKÉ SEPARACE [22, 32].....	48

SEZNAM tabulek

TABULKA 1 CHEMICKÉ SLOŽENÍ HUTNÍCH ODPADŮ [2, 6]	9
TABULKA 2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PRO MAGNETICKÉ LÁTKY [21]	21
TABULKA 3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH SEPARÁTORŮ [22]	23
TABULKA 4 ZASTOUPENÍ PRVKŮ U VYBRANÝCH MATERIÁLŮ (ZDROJ PROF. SEIDLEROVÁ [31])	34
TABULKA 5 FÁZOVÉ SLOŽENÍ DOKÁZANÉ RTG DIFRAKCI PRO ODPRAŠKY Z VÝROBY LITINY (ZDROJ PROF. SEIDLEROVÁ [31])	35
TABULKA 6 HODNOTY SUSCEPTIBILITY PRO VYBRANÉ MATERIÁLY	36
TABULKA 7 RADIÁLNÍ RYCHLOSTI SEPARACE ZRN PŘI MODELOVÝCH PARAMETRECH	44

SEZNAM grafů

GRAF 1 PRODUKCE ODPADŮ Z VÝROBY FE A OCELI 2006 – 2010 [14]	14
GRAF 2 HMOTNOSTNÍ ZASTOUPENÍ PODÍLŮ V % U KALU Z TŘINCE PO RTG DIFRAKCI	30
GRAF 3 KAL Z TŘINCE	37
GRAF 4 KAL KK	38
GRAF 5 ODPRAŠKY Z EOP	39
GRAF 6 ODPRAŠKY Z VÝROBY LITINY	40
GRAF 7 POROVNÁNÍ MK MEZI JEDNOTLIVÝMI MATERIÁLY	41
GRAF 8 ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI RADIÁLNÍ RYCHLOSTI ZRN VE VODĚ NA VELIKOSTI ZRN U KALU Z TŘINCE	45
GRAF 9 ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI RADIÁLNÍ RYCHLOSTI ZRN VE VODĚ NA VELIKOSTI ZRN U KALU KK	45
GRAF 10 ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI RADIÁLNÍ RYCHLOSTI ZRN VE VODĚ NA VELIKOSTI ZRN U ODPRAŠKŮ Z EOP	46
GRAF 11 ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI RADIÁLNÍ RYCHLOSTI ZRN VE VODĚ NA VELIKOSTI ZRN U ODPRAŠKŮ Z VÝROBY LITINY	46