

Modifikace mikročástic karbonyl železa v nízkoteplotním plazmatu

Michal Stasiak

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal STASIAK**
Osobní číslo: **T09752**
Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Modifikace mikročástic karbonyl železa
v nízkoteplotním plazmatu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární rešerši k tématu.
2. Připravit vzorky karbonyl železa pro úpravu v plazmatu.
3. Provést experimenty dle pokynů vedoucího práce.
4. Zpracovat výsledky a provést diskuzi.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tisková**

Seznam odborné literatury:

1. Sedláček, M., Pavlínek, V., Lehocký, M., Mráček, A., Grulich, O., Svrčinová, P., Filip, P., Vesel, A.: Plasma-treated carbonyl iron particles as a dispersed phase in magnetorheological fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 387 99–103 (2011).
2. Mezinárodní časopisy: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, atd. (dle výběru vedoucího práce).

Vedoucí bakalářské práce:

Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

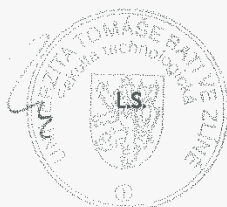
13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

7. května 2012

Ve Zlíně dne 13. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

I ¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

II ²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

III ³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o karbonyl železe, jeho výrobě, vlastnostech a použití. Je zde popsána příprava vzorků karbonyl železa v silikonové a 2 – hydroxyethylcelulózové matrici a jejich úprava v plazmatu. Dále práce popisuje zkoumání vzorků pomocí optického mikroskopu, SEM a AFM mikroskopu.

Klíčová slova: Karbonyl železo, CI, částice karbonyl železa, prášek karbonyl železa, úprava plazmatem, silikonová matrice, 2-hydroxyethylcelulózová matrice.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on carbonyl iron, its production, features and application. There are describe preparation carbonyl iron samples in silicon and 2 – hydroxyethyl cellulose matrix and theirs plasma treatment. Furthermore thesis describes samples observation using a optical microscope, SEM and AFM microscope.

Keywords: Carbonyl iron, CI, carbonyl iron particles, carbonyl iron powder, plasma treatment, silicon matrix, 2 - hydroxyethyl cellulose matrix.

Rád bych zde poděkoval Ing. Michalovi Machovskému a Bc. Janě Bartošové za pořízení snímků SEM, Ing. Ondřeji Grulichovi, za pomoc při úpravách vzorků plazmatem, Ing. Magdě Rafajové za pořízení snímků pomocí AFM mikroskopu a zejména Mgr. Aleši Mráčkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a všestrannou pomoc.

Nakonec bych rád poděkoval své rodině za trvalou podporu při mé cestě životem.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
IV TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KARBONYL ŽELEZO	12
1.1 HISTORIE.....	12
1.2 VLASTNOSTI.....	13
1.2.1 Toxicita	13
1.2.2 Fyzikální vlastnosti	13
1.2.2.1 Elektrické vlastnosti.....	13
1.2.2.2 Magnetické vlastnosti	15
1.3 VÝROBA.....	19
1.4 DISTRIBUCE.....	25
1.5 POUŽITÍ	26
1.5.1 Magnetoreologické kapaliny.....	26
1.5.2 Medicínské aplikace.....	31
1.5.2.1 Léčba anemie	31
1.5.2.2 Magnetické navádění léčiv a radioizotopů	31
1.5.2.3 Hypertermie	33
1.5.3 Další využití	34
2 PLAZMA	35
2.1 HISTORIE.....	35
2.2 DEFINICE A VLASTNOSTI	35
2.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY.....	36
2.4 DĚLENÍ.....	37
2.5 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ PLAZMATU	39
2.5.1 Osvětlovací technika	39
2.5.2 Řezání.....	39
2.5.3 Povrchové úpravy za použití plazmometů	41
2.5.4 Dezinfekce.....	41
2.5.5 Úprava povrchu	41
v PRAKTICKÁ ČÁST	44
3 PŘÍPRAVA VZORKŮ	45
3.1 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE.....	45
3.2 KARBONYL ŽELEZO - SILIKONOVÁ MATRICE	45
3.3 KARBONYL ŽELEZO – 2 - HEC MATRICE	46
3.4 MAGNETICKÉ POLE	47
3.5 ÚPRAVA VZORKŮ PLAZMATEM.....	48
4 ANALÝZA VZORKU	49
4.1 OPTICKÝ MIKROSKOP	49
4.2 SEM (SKENOVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP).....	50
4.3 AFM (MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL).....	54
5 DISKUSE VÝSLEDKŮ	59
ZÁVĚR	60

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
SEZNAM OBRÁZKŮ	70
SEZNAM TABULEK.....	72
SEZNAM PŘÍLOH.....	73

ÚVOD

Karbonyl železo, tedy železo vyráběné z pentakarbonylu železa, je významným materiálem aplikovatelným v moderním průmyslu. Jeho mimořádné postavení je zapříčiněno čistotou, velikostí částic v řádu jednotek mikrometrů a pravidelným kulovitým tvarem. Zmínky o jeho využívání lze nalézt v celé škále oborů a lidských odvětví jako např. v metalurgii, chemické syntéze, v medicíně, v elektrotechnice atp. Navíc je stěžejní složkou magneto-reologických kapalin, „chytrých“ materiálů nalézajících stále nová uplatnění.

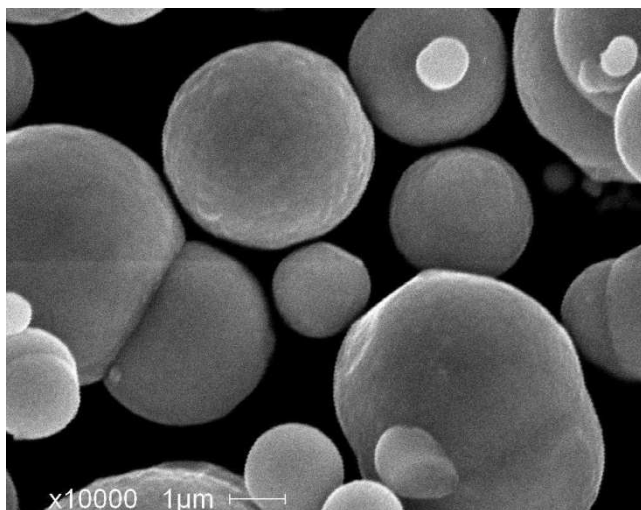
Tato práce se zaměřuje na úpravu karbonyl železa v plazmatu. V teoretické části je popsána výroba, vlastnosti a použití karbonyl železa. Jsou zde také podány informace o principu, a využití plazmatu.

V praktické části je popsána příprava vzorků karbonyl železa jeho orientací v matici magnetickým polem, dále je popsána úprava vzorků plazmatem a zkoumání vzorků pomocí optického mikroskopu, SEM a AFM mikroskopu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KARBONYL ŽELEZO

Karbonyl železo je elementární železo, které je vyráběné tepelným rozkladem z pentakarbonylu železa. Vyrábí se ve formě prášku. Pro železo vyráběné tímto způsobem je charakteristická malá velikost částic v řádu jednotek mikrometrů, kulovitý tvar a čistota, která je obvykle v rozmezí 97,5 až 99,5 hmotnostních procent. Nečistoty jsou tvořeny uhlíkem, kyslíkem a dusíkem [1].



Obr. 1. Částice karbonyl železa.

1.1 Historie

Postup výroby karbonyl železa byl objeven roku 1925 společností BASF. Společnost stále karbonyl železo vyrábí [3].

Důležité uplatnění nalézá hned pár let po objevení. Roku 1898 totiž Valdemar Poulsen nechává patentovat telegrafón– první úspěšné zařízení pro magnetické nahrávání hlasu. Nahrávalo se na železný drát. Ze snahy nalézt vhodnější nahrávací materiál vznikl roku 1928 patent na použití magneticky aktivního prášku naneseného na papírové pásce. Autorem byl Fritz Pfleumer [4]. Roku 1930 se společnost AEG zaměřila na výrobu magnetofonů. Využila nápadu Fritze Pfleumera a spolu se společností BASF vytvořila první magnetofonovou pásku. Ta byla tvořena acetátem celulózy, jakožto nosičem pro částice karbonyl železa [4].

Od té doby se karbonyl železo používá v mnoha oblastech lidské činnosti, ať již jde o elektrotechniku [5], chemickou výrobu [6], nebo strojírenství [7].

1.2 Vlastnosti

Karbonyl železo je železo ve formě prášku šedé barvy. Název karbonyl se používá z důvodu jeho přípravy. Železný prášek, oproti jiným formám železa, vyniká malou velikostí částic, (viz. *Tab. 2*). Obecné vlastnosti shrnuje (*Tab. 1*). Konkrétní vlastnosti potom závisí na způsobu výroby. Společnost BASF rozlišuje dvě třídy, tvrdý a měkký, které se svými vlastnostmi a vhodností použití liší.

Bod tání	1535 °C
Bod varu	2750 °C
Teplota vznícení	>100 °C
Hustota	7,86 g·cm ⁻³
Sypná hustota	~ 4 g·cm ⁻³
Molární hmotnost	55,85 g·mol ⁻¹
Odpor	9,71 μΩ·cm

Tab. 1. Vlastnosti karbonylu železa [7-9].

Sypná hustota uvedená v (*Tab. 1*) udává hmotnost tuhého materiálu uloženého v nejtěsnějším uspořádání v dobře sklepané vrstvě o určitém objemu [10]. Měření sypné hustoty lze provést v laboratorních podmínkách nebo pomocí specializovaného přístroje – analyzátoru sypné hustoty [11].

1.2.1 Toxicita

Hodnota pro akutní toxicitu je následující: LD50 Orálně - krysa - 30.000 mg/kg [9].

Karbonyl železo nebylo potvrzeno jakožto pravděpodobný nebo možný karcinogen. Naopak vykazuje oproti jiným variantám železa nízkou toxicitu, a proto se používá jako medikament [12].

1.2.2 Fyzikální vlastnosti

1.2.2.1 Elektrické vlastnosti

Pro popis elektrických vlastností materiálu je stěžejní veličinou permitivita, kterou lze určit ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (1)$$

kde D je elektrická indukce ($\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$) a E intenzita elektrického pole ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$),

a pro kterou platí:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2)$$

kde ε_0 je permitivita vákua ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$) a ε_r relativní permitivita[13].

Permitivita se řadí mezi komplexní veličiny. Ty lze obecně napsat ve tvaru:

$$x(\omega) = x_1(\omega) + i \cdot x_2(\omega) \quad (3)$$

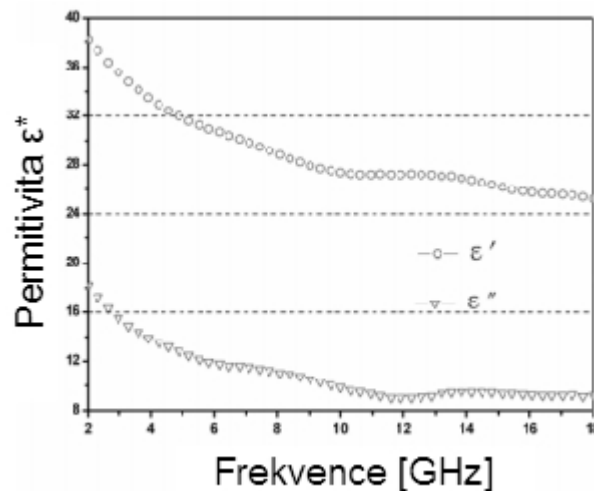
kde ω je frekvence (Hz), x_1 reálná část veličiny a x_2 imaginární část veličiny, která určuje ztráty v materiálu. Pro frekvence blížící se k nule se budou vlastnosti blížit statickým hodnotám.

Konkrétně permitivitu lze rozepsat:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4)$$

Kde ε' je reálná část a $i\varepsilon''$ imaginární část permitivity.

Frekvencí je v tomto případě změna intenzity elektrického pole v čase[14].

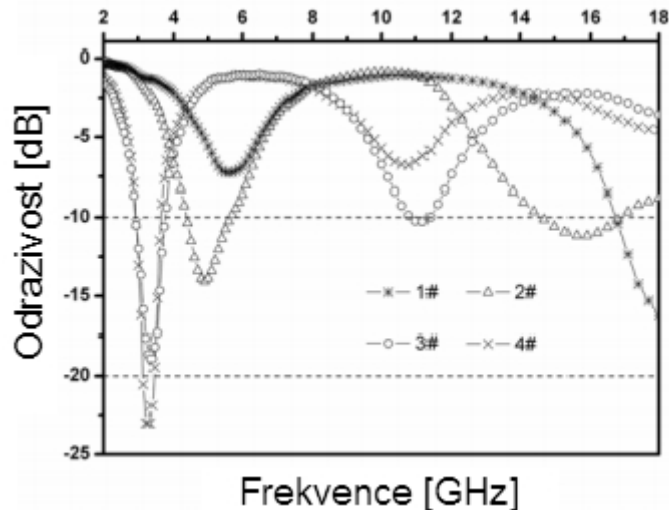


Obr. 2. Závislost permitivity na frekvenci. ε' je reálná část a ε'' imaginární část permitivity.

Pro zjištění chování v elektrickém poli byla zavedena odrazivost $R[\text{dB}]$, pro kterou uplatí:

$$R = 20 \log \left| \frac{E_r}{E_i} \right| \quad (5)$$

kde E_r je intenzita odraženého elektrického pole a E_i je intenzita dopadajícího elektrického pole. Byly zhotoveny čtyři vzorky karbonylželeza v silikonové pryži, 4mm silné, s hmotnostním obsahem 50%, 60%, 70 % a 80% pojmenované 1-4. Výsledky shrnuje (Obr.3)[15].



Obr.3. Závislost odrazivosti na frekvenci pro silikonové vzorky o různých koncentracích karbonyl železa.

1.2.2.2 Magnetické vlastnosti

Karbonylové železo spadá mezi látky feromagnetické.

U látek obecně je magnetický moment částic způsoben:

- pohybem elektronu kolem jádra – orbitální moment
- vlastní rotací elektronu – spinový moment
- vlastní rotací jádra atomu – jaderný moment

Orbitální moment

Podle Bohrova modelu atomu se atom skládá z kladného jádra a záporných elektronů, které okolo jádra obíhají po dovolených trajektoriích, jež jsou kružnicové. Přičemž podle Ampéra lze brát každý elektron jako proudovou smyčku s magnetickým momentem

$$m_e = \mu_0 I S = \frac{\mu_0 e \omega}{2\pi} \pi r^2 = \frac{\mu_0 e \omega r^2}{2} \quad (6)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua ($\mu_0 \sim 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$), I elektrický proud [A], e elementární náboj ($e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), ω úhlová frekvence rotace elektronu kolem jádra [s^{-1}].

elektron má také moment hybnosti m_{orb} , pro něj platí:

$$m_{orb} = m \omega r \quad (7)$$

kde m je hmotnost elektronu [kg].

Podíl magnetického momentu a momentu hybnosti se nazývá gyromagnetický poměr g [13, 16]:

$$\frac{m_e}{m_{orb}} = g \quad (8)$$

Spinový moment

Elektron má vnitřní vlastnost, kterou je spin s . Představuje vnitřní rotaci elektronu a může nabývat hodnot $s = \pm 1/2$.

Jaderný moment

Jaderný moment je vzhledem k rozdílu hmotností elektronu a jádra velmi malý. Jaderný moment hraje klíčovou roli při analýze složení vzorků pomocí nukleární magnetické rezonance.

Výsledný magnetický moment složitějších atomů je vektorovým součtem orbitálních a spinových momentů.

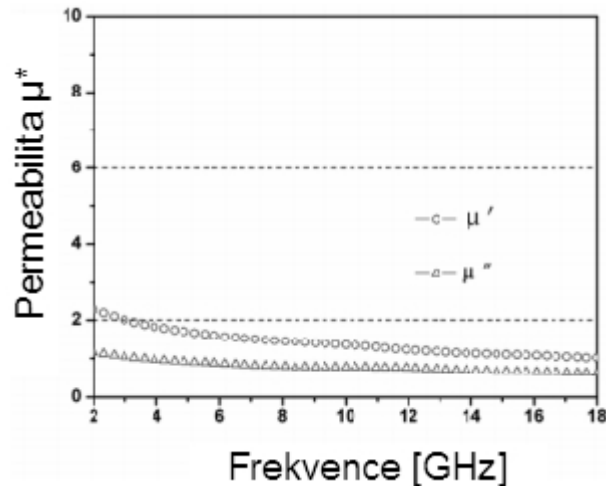
Pakliže jsou úplně vykompenzovány orbitální momenty, potom má na výsledný moment atomu vliv pouze spinový moment atomu. A takové látky se nazývají feromagnetickými [13, 16].

Feromagnetické látky mají magnetickou permeabilitu $\mu_r \gg 1$ a susceptibilitu $\chi \gg 0$. Susceptibilita dosahuje hodnot $10^3 - 10^5$.

Analogicky ke komplexní permitivě lze zavést komplexní permeabilitu pro proměnná magnetická pole:

$$\mu^* = \mu' - i\mu'' \quad (9)$$

Kde μ' je reálná část a $i\mu''$ imaginární část permeability.



Obr. 4. Závislost permeability na frekvenci.

μ' je reálná část a μ'' imaginární část permeability.

Při dosažení Curieovy teploty T_c , pro železo se $T_c = 1043$ K, vysoká permeabilita zaniká a látky se začnou chovat jako paramagnetické, železo tedy ztrácí své feromagnetické vlastnosti.

Ve feromagnetických látkách dochází k interakci mezi magnetickými momenty atomů v krystalu. To vede, pod hodnotou Curieovy teploty, k uspořádání do magnetických domén, přičemž každé doméně je přiřazen vektor spontánní magnetizace \vec{M}_s [13, 16].

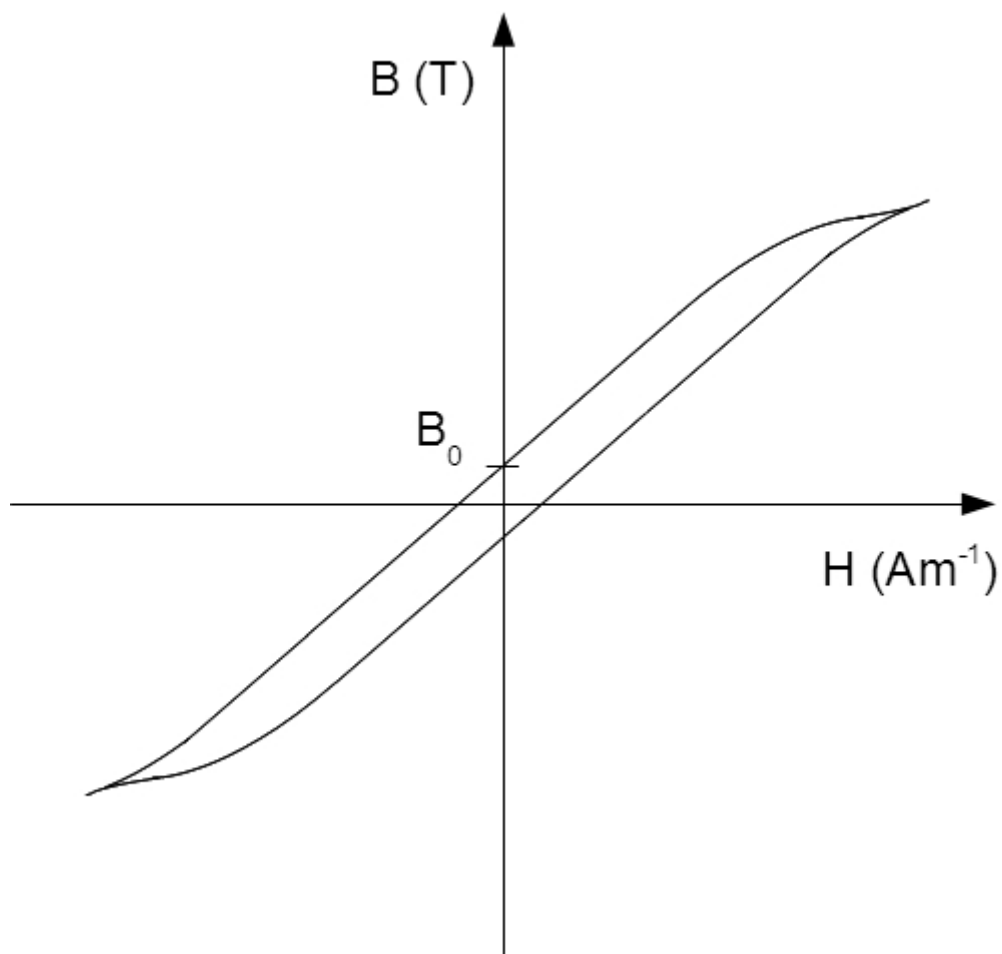
Domény jsou makroskopické oblasti o rozměrech $10^{-5} - 10^{-3}$ m, ve kterých má vektor magnetizace stejnou velikost, i směr. Rozhraní mezi doménami se nazývá Blochova stěna a má tloušťku asi 300 mřížkových konstant. Jednotlivé domény se vůči sobě postupně otáčejí. Výsledné uspořádání je takové, aby byla celková magnetická energie co nejmenší.

Samotné částice karbonyl železa jsou, vzhledem ke své velikosti v řádu jednotek mikrometrů, jednodoménové.

Pakliže se teplota nachází pod Curiovou teplotou a součet magnetických momentů všech domén se rovná nule, pak je zkoumaný materiál v počátečním stavu. Pokud následně zkoumaný materiál vložíme do magnetického pole, tak začnou domény, jejichž směr natočení je příznivý vůči směru vnějšího pole zvětšovat objem na úkor nepříznivě natočených domén. Při zvyšování intenzity magnetického pole poroste nadále objem domény, až bude jedinou v materiálu. Při dalším zvětšování intenzity magnetického pole dojde ke shod-

né orientaci vektoru magnetizace domény jakou má směr vnějšího magnetického pole. Dosáhne se nasycení magnetizace[13, 16].

Pokud se následně sníží intenzita vnějšího magnetického pole na nulu, vykazuje materiál i při nulovém vnějším magnetickém poli tzv. remanentní magnetismus B_r . Pro zrušení tohoto remanentního magnetismu je potřeba jisté záporné hodnoty vnějšího magnetického pole H_c , tzv. koercitivní síly. Při opakování a zaznamenávání vznikne tzv. hysterezní smyčka (viz. Obr. 5) a bude se uvolňovat teplo.



Obr. 5. Hysterezní smyčka pro magneticky měkký materiál.

Podle toho, jaký remanentní magnetismus materiály vykazují a podle velikosti potřebné koercitivní síly je dělíme na:

- magneticky tvrdé materiály
- magneticky měkké materiály

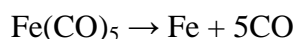
Magneticky tvrdé materiály si drží získané magnetické vlastnosti, a proto se hodí na výrobu permanentních magnetů.

Magneticky měkké materiály nevyžadují tolik energie na přemagnetování jako magneticky tvrdé materiály a proto se používají např. jako elektromagnety.

Železo je magneticky měkký materiál [13, 16].

1.3 Výroba

Práškové železo se vyrábí tepelným rozkladem par pentakarbonylu železa v reaktoru. Podle podmínek rozkladu lze dosáhnout různé čistoty železa a různé velikosti částic. Chemická rovnice rozkladu je následující [17]:



Obr. 6. Příprava karbonyl železa[17].

K rozkladu dochází za atmosférického tlaku při optimální teplotě 250-280 °C. Pentakarbonyl železa se v přesně určeném množství dávkuje do odpařovacího zařízení, kde se při teplotě, jež je nad teplotou varu (t.v. je 103°C) odpaří. Páry pentakarbonylu vstupují shora do válcového rozkladného reaktoru, svislé kovové nádoby, kde se při výše zmíněných teplotách rozloží. Produkty jsou oxid uhelnatý a zárodečné částice železa. Ty postupně padají a v prostředí par pentakarbonylu dále narůstají. Nakonec se usazují v nádobě pod reaktorem. Částice nejmenších rozměrů jsou unášeny odcházejícím plynem do zachycovacího zařízení, plyn je filtrován [17].

Střední průměr částic usazených v nádobě pod reaktorem je 4-5 mikrometrů. Částice, jež byly unášeny plynem a následně odfiltrovány mají střední průměr 3-4 mikrometry. Konečná velikost částic, tedy parametr důležitý pro následnou distribuci, závisí na množství vzniklých zárodečných jader, jež vzniknou po vstupu par do rozkladného reaktoru a na době setrvání částic v reaktoru; na délce reaktoru a na rychlosti proudících plynů. Množství vzniklých zárodečných jader je závislé na teplotě par vstupujících do reaktoru, na rychlosti dávkování par, na jejich zředění plyny a na teplotě reaktoru v pásmu vstupujících par. Čím vyšší je počet zárodečných center, tím menší rozměry budou částice mít, neboť na jednu částici připadne menší množství par pentakarbonylu železa.

Pro ovlivnění výsledné velikosti částic je nutné znát rychlost narůstání částic popřípadě další údaje. Ty lze vypočítat při stanovení několika podmínek a předpokladů [17]:

1. Reakce rozkladu pentakarbonylu železa je monomolekulární[18].
2. Teplota, tlak i dávkování pentakarbonylu do reaktoru jsou neměnné.

3. Všechny zúčastněné látky se řídí zákony ideálních plynů.
4. Rychlost tvorby $\text{Fe}(\text{CO})_5$ dle reakce $\text{Fe}(\text{CO})_5 \leftrightarrow \text{Fe} + 5\text{CO}$ je za podmínek rozkladu $T = 543,15 \text{ K}$, $p = 101325 \text{ Pa}$ Pazanedbatelná vzhledem k hodnotě rovnovážné konstanty této rovnice při $T = 543,15 \text{ K}$, která má hodnotu $K_p = 1,26 \cdot 10^{12}$ [19]
5. Uvažovaná velikost částice pro výpočty je 5 mikrometrů.

Nejprve je nutné vypočítat rychlostní konstantu k .

Reakční rychlost je obsažena v rovnici [17]:

$$\left(5 \cdot \frac{1}{N} - 4\right) \cdot dN = -\frac{k}{n_0} \cdot \frac{p}{RT} \cdot dV_R \quad (10)$$

kde je n_0 množství $\text{Fe}(\text{CO})_5$ dávkované do reaktoru [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$], n počet molů $\text{Fe}(\text{CO})_5$, které zbývají nerozloženy v reakční směsi sekundu po době t [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$], $N = n/n_0$ je poměr nerozloženého $\text{Fe}(\text{CO})_5$ k celkovému dávkovanému $\text{Fe}(\text{CO})_5$, V_R celkový objem reakční směsi v reaktoru. Je to objem veškeré reakční směsi od počátku do reaktoru dávkované a expandující následkem probíhajícího rozkladu [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]:

$$dV_R = V \cdot dt \quad (11)$$

Po určení integrační konstanty z podmínek $t=0$, $V_R=0$ a $N=1$ a po vyjádření k dostaneme:

$$k = -\frac{n_0}{V_R} \cdot \frac{p}{RT} \cdot [4(1 - N) + 5 \cdot \ln N] \quad (12)$$

Po vypočítání rychlostní konstanty již lze vypočítat n . Výpočet vychází z rovnice:

$$\frac{dn}{dt} = -k \cdot n \quad (13)$$

Integrací dostáváme:

$$\ln n = -kt + C \quad (14)$$

Integrační konstantu určíme z podmínky pro $t = 0$, $n = n_0$. Potom se $C = \ln n_0$. Dosazením dostaneme [17]:

$$\ln n = -kt + \ln n_0 \quad (15)$$

$$n = n_0 \cdot e^{-kt} \quad (16)$$

Z rovnice lze určit dobu průchodu reakční směsi reaktorem[17]:

$$t_{průch} = \frac{\ln \frac{n_0}{n}}{k} \quad (17)$$

Počet kulových částic z , které vzniknou v reaktoru za 1 s při uvažované velikosti částic 5 mikrometrů je[17]:

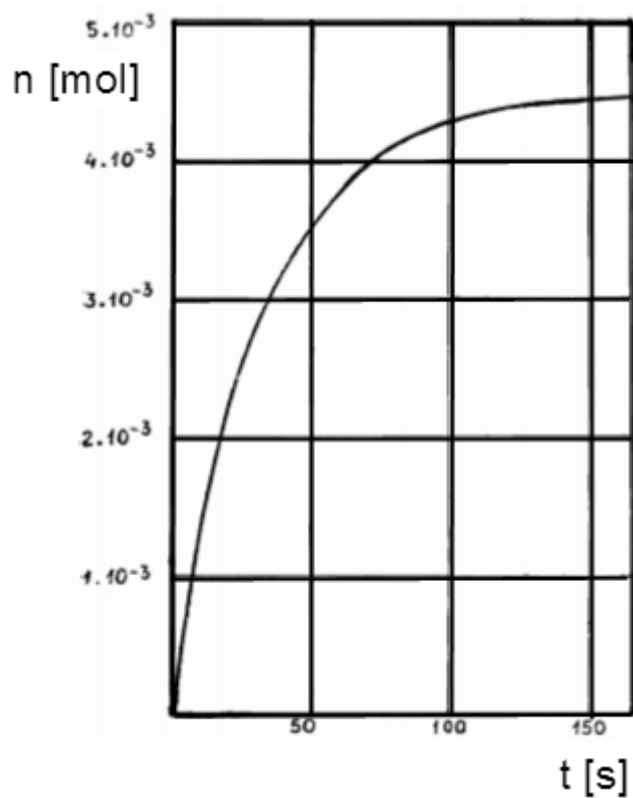
$$z = \frac{(n_0 - n_p) \cdot A}{\frac{\pi \cdot d^3 \cdot \rho}{6}} \quad (18)$$

kde je A atomová hmotnost železa, ρ hustota železa, n_p počet molů $\text{Fe}(\text{CO})_5$, které prošly celým reaktorem, aniž by se zúčastnily reakce [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$]. Rozdíl $n_0 - n_p$ je potom počet molů Fe , které se utvořily po reakční době totožné s průchodem směsi reaktorem.

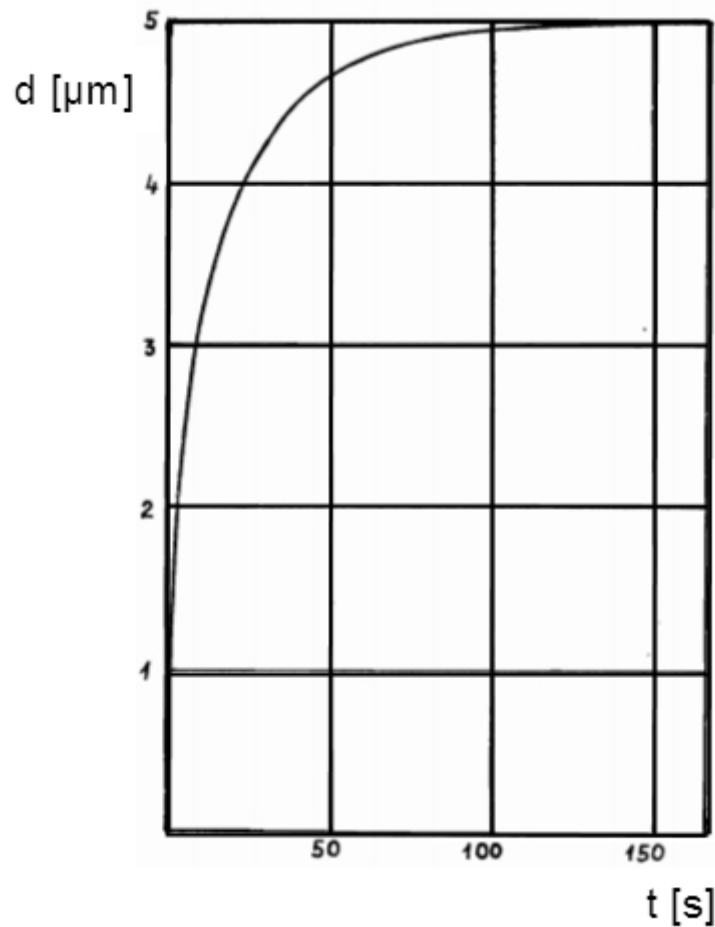
Střední průměr částice vzniklé po reakční době t lze určit ze vztahu[17]:

$$\bar{d} = \frac{d}{\sqrt[3]{n_0 - n_p}} \cdot \sqrt[3]{n_0 \cdot (1 - e^{-kt})} \quad 19$$

kde je d průměrná velikost částic ($d = 5 \cdot 10^{-6} \text{m}$, viz. předpoklady).



Obr. 7. Závislost počtu molů železa vzniklého vreakční směsi dávkované za 1 sekundu.



Obr. 8. Závislost růstu železných kuliček na čase.

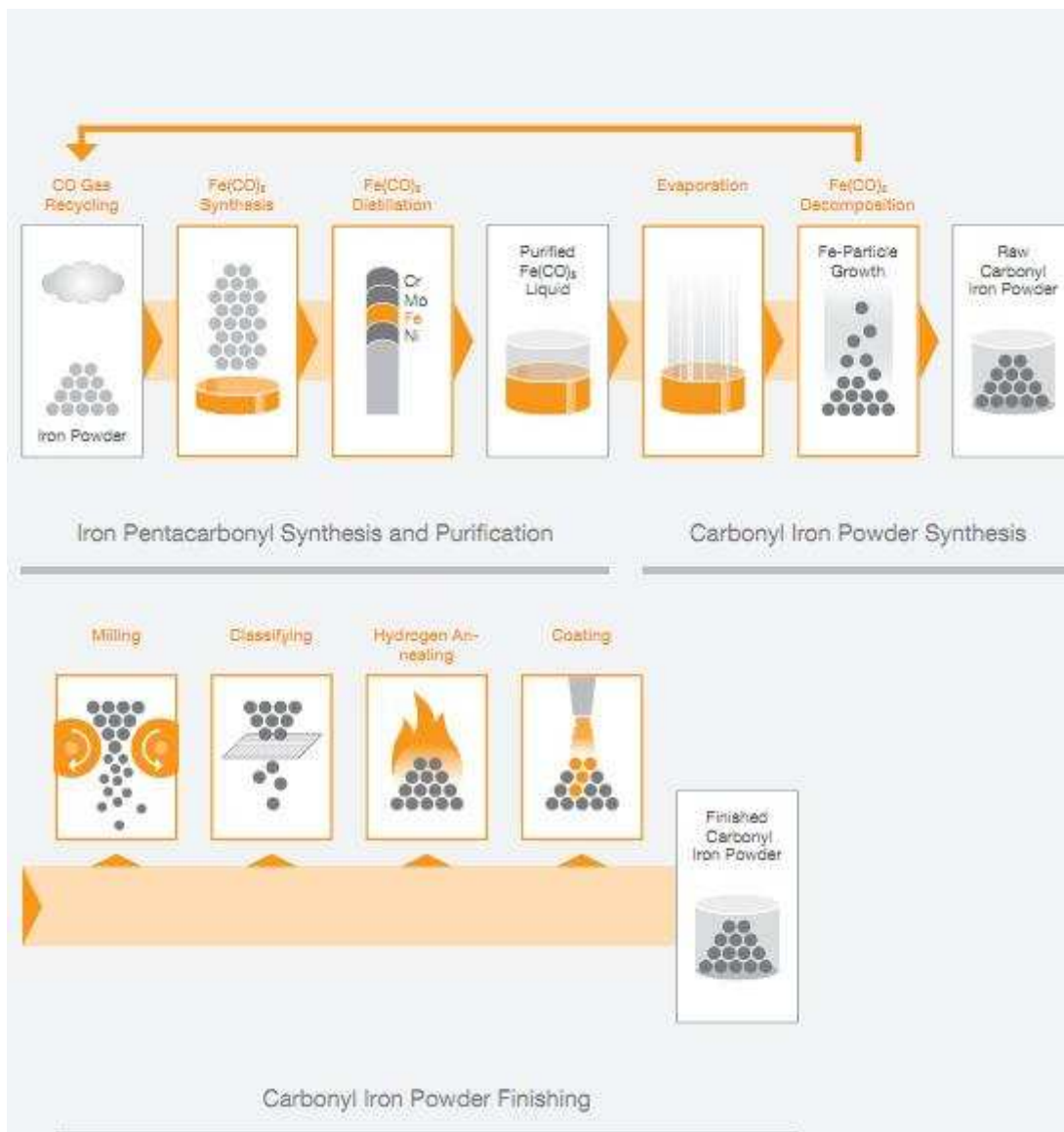
Z (Obr. 8) je patrné, že částice železa dosahuje poloviny svého konečného průměru již v průběhu několika vteřin.

Celý výrobní proces je vhodný pro výrobu částic v řádu několika mikrometrů. Vyrobit částice mimo rozmezí přibližně 2-10 mikrometrů by si žádalo použití jiného pracovního postupu, nebo úpravy výrobního zařízení [17]. Částice menší než μm totiž vznikají v řádu sekund. Průchodem výrobním zařízením, které trvá určitou dobu, se jejich střední průměr zvětšuje a proto za určitých rozměrů výrobního zařízení nemůže být střední průměr částic menší než přibližně 2 mikrometry. Naopak pro získání částic nad 10 mikrometrů by bylo nutné upravit rozměry výrobního zařízení a rychlost proudících plynů, aby mohla částice po delší čas narůstat v prostředí par pentakarbonylu železa.

Výše popsanou výrobou lze vyrobit karbonyl železo, které společnost BASF řadí do třídy tvrdé. Má obvykle slupkovitou strukturu, je mechanicky tvrdé, obsah železa je vyšší než 97,5% a obsahuje nečistoty, obvykle kyslík, dusík a uhlík.

Další úpravou se vyrábí karbonyl železo spadající do měkké třídy. To má polykrystalickou strukturu, je mechanicky měkké, má lepší vlastnosti při stlačení, vyšší čistotu a zanedbatelný obsah cizích látek.

Hlavní proces, kterým dále karbonyl železo prochází, je žíhání vodíkem, při kterém dojde k snížení obsahu nečistot v karbonylu železa [17]. Mezi další procesy patří deaglomerace mletím, třídění dle velikostí, míchání a potahování zrn povlakem [1].



Obr. 9. Schéma výroby společnosti BASF.

Tímto postupem lze dosáhnout vysoké čistoty. Firma AmericanElements například prodává karbonyl železo o čistotě 99,999 % [20].

1.4 Distribuce

Karbonyl železo se prodává ve formě prášku, ve stogramových, kilogramových popř. jiných baleních. Výrobou se zabývá řada firem, např. BASF, Sintez-CIP a Sigma – Aldrich. Karbonyl železo se vyrábí v různé velikosti částic a v různé čistotě, BASF například rozlišuje jednotlivé třídy dle čistoty a velikosti zrn a navíc zohledňuje budoucí aplikaci, jak ukazuje (Tab. 2).

Třída	aplikace	typ	Fe min. (%)	C max. (%)	N max. (%)	O max. (%)	d ₅₀ (μ m)	potažení
CIP SQ-I	Elektrické součástky	m.	98,5	0,03		0,7	3,8-5,4	ano
CIP EW-I	Absorpce mikrovln	t.	97	0,9			3,0-4,0	ano
CIP OS	Vstřikování kovových prášků	t.	97,5	0,7-0,9	0,5-0,9	0,6-0,9	3,4-4,4	
CIP CN	Prášková metalurgie & Syntéza diamantů/d. nástroje	m.	99,5	0,03	0,01	0,10-0,25	6,5-8,0	
CIP SM	Diamantové nástroje	m.	99,0	0,1	0,1	0,55	3,5	
CIP CF	Výživový doplněk	m.	99,5	0,03	0,01	0,23	9,5	
ZVI MICROS- PHERES 200	Sanace podzemních vod	t.	97,5	1,0	1,0	0,5	5,2	

Tab. 2. Ukázka tříd komerčně prodávaného karbonyl železa a různorodosti jeho vlastností. m. je zkratka pro měkké třídy, t. tvrdé.

Velikost zrn je uváděna jako střední aritmetický průměr zrn d_{50} . V některých případech jsou uváděny i hodnoty d_{10} a d_{90} [21]. Karbonyl železo lze též koupit v čisté formě, nebo s povlakem na zrnech[1]. Ten zlepšuje tokové vlastnosti materiálu, čímž je tento lépe aplikovatelný při kovovém vstřikování [22]. Obalení zrn také může sloužit jako izolace, což

umožní aplikaci karbonylu železa jakožto výrobní suroviny pro induktivní elektronické součástky[23].

Cena výrazně závisí na velikosti částic. Zatímco 100g karbonylu železa o velikosti částic do 100 mikrometrů lze pořídit za 100Kč[24], 100g karbonylu železa o velikosti částic 6-9 mikrometrů stojí asi 600 Kč[25].

1.5 Použití

1.5.1 Magnetoreologické kapaliny

Magnetoreologické(MR) kapaliny jsou nekoloidní suspenze magnetizovatelných částic velikosti v řádu mikrometrů. Neměly by být zaměňovány za koloidní feromagnetické kapaliny. Ta jsou taktéž tvořeny magnetizovatelnými částicemi, nicméně o velikostech o tři řády nižších[26]. MR kapaliny spadají do skupiny materiálů známých jako „chytré materiály“. Schopností chytrých materiálů je změna vlastností vyvolaná vnějším podmětem. Konkrétně u MR kapalin je to skoková změna viskozity vyvolaná magnetickým polem.

Historie MR kapalin započala ve čtyřicátých letech 19. století jejich zhotovením Jacobem Rabinowem[27]. Vzbudily veliký zájem, který nicméně po pár letech ustal. Až v devadesátých letech se výzkum obnovil. To bylo zejména způsobeno výzkumem společnosti LORD [28].

MR kapaliny se obvykle skládají z 20-40obj. % relativně čistých částic karbonylu železa suspendovaných v kapalině. Klíčovou vlastností částic určující vlastnosti MR kapalin je jejich saturační magnetizace. Nejlepší saturační magnetizaci vykazuje slitina železa a kobaltu známá jako Permendur, pro níž je hodnota saturační magnetizace okolo 2,4T. Bohužel je tato slitina velmi drahá, a proto se jako nejlepší materiál pro částice jeví čisté železo. Prakticky všechny feromagnetické kovy, slitiny a oxidy vykazují významně nižší hodnotu saturační magnetizace, než železo, což by vedlo k tvorbě slabých MR kapalin [26].

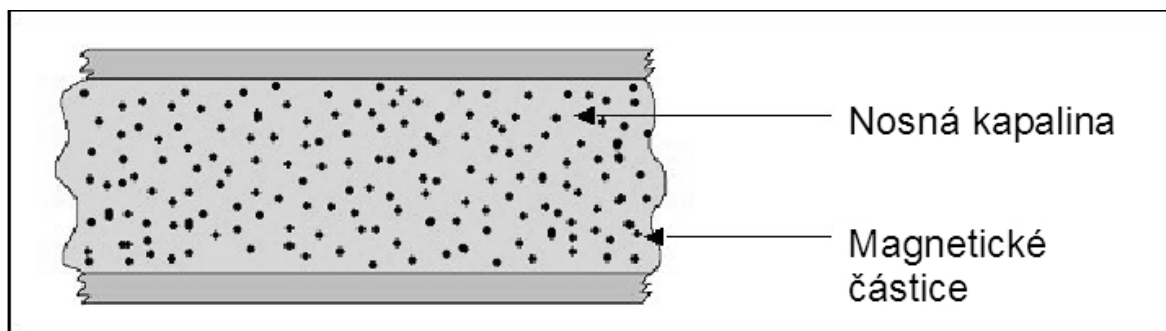
Průměr částic je většinou 3-5 μm . Funkční MR kapaliny lze zhotovit i z větších částic, nicméně suspendování částic v takovém systému bude obtížnější. Lze též použít i částic menších, jenž lze naopak lépe rozdispergovat, nicméně překážkou v jejich použití je obtížná výroba a s ní spojená vysoká cena. Karbonyl železo se obvykle nevyrábí o menším průměru, než jsou 1-2 μm . Výrazně menší feromagnetické částice jsou dostupné obvykle ve formě oxidů [26].

Jako kapalin se používá minerálních olejů; syntetických olejů, mnohdy silikonových[27]; vody nebo popř. jiných látek. Součástí MR kapalin mohou být některá z celé řady aditiv, která jsou přidávána za účelem potlačení sedimentace částic, kvůli změně viskozity, vylepšení tření a snížení opotřebení [26].

Název	Částice	$V_s/V_l(\%)$	Nosná kapalina	Hustota (g/ml)
MRX-126PD	Fe (~03 μm)	26	Uhlovodík	2.66
MRF-132LD	Fe (~03 μm)	32	Uhlovodík	3.04
MRF-240BS	Fe (~03 μm)	40	Voda/Glykol	3.90
MRX-336AG	Fe (~03 μm)	36	Silikonový olej	3.47

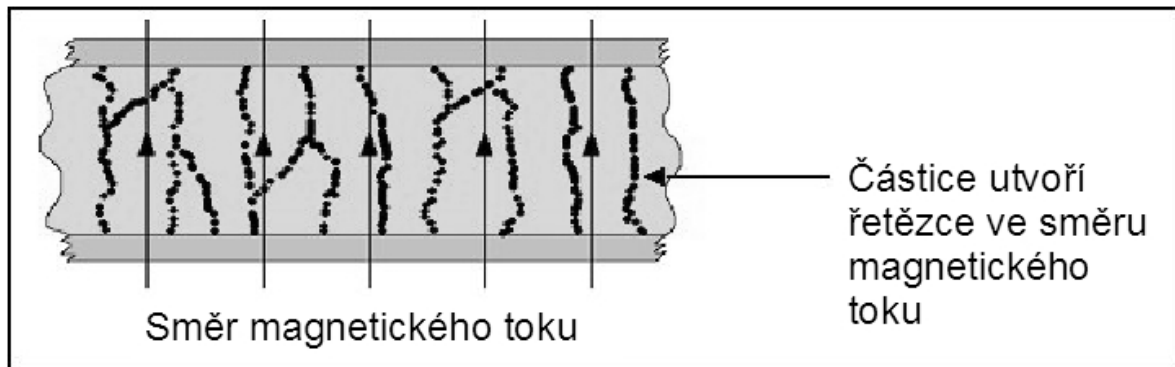
Tab. 3. Charakteristika několika komerčně využívaných MR kapalin [29].

Principem změny vlastností MR kapalin je změna uspořádání magneticky aktivních částic v jejich prostředí. Pokud není přítomno magnetické pole, nebo je slabé, potom jsou částice suspendovány v kapalině jak zobrazuje (Obr. 10).



Obr. 10. Uspořádání MR kapaliny bez přítomnosti magnetického pole.

Ovšem při vystavení MR kapaliny magnetickému poli dojde k magnetizaci částic. Tyto se potom uspořádají do tenkých řetězců orientovaných ve směru magnetických indukčních čar (viz. Obr. 11)[28].



Obr. 11. Uspořádání MR kapaliny v přítomnosti magnetického pole.

Uspořádáním se skokově změní vlastnosti MR kapaliny, což může být navenek pozorováno jako změna viskozity, ačkoliv ve skutečnosti k takové změně nedošlo.

Matematicky jsou MR kapaliny popisovány jako binghamské látky s proměnlivým smykovým napětím [31]. V tomto modelu je tok látek popsán Binghamovou rovnicí:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta\dot{\gamma}$$

$$\tau < \tau_y$$
(20)

kde τ je napětí kapaliny (Pa), τ_y smykové napětí závislé na mag. poli (Pa), H intenzita magnetického pole ($A \cdot m^{-1}$), η plastickou viskozita, viskozita pro $H=0$ (Pa·s), $\dot{\gamma}$ smyková rychlost tekutiny (s^{-1}) [28].

Do hodnoty meze kluzu kapalina vykazuje viskoelastické chování, které lze popsat rovnicí:

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad \tau < \tau_y$$
(21)

kde G je modul pružnosti ve smyku ($N \cdot m^{-2}$), γ zkos (1).

Mez kluzu závisí na množství železa v kapalině. S rostoucím podílem železa se zvětšuje maximální možná velikost zatížení. MR kapaliny s částicemi karbonyl železa vykazují mez kluzu ve smyku 30-80 kPa pro 150-250 kA/m [32]. Tlaku odolávají mnohem lépe než smyku, jsou používány při tlaku až 17 MPa a měly by snést tlak nejméně o řád vyšší než je tento [32].

Maximální elektrické nároky MR kapalin jsou typicky 12V a 1A, díky čemuž mohou být napájeny bateriemi [32].

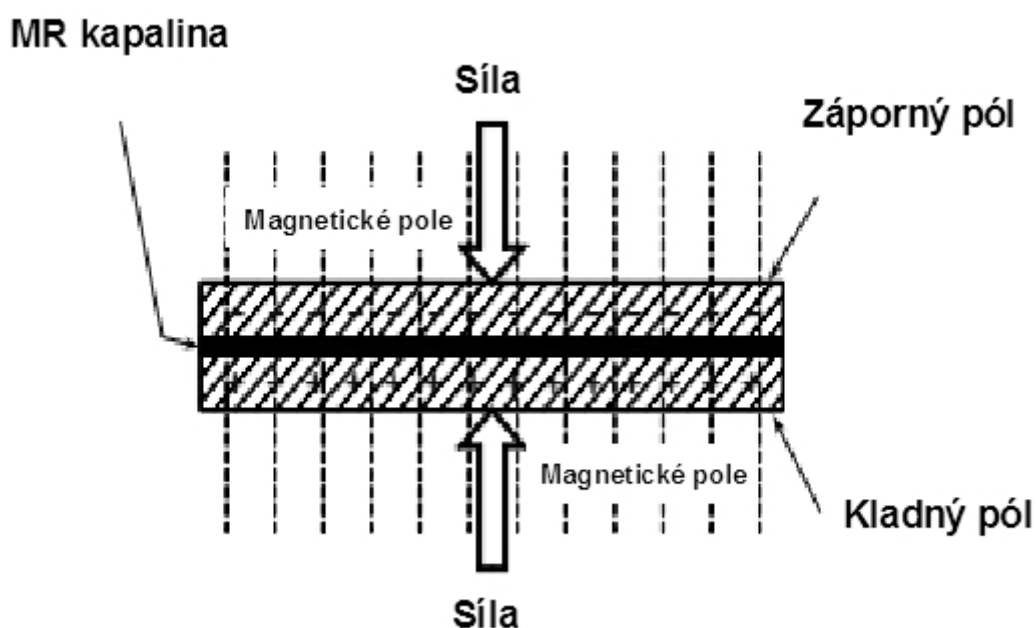
MR kapaliny mohou pracovat v provozním rozmezí teplot od $-40^\circ C$ do $150^\circ C$ a jsou obecně omezeny vlastnostmi nosné kapaliny [29].

Další důležitou vlastností je čas odezvy systému a ten je menší než 0,001 s. Ve většině zařízení využívajících MR kapalin je celkový čas odezvy závislý nikoliv na kapalině, ale na induktanci elektromagnetu a na impedanci řídicí elektroniky[32].

Mezi nevhodné vlastnosti MR kapalin patří aglomerace a sedimentace částic[29]. Zvláště sedimentace je velkým problémem, který znesnadňuje praktické využití MR kapalin. Proto je snahou tento jev co nejvíce potlačit. K tomu se dá využít různých aditiv. Typicky tixotropní činidla a surfaktanty, jako xanthan, silikagel[33], stearany a karboxylové kyseliny [34]. I přesto se hledají další způsoby, jak zamezit sedimentaci částic. Jedním z nich je úprava částic v plazmatu a navázání fluoru na jejich povrch díky použití procesního plynu C_4F_8 . Fluor na povrchu částic interaguje s metylovými skupinami silikonového oleje, který je nosičem, což vylepšuje sedimentační vlastnosti [35].

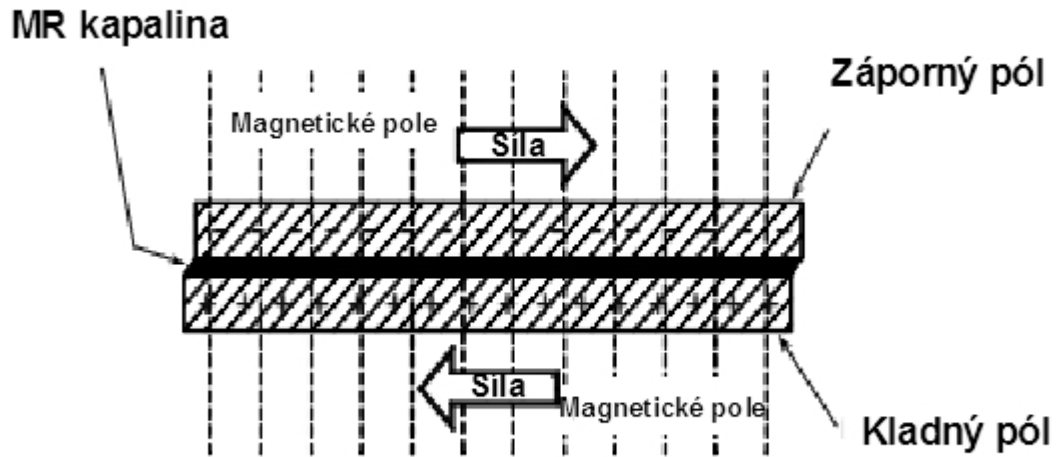
Při praktickém využití se MR kapaliny využívají ve třech módech: Tlakovém (squeeze), smykovém (shear) a ventilovém (valve)[28]. Každý z módů má jiná parametry a následnou aplikaci.

Zařízení využívající tlakového módu obsahují tenký film (přibližně 0,5 mm) MR kapaliny, která je umístěna mezi paramagnetické povrchy s póly (viz. Obr. 12)[28].



Obr. 12. MR kapalina v tlakovém (squeeze) módu.

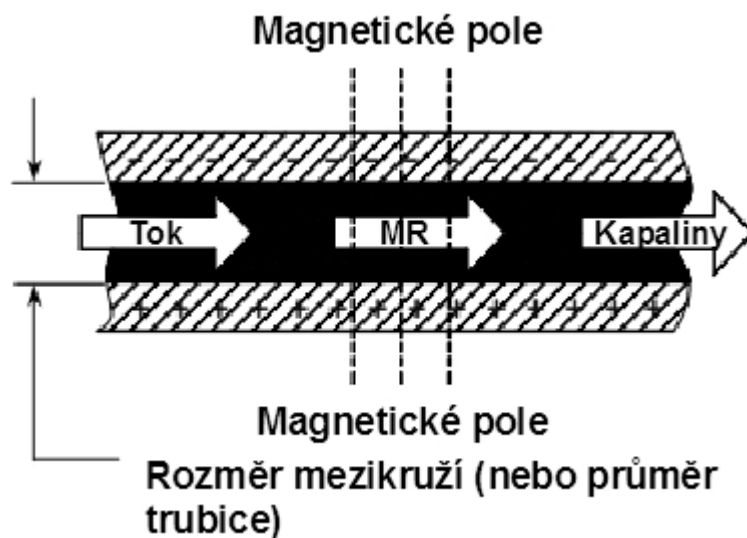
Ve smykovém módu je tenká vrstva (přibližně 0,13mm – 0,38mm) MR kapaliny umístěna mezi dva paramagnetické pohybující se povrchy (viz. Obr. 13).



Obr. 13. MR kapalina ve smykovém (shear) módu.

Vzhledem k nižším mechanickým vlastnostem při tečném zatížení (viz. výše) je tento mód vhodný pro tlumiče projektované na menší zatížení, nebo spojky či brzdy.[28]

Poslední ventilový mód je nejvíce používaným módem ze všech. MR kapalina pracuje ve ventilovém módu, pakliže je jí využito k bránění toku MR kapaliny z jedné nádrže do druhé, jak zobrazuje (Obr. 14) [28].



Obr. 14. MR kapalina ve ventilovém (valve) módu.

MR kapalina má v těchto třech módech velké uplatnění při tlumení sedadel, jako tlumiče v automobilovém průmyslu, ve zbrojním průmyslu, nebo při tlumení otřesů mostů např. v případech zemětřesení [36].

1.5.2 Medicínské aplikace

1.5.2.1 Léčba anemie

Karbyl železo se využívá jakožto prostředek pro léčbu anemie, čili chudokrevnosti. Je podáván ve formě tablet, přičemž je účinným léčebným prostředkem [37]. Co se lékařského využití týče byl porovnáván se sloučeninami železa, přičemž vykazuje lepší výsledky, žádnou doloženou toxicitu a menší gastrointestinální nežádoucí účinky [12]. Jeho vhodnější vlastnosti jsou pravděpodobně způsobeny jeho postupným dávkováním, závislým na tvorbě žaludečních kyselin. Oproti tomu jsou jiné používané formy železa schopné absorpce ihned [38].

Díky pro organismus přijatelnějším vlastnostem je vhodný pro aplikaci a to se snížením nebo vypuštěním rizika otravy železem pro dětské pacienty [12].

1.5.2.2 Magnetické navádění léčiv a radioizotopů

Pro efektivní léčbu je důležité doručení léčiv nebo radioizotopů v případě léčení nádoru do léčeného místa, přičemž způsob doručení musí být co nejméně invazivní. Efektivní způsob doručení by měl splňovat tyto dvě podmínky: Měl by co nejvíce zmenšit množství přepravované látky do organismu, protože může být cytotoxická pro zdravé buňky. S dopravovaným množstvím léčiva také souvisí cena léčebného zákroku. A měl by zvýšit koncentraci účinné látky v místě zákroku, pro zvýšení efektivity léčby. Toho lze dosáhnout pomocí navádění magneticky aktivních léčiv magnetickým polem – MDT (magnetic drug targeting) [39].

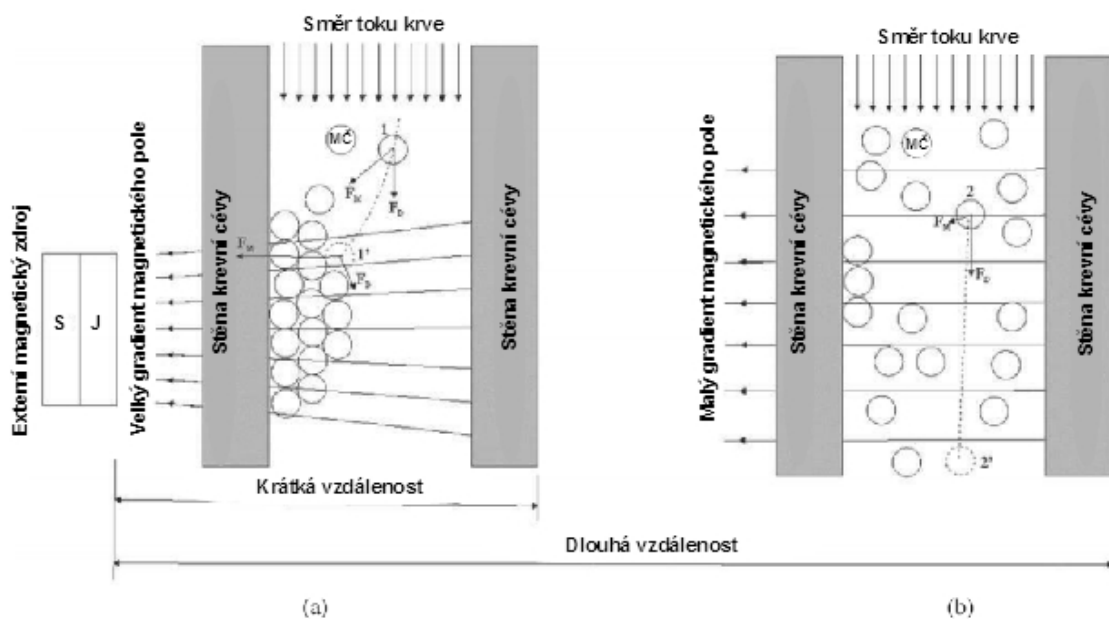
MDT má tyto výhody:

- zvýšení koncentrace léčivé látky v požadovaném místě
- snížení koncentrace léčivé látky v oblastech mimo léčenou oblast
- při použití radioizotopů může být lokální dávka ozáření velmi vysoká a lze ji tím pádem aplikovat jen jedenkrát na rozdíl od klasické chemoterapie [40].

- možnost monitorovat celý proces různými zobrazovacími technikami, jako jsou magnetická rezonance, počítačová tomografie nebo pozitronová emisní tomografie[40]
- možnost kombinovat s dalšími léčebnými metodami, jako jsou embolizace, nebo hypertermie

Principem MDT je přitažení a zadržení částic nosičů o poloměru obvykle 20-500 nm[39] v určitém místě lidského těla za použití magnetického pole. Na nosiče jsou navázány léčiva, radioizotopy nebo obojí. Zdroj magnetického pole se umístí v blízkosti požadované oblasti, aby přitáhl a zadržel částice. Magnetické pole musí být dostatečně silné, aby překonalo hydrodynamické síly vyvolané tokem krve, jež jsou jedinými hlavními silami, kterým jsou nosiče v těle vystaveny [39].

Když je vzdálenost mezi cílovou oblastí a magnetickým zdrojem malá, tak je gradient magnetické indukce velký. Magnetické částice z kapilár a arteriál, v nichž je nižší rychlost proudění krve, se začnou usazovat na stěně cévy. Jinak jsou unášeny dál [41].



Obr.15. (a) malá vzdálenost od magnetického zdroje/velký gradient magnetického pole – částice jsou přichyceny ke stěně krevní cévy; (b) velká vzdálenost od magnetického zdroje/malý gradient magnetického pole – částice jsou unášeny krevním řečištěm[39].

Při dostatečné velikosti magnetické indukce, dojde k zmagnetování částic a ty následně vytvoří klastry. Klastry silněji reagují na magnetické pole a začnou se usazovat na stěně

cév i při hodnotách gradientu magnetické indukce, při kterých by k usazování samostatných částic nedocházelo [41].

Aglomerace částic se využívá k embolizaci. Částice zamezí přívod krve, nastane hypoxie a nekróza např. nádoru. Tato metoda se používá v kombinaci s jinými lékařskými postupy[40]. Použití této metody pro magnetické částice velikosti v řádu mikrometrů, tedy velikosti karbonyl železa, bylo úspěšně testováno *in vitro* a výsledky dokládají schopnost zablokovat krevní cévu v řádu minut[42][43].

Metoda MDT má i svá omezení. Účinnost terapie v praxi závisí na intenzitě a gradientu mag. pole, vzdálenosti částic a zdroje magnetického pole, na magnetických vlastnostech částic, na rychlosti toku krve, a na dalších faktorech [44].

Omezení dané vzdáleností je zvláště důležité, protože limituje léčbu na určitou vzdálenost od povrchu pokožky. Při experimentech na modelu prasete byla zjištěna využitelnost pouze velkých (0,5 – 5,0 μm) částic karbonyl železa v játrech a to do vzdálenosti menší než 13 cm. Nevýhodou využití takto velkých částic je jejich možná blokáce zdravého krevního řečiště před dosažením nádoru. Také tyto částice mohou být moc velké pro dosažení některých orgánů (mozek), protože neprojdou přes endoteliální bariéru[45].

Mezi nejnovější využití MDT patří transport genů. Genová terapie rakoviny i dalších onemocnění je novou progresivní oblastí výzkumu.[40]

Metoda MDT je slibně se rozvíjejícím a prakticky využitelným způsobem distribuce léčiv i jiných látek v organizmu, která je již klinicky testována[46][47], což možná povede k jejímu masovějšímu využití.

1.5.2.3 *Hypertermie*

Další zkoumanou oblastí je využití karbonylu železa jakožto prostředku pro hypertermii. Hypertermie je léčebná metoda, při níž se léčí zvýšenou teplotou (42-48°C). Používá se lokálně při nádorových onemocněních. Využívá toho, že jsou nádorové buňky méně odolné vůči vysoké teplotě než buňky okolní, zdravé tkáně [40].

K zahřívání může docházet několika způsoby, ovšem některé v určitých případech nelze aplikovat, např. když je nádor hluboko ve tkáni.

Metoda nazvaná magnetická indukční hypertermie může být aplikována i v takovýchto případech. Jak již bylo řečeno, při přemagnetování magnetických částic se uvolňuje teplo a to je základním principem této metody léčby. Vysokofrekvenční změnou magnetického

pole dojde k zahřívání magnetických částic, což vede k likvidaci nádorových buněk. Navíc k vývinu tepla dochází přímo v nádoru, což zvyšuje efektivitu této metody. Částice mohou být zavedeny injekčně, nebo nadávkováním přímo do krevního řečiště, což se ukázalo jako efektivnější. Prozatím byly testovány částice o rozměrech v řádu nanometrů. Nicméně výzkum prokázal, že částice v řádu mikrometrů se usazují v tumoru místo aby dále pokračovaly krevním řečištěm [48]. Karbonyl železo takové rozměry má. Bylo zkoumáno jeho využití, přičemž bylo dokázáno[49], že jej nízká toxicita v kombinaci s vhodnými magnetickými vlastnostmi k použití v hypertermii předurčuje.

Karbonyl železo je zkoumáno a využíváno i v jiných, než výše popsaných oblastech medicíny, např. se využívá pro úpravu buněk, které pak lze vyjmout s použitím magnetického pole[50].

1.5.3 Další využití

Karbonyl železo se využívá, kromě výše zmíněných aplikací, v celé řadě dalších odvětví např. při sanaci podzemních vod, syntéze diamantů, v práškové metalurgii, při výrobě materiálů stínících mikrovlnné záření atd.

2 PLAZMA

2.1 Historie

Slovo Plazma poprvé začal používat na konci 18 století J.E. Purkyně jako označení krevní tekutiny. Označení plazma pro ionizované plyny začal v roce 1927 používat IrvingLangmuir [51].

Nicméně studium látky ve čtvrtém skupenství, tedy ve skupenství plazmatu, se rozšířilo až v průběhu 20. století. Až s rozvojem kosmonautiky se člověk dostal do vesmíru, kde je plazma nejčastější formou hmoty. Došlo k objevování vlastností plazmatu, jeho složení, hustoty, rychlosti částic a dalších poznatků, které měřením ze Země nešlo zjistit. Vyslání přístrojů mimo atmosféru umožnilo měřit záření a proudy částic, které na zemský povrch nedopadají, a umožnilo výzkum hvězd včetně Slunce, jež je plazmatem tvořeno.

Systematický výzkum vlastností umožnily elektrické metody vytváření a zkoumání plazmatu [52]. Zatímco chemickými reakcemi bylo dosaženo maximálně teploty pěti tisíc stupňů, pomocí obloukového výboje lze snadno dosáhnout teploty blízké deseti tisícům stupňů. Krátkodobě lze dosahovat teplot několika milionů stupňů.

Již bylo dosaženo vyšších teplot při termonukleárním výbuchu, ale metodami destruktivními, jen těžko ovladatelnými [52][53].

Další rozvoj fyziky plazmatu následoval v 50. letech 20. století při výzkumu jaderné fúze [54].

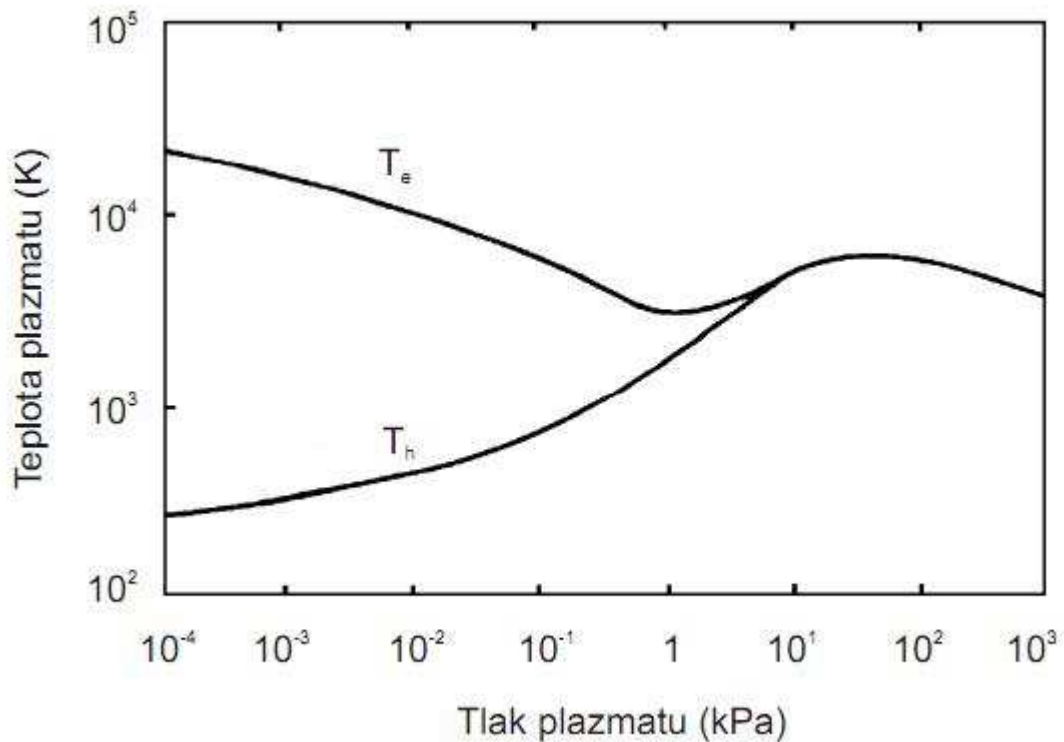
2.2 Definice a vlastnosti

Plazma je definované jako: „kvazineutralní soubor částic s volnými nosiči nábojů, který vykazuje kolektivní chování“ [51]. Na rozdíl od plynu obsahuje velké množství kladně a záporně nabitých částic. Plazma má značnou tepelnou kapacitu, je vodivé a silně reaguje na elektrické a magnetické pole. Pojem kvazineutralita znamená, že plazma obsahuje stejné množství záporně a kladně nabitých částic a na venek se chová elektricky neutrálně [51]. „Kolektivní chování pak znamená, že nabitě částice ovlivňují pohyb dalších nabitých částic na poměrně velkou vzdálenost“ [55].

Za plazma neoznačujeme jen systém se všemi ionizovanými částicemi, naopak většinou je používané plazma, které je jen částečně ionizované. Zbytek je tvořen neutrálními atomy, nebo molekulami [54].

2.3 Základní parametry

Parametrem je teplota. Teplota je projevem pohybu částic. Nicméně přímo neznamená vysokou tepelnou energii systému. Jednotlivé druhy částic, tedy elektrony, ionty i elektroneutrální atomy či molekuly, mohou mít různou teplotu (viz Obr. 16).



Obr. 16. Teplota elektronů (T_e) a těžkých částic (T_h) v obloukovém plazmatu.

Teplota některých částic sice může být vysoká, ale jejich hustota nízká, potom bude celková tepelná energie systému malá [54].

Energie se někdy udává v elektronvoltech. Přepočítání mezi energií a teplotou se řídí vztahem:

$$E_n \approx k_b \cdot T \quad (22)$$

kde k_b je boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$).

Z toho vyplývá, že platí:

$$1\text{eV} = 11\,600 \text{ K} \quad (23)$$

Druhým parametrem je stupeň ionizace, tedy poměr ionizovaných částic v porovnání s celkovým počtem částic v útvaru. Tento parametr je závislý na teplotě.

Vyjadřuje jej Sahova rovnice[51]:

$$\frac{n_i^2}{n_n} = CT^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-U_i}{k_b T}\right); C \sim 2,4 \cdot 10^{21} m^{-3} \quad (24)$$

kde n_i je koncentrace jednonásobných iontů [m^{-3}], n_n koncentrace neutrálních částic [m^{-3}], U_i ionizační potenciál [eV].

třetím vybraným parametrem je Debyeovo stínění. Tento jev souvisí s kvazineutralitou plazmatu. Pokud do plazmového útvaru vložíme pevné těleso s nábojem, je jeho náboj odstíněn a ve vzdálenosti zvané Debyeova stínící délka je plazma nadále kvazineutrální. Debeyovu stínící délku lze spočítat pomocí vztahu[51]:

$$h = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_b}{e^2 n_0} \cdot \frac{T_+ T_-}{T_+ + T_-}} \quad (25)$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 \sim 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$); T_+ , T_- teploty kladných iontů a elektronů (T); $n_0 = n_+ = n_-$ koncentrace částic (m^{-3}).

Dalším parametrem plazmatu je jeho frekvence. Jednotlivé druhy částic, tedy elektrony, ionty i elektricky neutrální atomy nebo molekuly mají jinou hmotnost, proto na ně vnější síla působí jinak. Zatímco těžší částice jsou vnější silou méně ovlivněny, lehčí částice, tedy elektrony jsou rozkmitány kolem iontů s frekvencí, jež je dána jejich koncentrací v plazmatu. S rostoucí koncentrací se bude zvětšovat frekvence, protože tím větší bude působit síla mezi elektrony a ionty s kladným nábojem. Vztah mezi frekvencí plazmatu a koncentrací elektronů je dán vztahem[57]:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \varepsilon_0}} \quad (26)$$

kde ω_{pe} je frekvence plazmatu [s^{-1}], e elementární náboj, n_e koncentrace elektronů (m^{-3}), m hmotnost elektronu [kg], ε_0 permitivita vakua.

2.4 Dělení

dle stupně ionizace lze plazma rozdělit na:

- slabě ionizované plazma – počet ionizovaných částic je oproti celkovému počtu zanedbatelně malý.

- silně ionizované plazma – ionizované částice převládají nad neutrálními.

V plazmatu dochází neustále k rekombinaci. To, jestli se elektrony sráží převážně s ionty nebo neutrálními částicemi záleží na stupni ionizace plazmatu. Vnější projevem rekombinace je vysílání fotonů – plazma svítí [58].

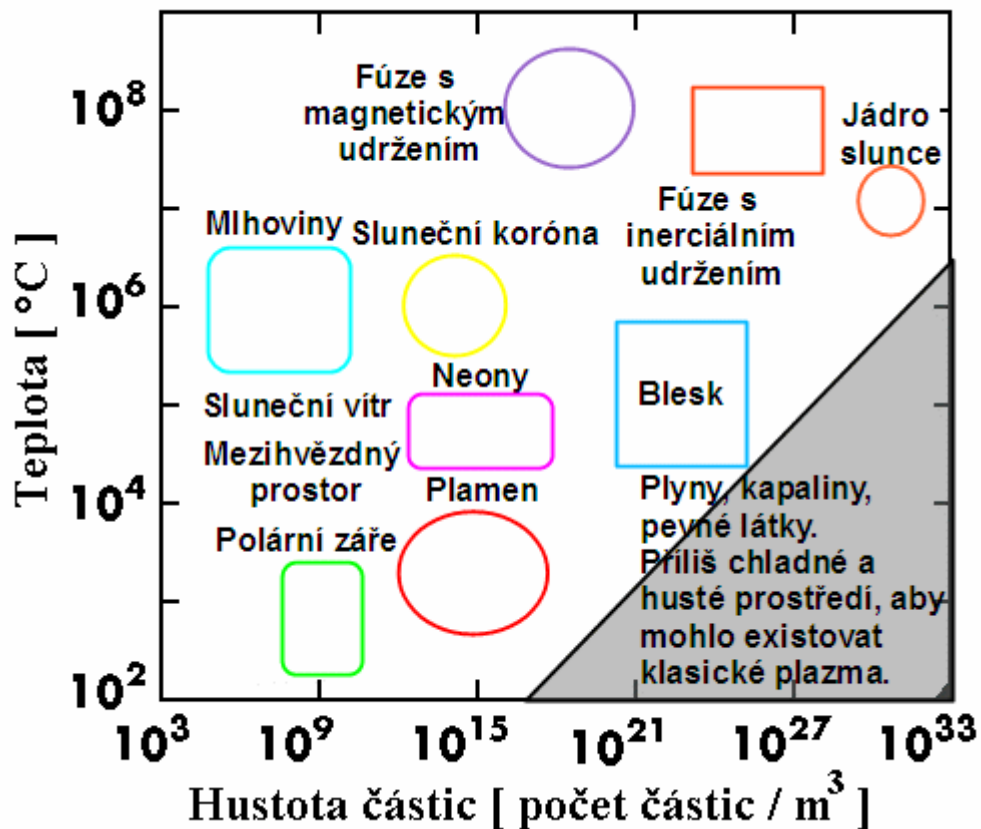
Podle teploty se plazma dělí na:

Vysokoteplotní plazma

střední energie nabitých částic je větší než 100 eV, což odpovídá teplotě řádově 10^6 K. Při této teplotě je plazma plně ionizováno, tedy množství neionizovaných částic je zanedbatelné. Vysokoteplotní plazma se vyskytuje v jádrech hvězd a je technologicky velice obtížné ji vytvořit. Realizuje se termionizací nebo ve složitých zařízeních, jež pracují pulzně. Takové plazma má velice krátkou životnost.

Nízkoteplotní plazma

V nízkoteplotním plazmatu nejsou všechny částice ionizovány. Plazma dosahuje teplot až v řádu 10^4 K. Využití nízkoteplotního plazmatu je v praxi mnohem více zastoupeno, plazma je přítomno v plameni, používá se v zářivkách, výbojkách, v elektrické oblouku a podobně [59].



Obr. 17. Výskyt plazmatu podle teploty a podle hustoty.

2.5 Praktické využití plazmatu

2.5.1 Osvětlovací technika

Jak již bylo řečeno výše, vnějším projevem rekombinace je emitace fotonů. Toho se využívá v osvětlovací technice. Plazma tak slouží jako prakticky využitelný a ekonomicky výhodný zdroj osvětlení.

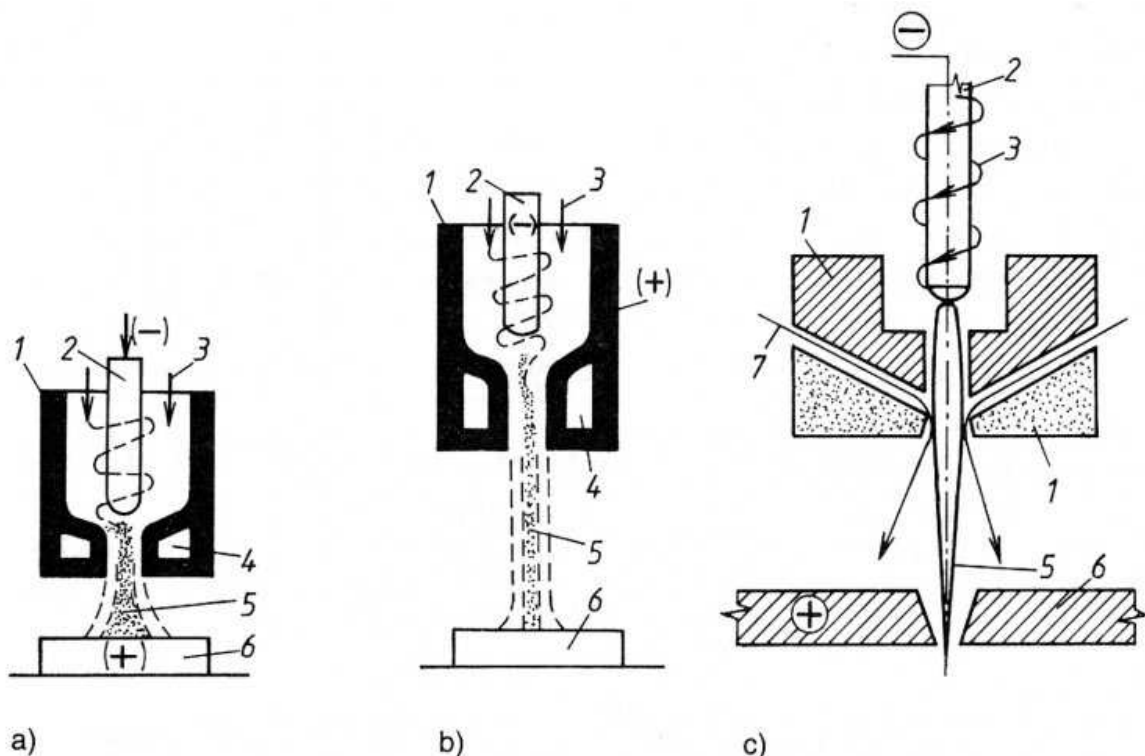
2.5.2 Řezání

Návrhy na použití elektrického oblouku pro řezání kovů jsou velmi staré, ale praktická realizace dlouho narážela na vysokou cenu elektrické energie. Proto se k řezání používal kyslíko - acetylenový plamen. Postupným vývojem byly sestrojeny první plazmometry, které na poli řezání kovů, a nejen kovů, zaznamenaly úspěch. Plazmomet se skládá z chlazené trysky, kterou proudí plyn, mnohdy argon s příměsí vodíku, který je ionizován pomocí elektrického oblouku.

Plazmomety mají stabilní paprsek plazmatu, což příznivě ovlivňuje kvalitu řezné rány. Další výhodou je vysoká koncentrace energie v paprsku plazmatu. Lze tedy dosahovat úzkých řezných spár, a zóna tepelně ovlivněného materiálu je úzká. Navíc se tento fakt pozitivně odráží i v rychlosti řezu. Koncentrací kinetické energie je navíc dosaženo rychlého od fouknutí roztaveného kovu ze spáry, což napomáhá dosažení čistých řezů bez otřepů. Díky těmto přednostem získaly praktické uplatnění[53].

Plazmomety lze dělit na:

- Plazmomety se závislým obloukem – oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou a materiálem, který je anodou. Toto uspořádání se používá pro řezání kovů.
- Plazmomety s nezávislým obloukem – oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou a tryskou hořáku, který je anodou. Tryska je proto extrémně namáhána, což má negativní vliv na její životnost. Protože elektrický oblouk není závislý na materiálu, lze takto řezat i nevodivé materiály[53].



Obr. 18. Schéma plazmového hořáku (a) se závislým obloukem, (b) s plynovou stabilizací s nezávislým obloukem (c) s vodní stabilizací (1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmatu, 6 – obrobek, 7 – přívod vody).

2.5.3 Povrchové úpravy za použití plazmometů

Pomocí plazmometů lze na povrchy materiálu nanést, nebo navařit povlak jiného složení. U moderních plazmometů lze regulovat průměrnou teplotu plazmatu a proto lze nanášet velké množství materiálů. Jedná se o karbidy kovů, vysokotavitelné kovy, jako jsou wolfram, tantal, molybden, až po umělé hmoty. Nanesený materiál potom může rozšířit aplikaci součásti, nebo může plnit ochrannou funkci[53].

Samotné nanášení se skládá z tavení nanášeného materiálu ve formě drátu, nebo prášku a nafukování roztavených kapiček na odmaštěný a zdrsňený povrch upravovaného materiálu [53].

2.5.4 Dezinfekce

Plazmatu se využívá v medicínské praxi pro sterilizaci a to i termolabilních, citlivých a vysokoobrátkových nástrojů. Roku 1998 bylo v české republice instalováno první zařízení. Prekurzorem plazmatu jsou páry peroxidu vodíku[62].

Principem je vznik volných radikálů – hydroxyly a hydroxoperoxyly za vyzáření světla s vlnovou délkou v UV pásmu. Tyto tři faktory se podílí na sterilizaci. Molekula peroxidu vodíku je štěpena právě pomocí plazmatu. Vše probíhá ve vakuu za nízké teploty.

Nevýhodou je, že předměty musí být suché a nesmí se dotýkat stěn komory, výhodami jsou netoxičnost procesu, bezpečnost a krátký sterilizační čas [62].

2.5.5 Úprava povrchu

Technologie úprav povrchu plazmatem mohou vyhovět mnohdy náročným požadavkům, které klade technická praxe. Jsou jimi zejména nízká cena, aplikovatelnost ve výrobním provozu a změna vlastností materiálu, tedy dosažení např. adhezivního povrchu, hydrofóbního povrchu, dosažení antikoročních vlastností atd. Úpravou plazmatem lze modifikovat povrchové vrstvy materiálu a dosáhnout tak požadovaných vlastností. To vše za zachování objemových vlastností materiálu.

Jednou z metod úpravy povrchu plazmatem je plazmatem rozšířená chemická plynná depozice (plasma-enhancedchemicalvapordeposition – PECVD). Původní metoda chemické plynné depozice (chemicalvapordeposition – CVD) funguje na principu interakce reaktivního plynu s vhodně upraveným podkladem za zvýšené teploty [63]. Ve většině případů je plyn neutrální a k ionizaci dochází až za vysokých teplot. Nicméně ionizované částice mo-

hou být vytvořeny kontaktem s horkým povrchem jako následek Saha – Langmuirovy ionizace[64]. Nabitě klastry mohou být vytvořeny jako následek nukleace vyvolané ionty uvolněnými z povrchu.

CVD systémy charakterizuje malý počet stavebních jednotek, tepelně aktivovaných atomů, molekul a nanoklastrů. Navíc v mnoha případech mohou být dominantní stavební jednotkou různých nanofilmů a nanostruktur jen nanoklastry. Při použití atomů a molekul by byla doba depozice, tedy vázání na povrch, extrémně dlouhá[63].

Oproti CVD systému, PECVD plynná fáze je dvousložkovým systémem. Obsahuje neutrální a ionizované částice(plazma). Ač je v slabě ionizovaném plazmatu malý počet ionizovaných částic, mají tyto výrazný vliv na celý průběh úpravy povrchu.

Největším rozdílem oproti CVD systému je přítomnost obalu plazmatu (plasma sheath), což je vrstva nabitého prostoru oddělující masu plazmatu od pevného podkladu. Povrch je, s ohledem na větší pohyblivost elektronů a přítomnost plazmatu, nabit záporně [65]. Výsledné rozdělení má za následek intenzivní tok kladně nabytých částic na povrch a zároveň zpomalený tok záporně nabytých částic. Záporně nabitý povrch také potenciálně přispívá k většímu odolávání a separaci záporně nabitých prekurzorů a makromolekul v přechodové oblasti (obvykle nazývané presheath), což se v CVD systému neděje[66]. Plazma také působí jako efektivní ionizátor neutrálního plynu, čímž se vytváří široké spektrum kladně a záporně nabytých částic. Výsledkem četných dopadů elektronů a srážek těžkých částic je disociace neutrálních molekul. To vše přispívá k velké variabilitě stavebních jednotek, která je větší než u CVD[63].

Nutno poznamenat, že se v porovnání s CVD systémem, větší stavební jednotky méně ochotně vážou na povrch. Nicméně složité agregáty jsou často považovány za nevyžádaný produkt, kterému se můžeme vyhnout[63].

Úpravu povrchu plazmatem lze rozdělit do čtyř kroků:

1. Příprava stavebních jednotek
2. Vhodná úprava povrchu, na který se bude nanášet
3. Přenos stavebních jednotek
4. Uspořádání stavebních jednotek pro vytvoření agregátů

Prvním krokem je tedy Příprava stavebních jednotek. Stavebními jednotkami, mohou být částice různého typu, mohou to být atomy, molekuly, ionty, radikály, ale také makromole-

kuly, klastry v řádu nanometrů, složité agregáty, aglomeráty. Plazma jejich tvorbu umožňuje.

Složení a velikost stavebních jednotek má přímý vliv na jejich elektrické a další vlastnosti [63]. Proto je nutné zvolit vhodné stavební jednotky. Jednou z možností je využít již získaných znalostí z předešlých výzkumů. Již byla například zhotovena uhlíková vlákna, uhlíková nanopěna, nanostrukturované amorfní filmy využití v solárních článcích, klastry krystalického oxidu titaničitého atd. Další možností je metoda „pokus omyl“, s následnou zpětnou optimalizací procesu [63].

Tvorba stavebních jednotek je složitým procesem, který je zprostředkován velkým počtem dílčích reakcí v ionizované plynné fázi. Částice s menší hmotností, jako jsou atomy, molekuly, ionty a radikály, jsou např. tvořeny dopadáním elektronů plynné fáze, ionizací zapříčiněnou kolizemi částic, nebo disociací plynu. Případně mohou být uvolněny z pevného povrchu vystaveného plazmatu jako důsledek naprašování nebo leptání. Větší částice mohou být připraveny polymerací, agregací a uvolňováním z pevného povrchu [63].

Obecně lze ovlivnit tvorbu stavebních jednotek úpravou rychlosti reakcí, což může být dosaženo nastavením výboje.

Druhý krok je úprava povrchu. Kýžené vlastnosti povrchu jsou specifické pro každý druh úpravy povrchu. Např. pro růst uhlíkových nanotrubic je důležité leptání povrchu, vrstvení Ni/Fe/Co katalyzátoru ovlivňuje uhel smáčení částic v řádu nanometrů [67], jiné stavební jednotky mohou vyžadovat úpravu adheze atp.

Dalším krokem je transport stavebních jednotek. První možností je nanést je kamkoliv na povrch, přičemž částice následně migrují po povrchu z místa depozice do nanoshluků. Další možností je přinést a vyrovnat stavební jednotku přímo na místo jejího budoucího růstu. Při tom musí být zachována integrita částice. V plazmatu lze proces regulovat pomocí úpravy toků částic plazmatu [63].

Poslední krok, organizace částic, který probíhá v nanoměřítku [68], je nejméně ovlivněn plazmatem. Nicméně se i zde plazma uplatní a to tím, že dokáže zajistit vhodné podmínky například zajištěním rovnováhy teploty podkladu, což je jeden z důležitých faktorů při uspořádávání.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 PŘÍPRAVA VZORKŮ

3.1 Použité chemikálie

Byly použity částice karbonyl železa o průměru 1 μm . (BASF, Německo, HQ třída) o čistotě minimálně 97%.

Jako matrice byl použit silikon Silgard 184 silicone elastomer (Dow Corning, Německo). Je to dvousložkový silikon se směsným poměrem 10:1, bez zabarvení ve formě kapaliny.

K přípravě druhé matrice byla použita 2-hydroxyethylcelulóza (Sigma – Aldrich, USA). Jedná se o bílou sypkou pevnou látku.

3.2 Karbonyl železo - silikonová matrice

Byly připraveny zásobní roztoky smícháním částic karbonyl železa se silikonem Sylgard 184 silicone elastomer. Železo bylo rozdispergováno pomocí skleněného míchadla, magnetické nebylo možno použít kvůli feromagnetickému charakteru karbonyl železa. Poté byl odebrán vzorek, byl zvážen a bylo přidáno příslušné množství síťovadla v hmotnostním poměru k původnímu silikonu 1:10. Vzorek byl ručně promíchán a vložen do magnetického pole, kde došlo k zesíťování. Před každým dalším odebráním vzorku ze zásobního roztoku byl tento znovu promíchán míchadlem. Tímto postupem byly připraveny roztoky o hmotnostních koncentracích 3,23 % (1:30) a 9,09 % (1:10).

Vzorek č.	hmotnost[g]
1	1,05
2	1,12
3	1,08
4	1,04
5	1,11
6	1,10

Tab. 4. Hmotnost vzorků se silikonovou matricí o hmotnostních koncentracích 3,23 %.

Název vzorku	hmotnost[g]
A	1,06
B	1,08
C	1,05
D	1,05

Tab. 5. Hmotnost vzorků se silikonovou maticí o hmotnostních koncentracích 9,09 %.

3.3 Karbonyl železo –2 -HEC matrice

Byl připraven zásobní roztok smícháním karbonyl železaa 1,5% vodného roztoku 2 - HEC.Roztok 2 – HEC byl připraven, jejím rozpuštěním v deionizované vodě za teploty 35°C a za neustálého míchání po dobu 3 hodin.

Byly zhotoveny polystyrenové Petriho misky odřezáním okruží z menších Petriho misek, jejich naleptáním acetone, houbičkou, a přiložením na větší polystyrenové misky, pro snadnější oddělení vzorku od polystyrenové misky.

Poté byl odebrán vzorek ze zásobního roztoku a byl vložen do magnetického pole, kde se vytvořil povlak. Před každým dalším odebráním vzorku ze zásobního roztoku byl tento znovu promíchán míchadlem.

Tímto postupem byl připraven vzorek o hmotnostní koncentraci 2,94% (1:33).

Název vzorku	hmotnost [g]
I	1,04
II	1,12
III	1,05
IV	1,06
V	1,01

Tab. 6. Hmotnost vzorků s 2-HEC matricí o hmotnostních koncentracích 2,94 %.

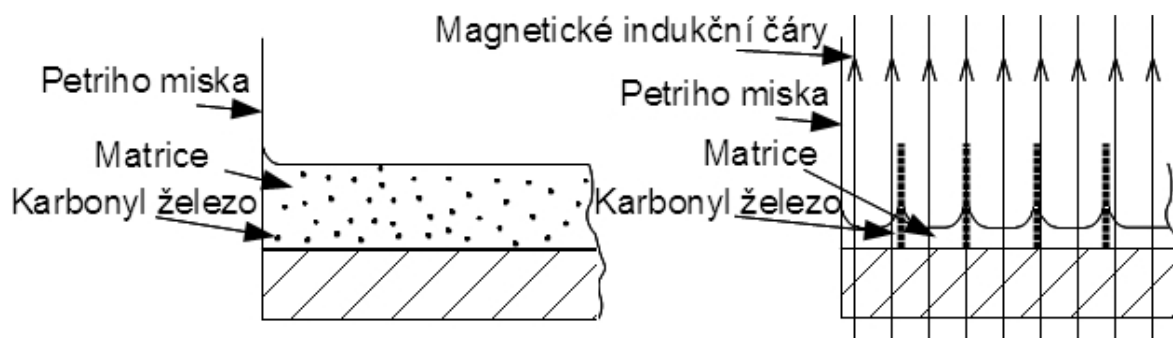
3.4 Magnetické pole

Pro vytvoření magnetického pole byl použit elektromagnet (foto viz příloha PI). Ten byl zapojený do usměrňovače bylo na něj přiváděno 21 V, 4 A stejnosměrného proudu v případě vzorků o hmotnostních koncentracích 3,23 %; 2,94 % a 2,5 V; 0,5 A stejnosměrného proudu v případě vzorků s hmotnostní koncentrací 9,09%. U koncentrovanějšího roztočtu bylo zvoleno nižší napětí z důvodu zamezení vztlínání suspenze z hladiny vzorku.

Došlo k uspořádání částic karbonyl železa ve vzorcích (Obr. 19, Obr. 20), které bylo zachováno ztuhnutím matrice.



Obr. 19. Uspořádání částic karbonyl železa v silikonové matrici. (vlevo) uspořádání bez přítomnosti magnetického pole, (vpravo) uspořádání v přítomnosti magnetického pole.



Obr. 20. Uspořádání částic karbonyl železa v matrici 2 - HEC. (vlevo) uspořádání bez přítomnosti magnetického pole, (vpravo) uspořádání v přítomnosti magnetického pole.

3.5 Úprava vzorků plazmatem

Vzorky byly upraveny v plazma reaktoru DienerFemto(13,56 MHz) a to v jednom, nebo ve dvou krocích (1, A, 3, C), vše shrnuje (Tab. 7).

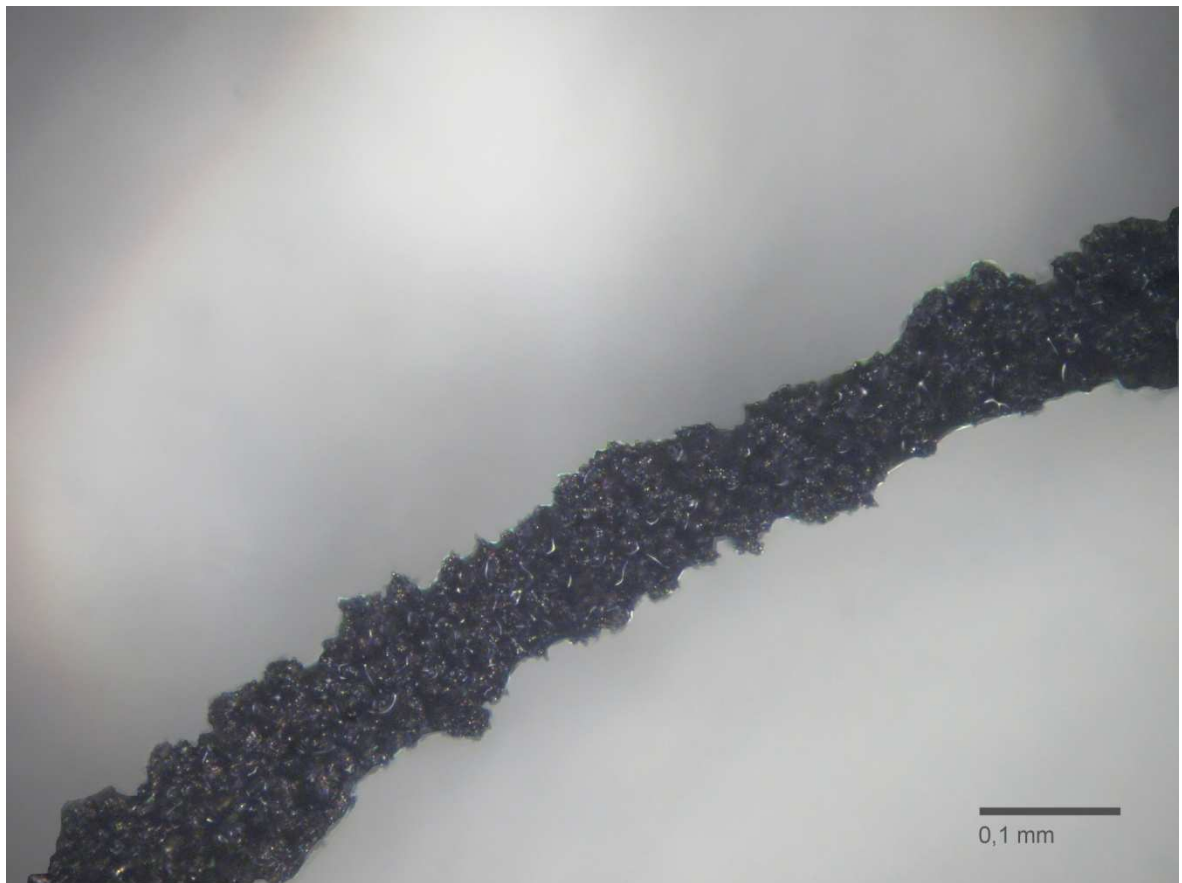
Název vzorku	doba plazmování[min]	průtok [sccm]	výkon[W]	plyn
I, 6, D	-	-	-	-
II	1	5	100	Ar + C ₄ F ₈
III	5	5	100	Ar + C ₄ F ₈
IV	1	20	100	Ar + C ₆ H ₁₂
V*	5	20	100	Ar + C ₆ H ₁₂
1, A	10	10	100	Ar + O ₂ (1:1)
	5	10	100	Ar + C ₄ F ₈
2, B	10	10	100	Ar + C ₄ F ₈
3, C	10	10	100	Ar + O ₂ (1:1)
	5	10	100	Ar + C ₆ H ₁₂
4, 5	10	10	100	Ar + C ₆ H ₁₂

Tab. 7. Popis úpravy vzorků plazmatem.*U tohoto vzorku došlo během plazmování ke krátkému kolapsu – špatnému vznícení.

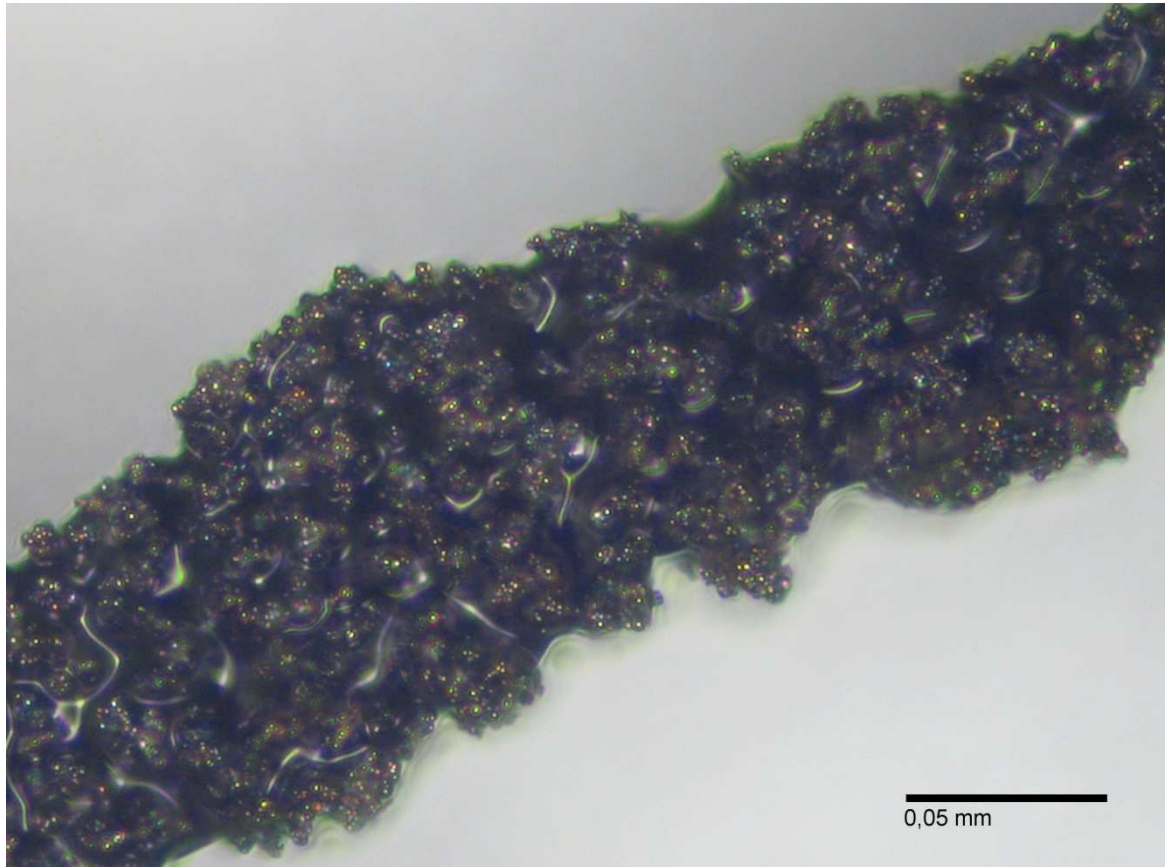
4 ANALÝZA VZORKU

4.1 Optický mikroskop

K pořízení snímků byl použit mikroskop Nikon Eclipse 50i a fotoaparát Canon Power Shot A640. Vzhledem k nízké hloubce ostrosti mikroskopu byl použit program HeliconFocus, který složil sérii postupně zaostřených fotek v jednu. Fotky byly následně dopraveny v programu GIMP.



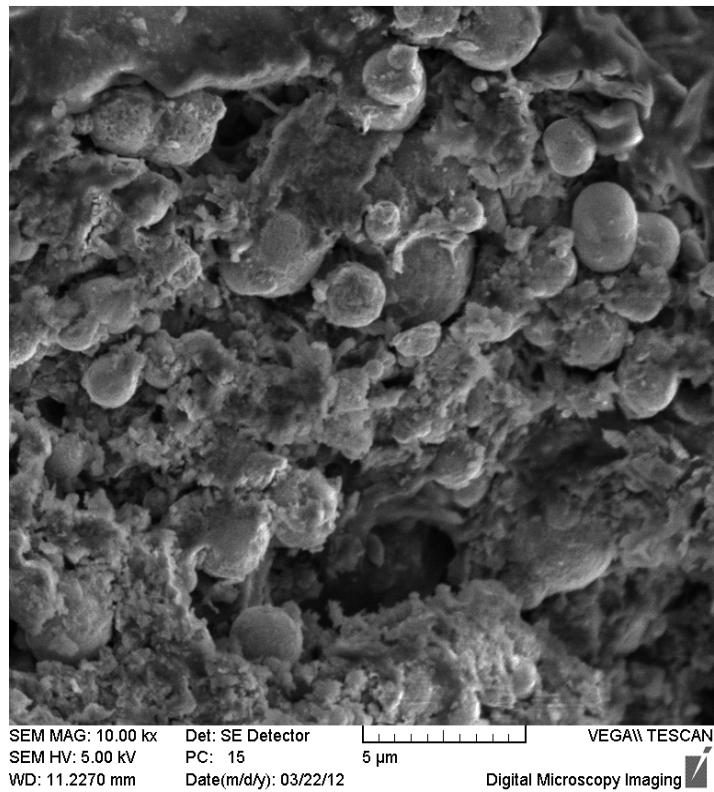
Obr. 21. Kolonie částic karbonyl železa v matrici 2 – HEC.



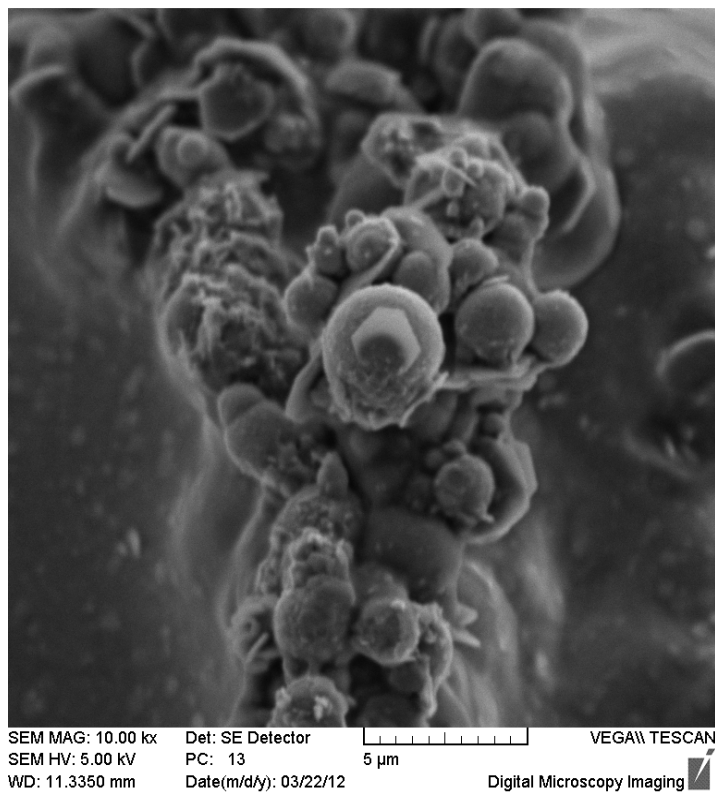
Obr. 22. Detail kolonie částickarbonyl železa v matrici 2 – HEC.

4.2 SEM (Skenovací elektronový mikroskop)

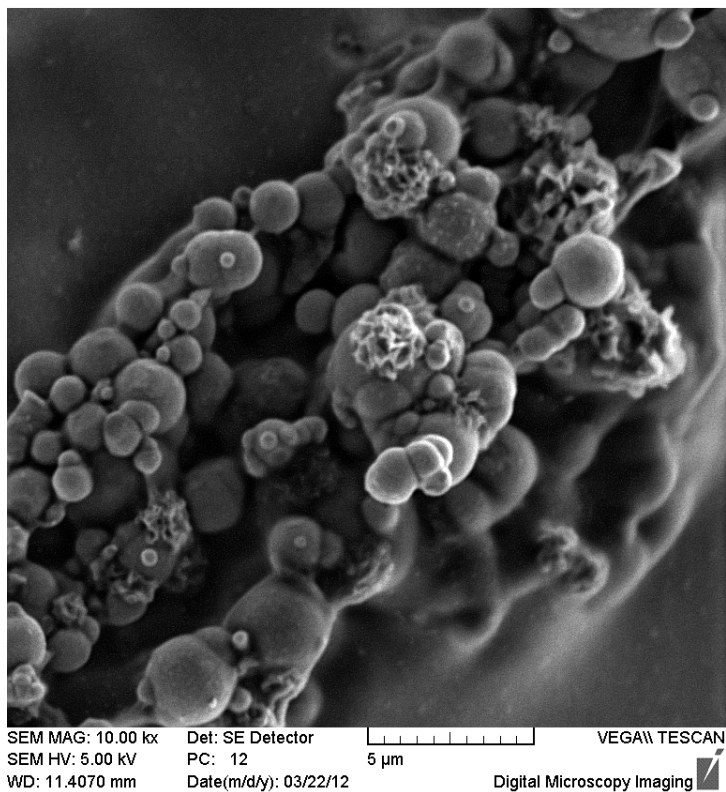
K pořízení snímků byl použit elektronový mikroskop QUANTA 200 FEG, SE detektor a urychlovací napětí 5 kV. Silikonová matrice se ukázala jako nevhodná, protože se po dopadu elektronů začala odpařovat. 2-HEC matrice tento problém eliminovala, ale výrazně se v klasických Petriho miskách nabíjela. Proto byly vytvořeny Petriho misky z tenkého polystyrenu, který se dá lépe rozlomit a díky tomu sloupnout tenký povlak 2-HEC, z kterého se lépe odváděl náboj.



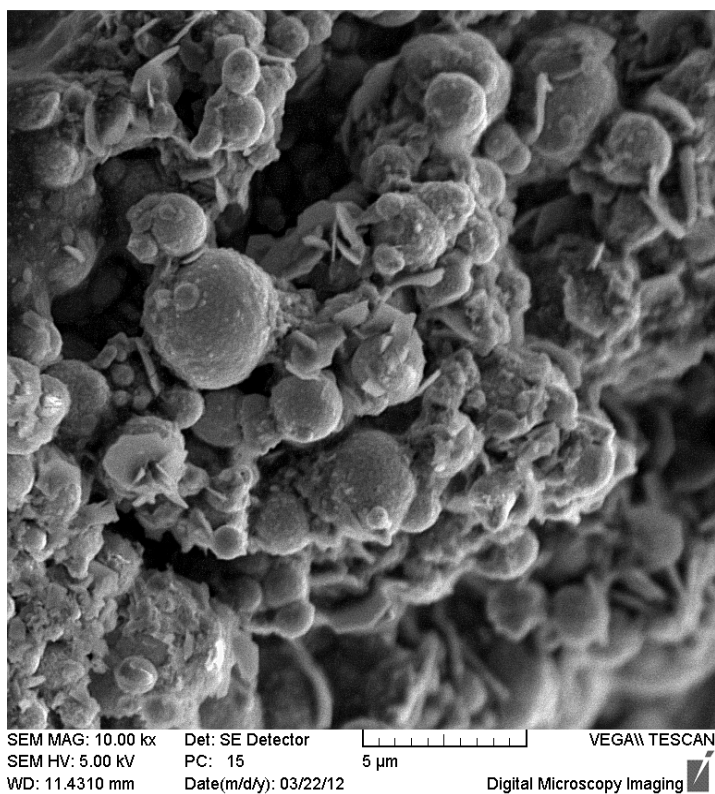
Obr. 23. Vzorek I (2,94% CI): 2-HEC matrice, ne-plazmovaný, SEM.



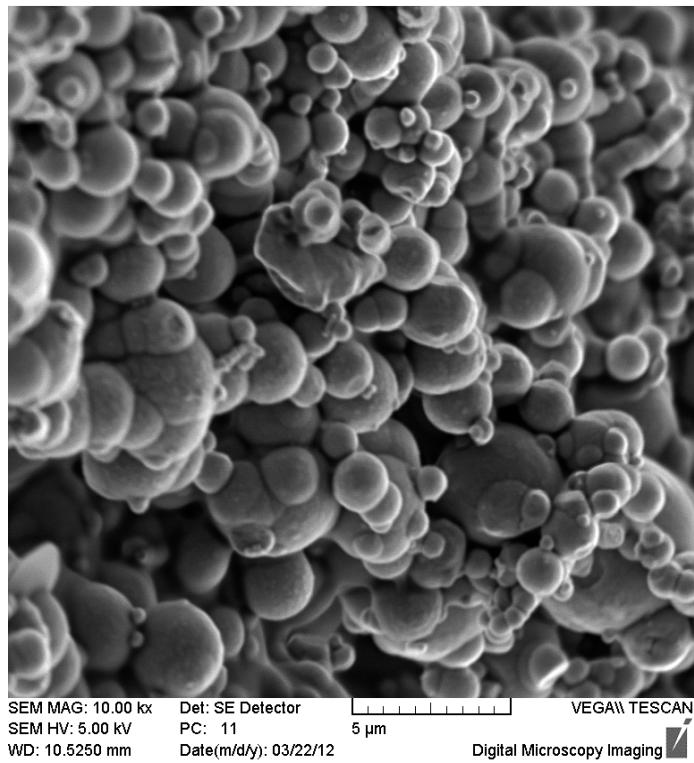
Obr. 24. Vzorek II(2,94% CI):2-HEC matrice, doba plazmování-1min, plyn-Ar+C₄F₈, SEM.



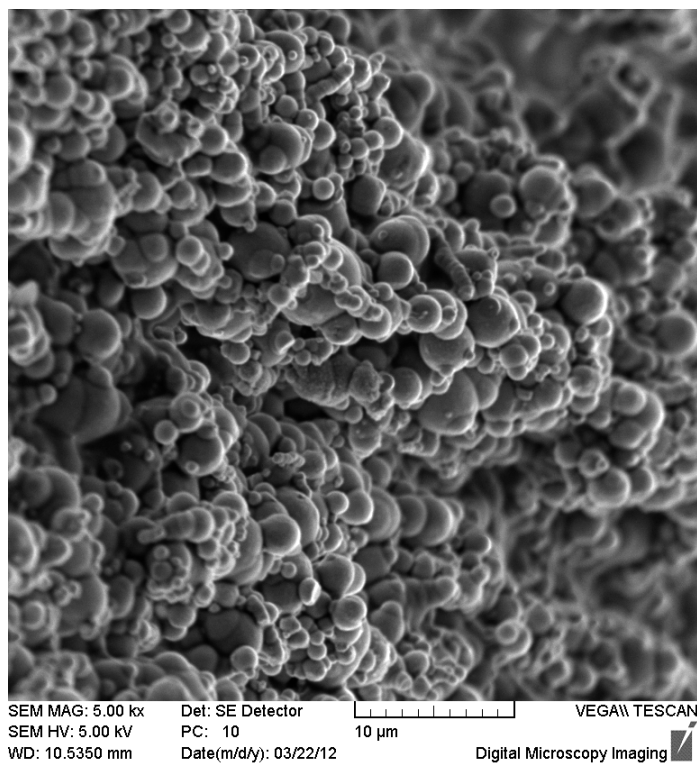
Obr. 25. Vzorek III(2,94% CI): 2-HEC matrice, doba plazmování-5min, plyn-Ar + C₄F₈, SEM.



Obr. 26. Vzorek IV (2,94% CI):2-HEC matrice, doba plazmování-1min, plyn- Ar + C₆H₁₂, SEM.



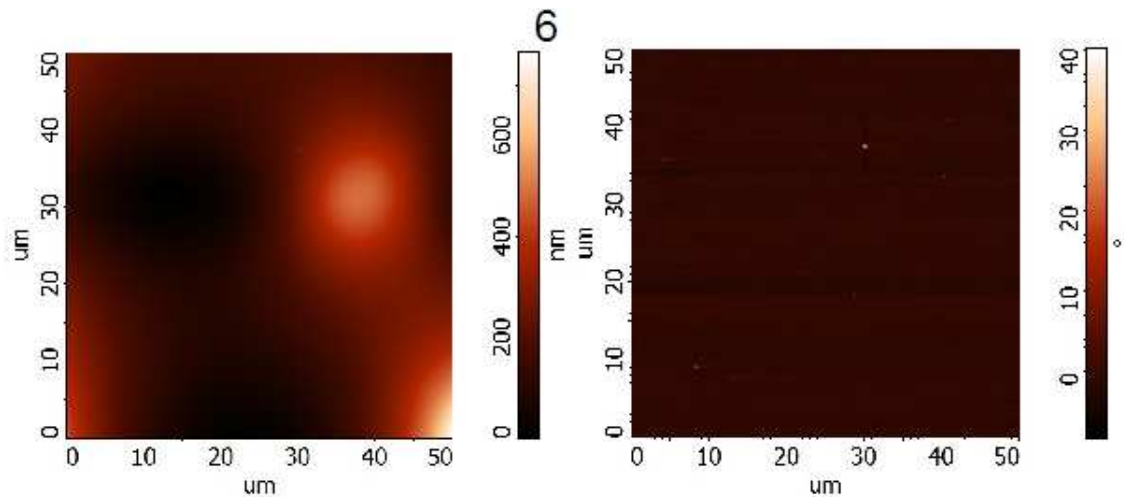
Obr. 27. Vzorek V (2,94% CI): 2-HEC matrice, doba plazmování-5min, plyn- Ar + C₆H₁₂, SEM.



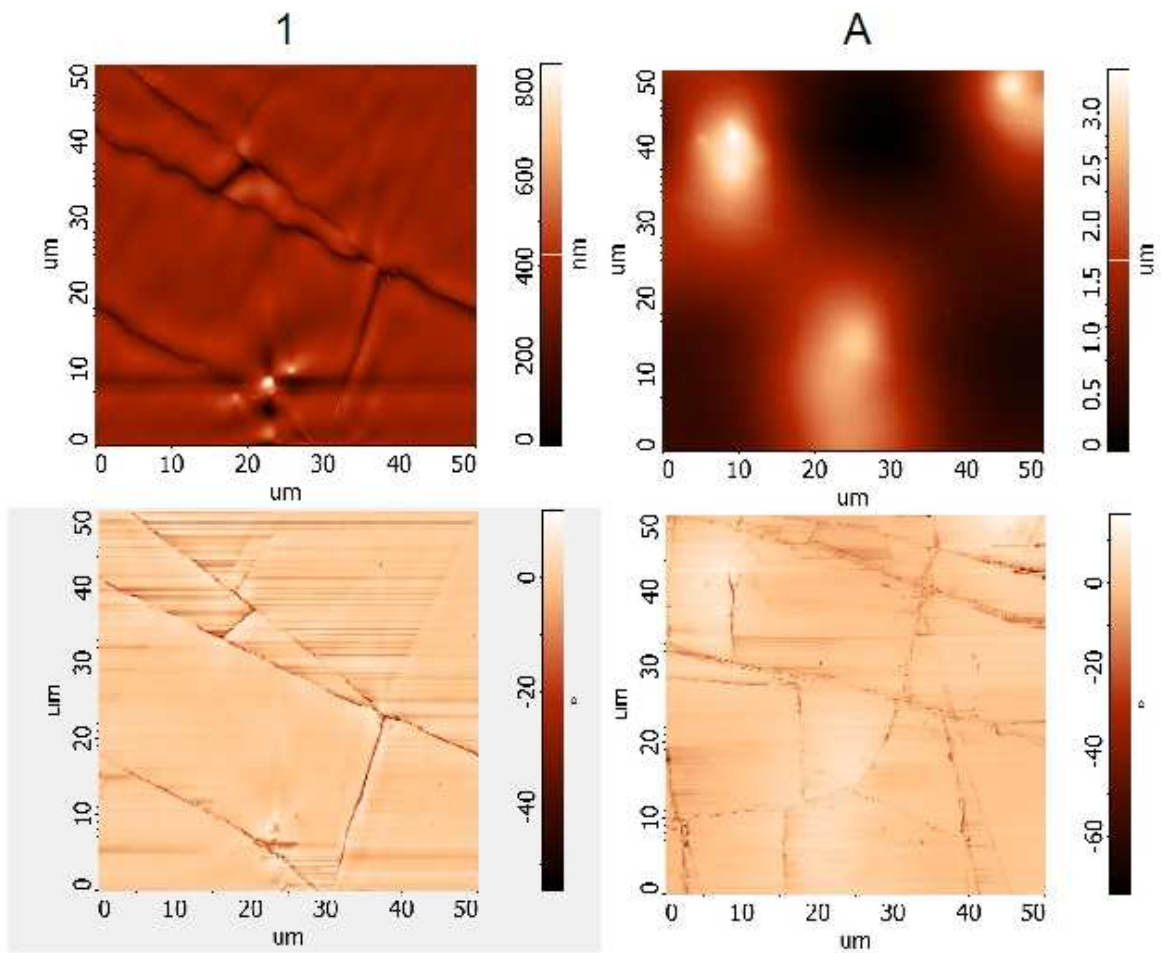
Obr. 28. Vzorek V(2,94% CI):2-HEC matrice, doba plazmování-5min, plyn- Ar + C₆H₁₂, v menším zvětšení, SEM.

4.3 AFM (Mikroskopie atomárních sil)

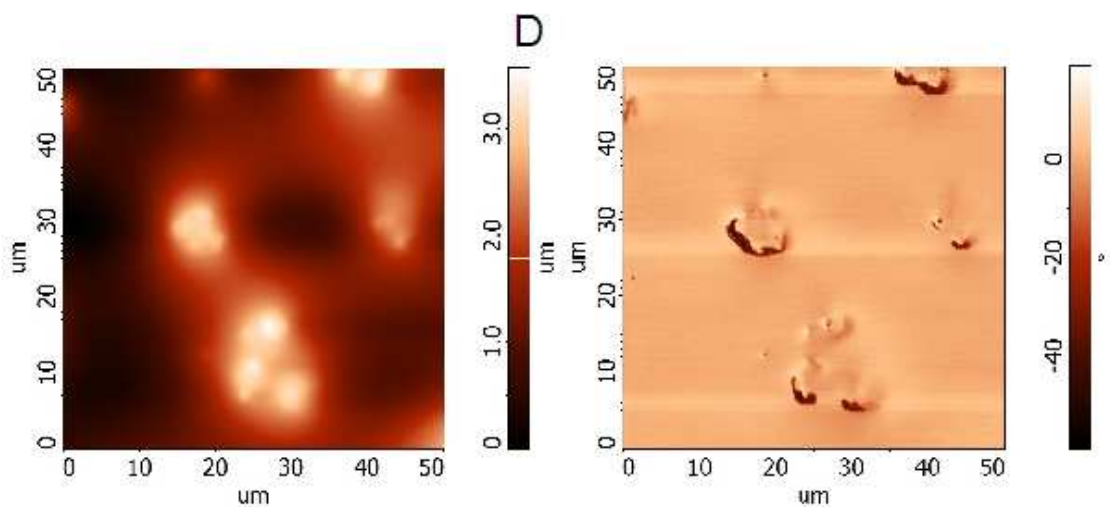
Povrch vzorku byl zkoumán pomocí AFM mikroskopu. Byl použit NT-MDT Mikroskop skenující sondou NtegraP. Kromě reliéfu byl měřen i fázový rozdíl, který odpovídá změně mechanických vlastností materiálu, tedy nezřídka přechodu mezi dvěma různými materiály.



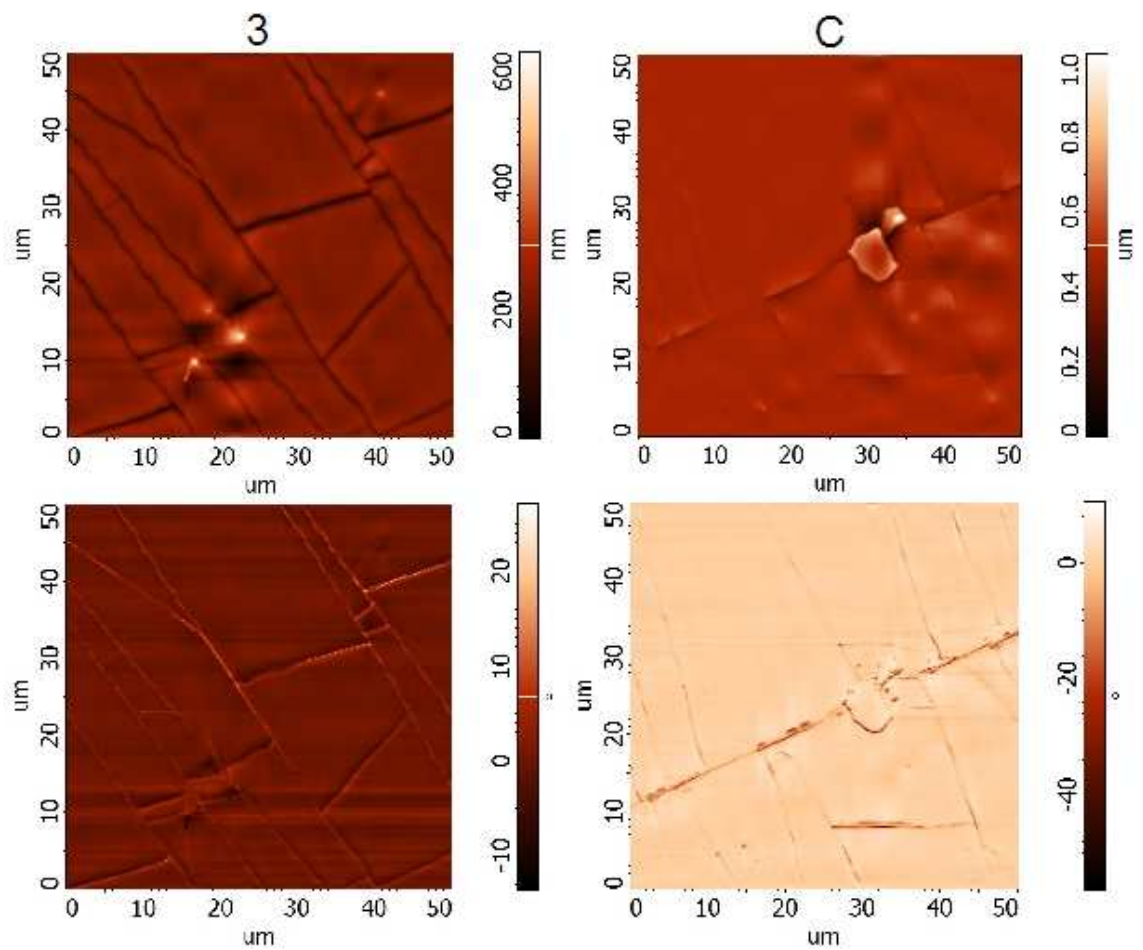
Obr. 29. Vzorek 6 (3,23% CI):silikonová matrice, neplazmovaný, měřeno AFM mikroskopem.(vlevo) morfologie (vpravo) fázový kontrast.



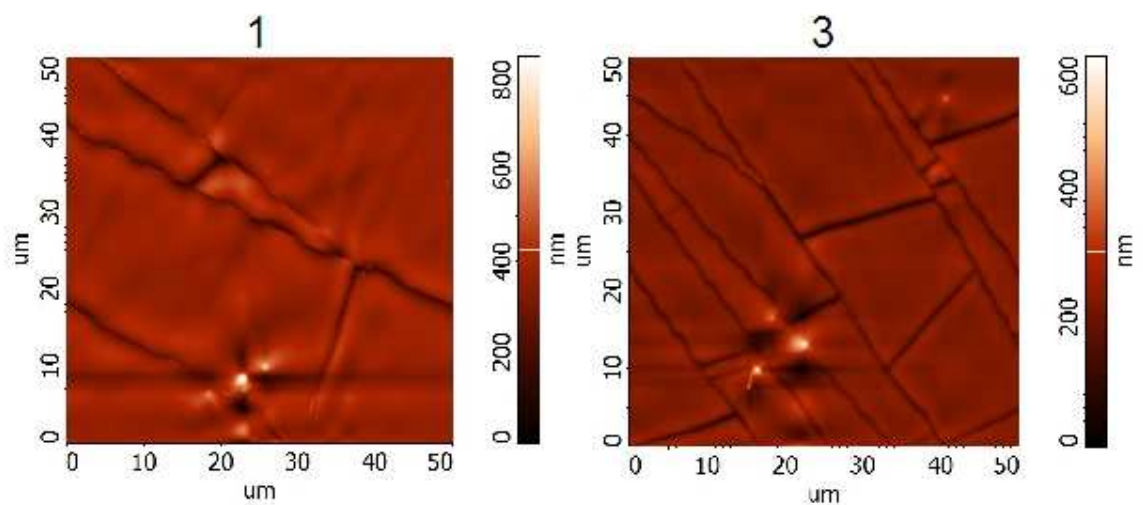
Obr. 30. Vzorky 1(3,23% CI),A(9,09% CI): silikonová matrice, doba plazmování-10+5min, plyn – Ar + O₂/Ar + C₄F₈, měřeno AFM mikroskopem. (nahore) morfologie vzorků (dole) fázový kontrast.



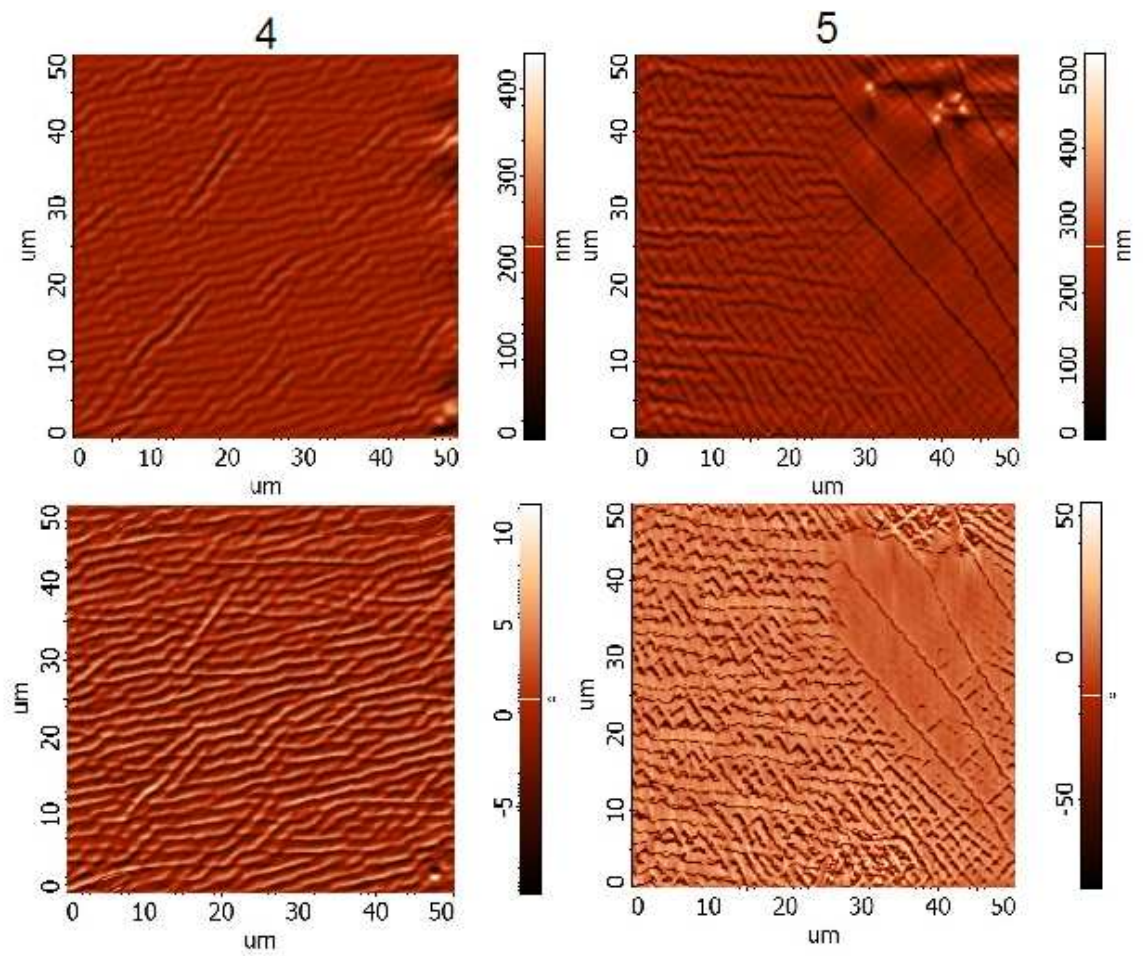
Obr. 31. Vzorek D(9,09% CI): silikonová matrice, neplazmovaný, měřeno AFM mikroskopem. (vlevo) morfologie (vpravo) fázový kontrast.



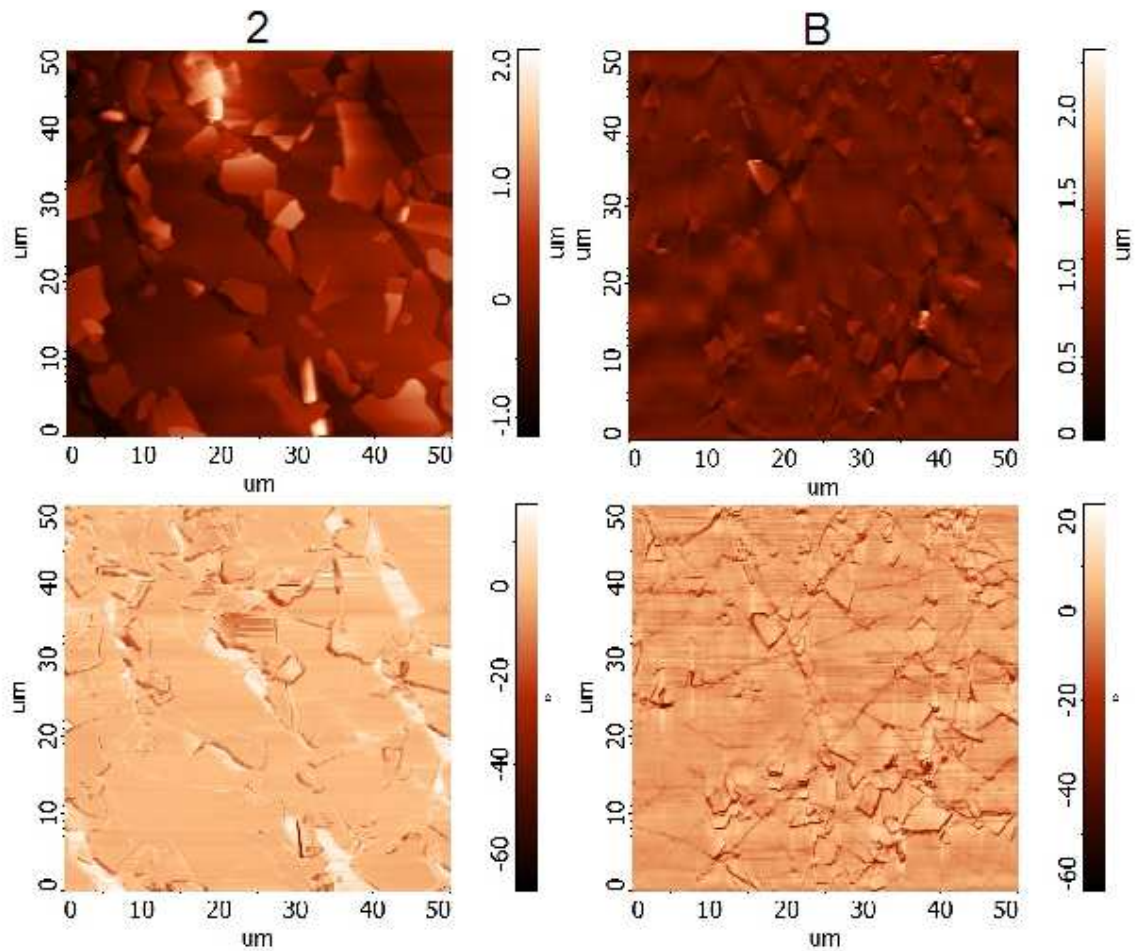
Obr. 32. Vzorky 3(3,23%CI), C(9,09% CI):silikonová matrice, doba plazmování-10+5min, plyn – Ar + O₂/Ar + C₆H₁₂, měřeno AFM mikroskopem. (nahore) morfologie vzorků (dole) fázový kontrast.



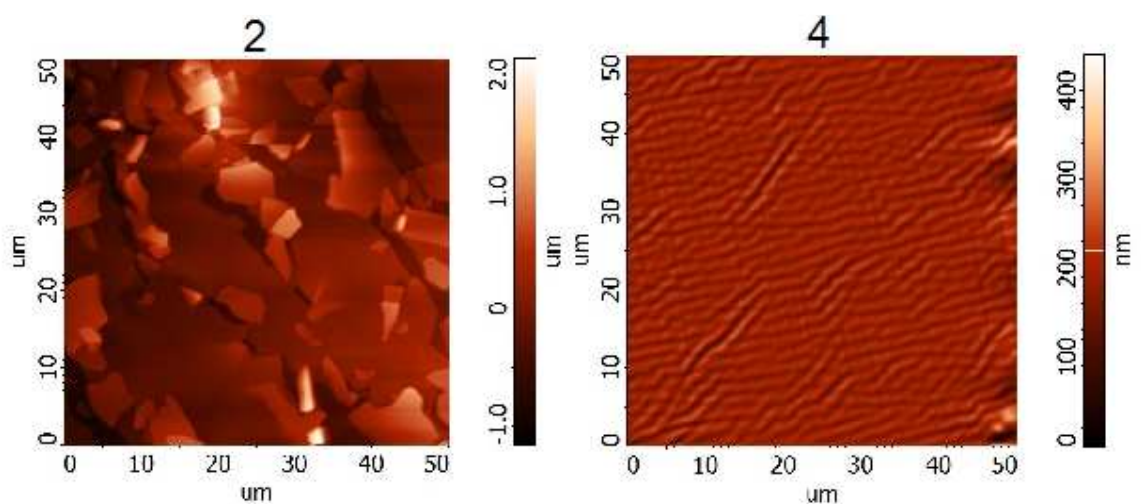
Obr. 33. Porovnání morfologie vzorků 1(doba plazmování-10+5min, plyn – Ar + O₂/Ar + C₄F₈) a 3(doba plazmování-10+5min, plyn – Ar + O₂/Ar + C₆H₁₂).



Obr. 34. Vzorok 4(3,23% CI), 5(3,23%CI): silikonová matrice, doba plazmování-10min, plyn $-Ar + C_6H_{12}$, měřeno AFM mikroskopem.(nahore) morfologie vzorků (dole) fázový kontrast.



Obr. 35. Vzorky 2 (3,23%), B (9,09% CI): silikonová matrice, doba plazmování-10min, plyn – Ar + C_4F_8 , měřeno AFM mikroskopem. (nahore) morfologie vzorků (dole) fázový kontrast.



Obr. 36. Porovnání morfologie vzorků 2 (doba plazmování-10min, plyn – Ar + C_4F_8) a 4 (doba plazmování-10min, plyn – Ar + C_6H_{12}).

5 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Částice karbonyl železa se působením magnetického pole organizují do kolonie „řetízků“ (viz. *Obr. 19*) jak potvrzuje (*Obr. 21*). Částice jsou obaleny matricí, jak je dobře patrné z (*Obr. 22*) a (*Obr. 23*). Vlivem úpravy v plazmatu byla matrice z povrchu částic odstraněna a to v menší míře v případech plazmování po dobu jedné minuty u vzorků II a IV (*Obr. 24*, *Obr. 26*) a ve větší míře v případě vystavení vzorků III a V plazmatu po dobu 5 minut (*Obr. 25*, *Obr. 27*). Nejmenší známky obalení částic matricí vykazoval vzorek V, vystavený cyklohexanu, (viz. *Tab. 7*). To je dobře patrné i ve větším měřítku (*Obr. 28*).

Měření morfologie povrchu AFM mikroskopem prokázalo přítomnost vyvýšených bodových oblastí, jež představují špičky kolonií „řetízků“ karbonyl železa. Vzorky A, C, D s vyšší koncentrací vykazují větší změny v morfologii, než jejich analogicky upravované protějšky vzorky 1, 3, 6. Měření morfologie prokázalo změny povrchu v závislosti na způsobu plazmování. U vzorků 1, A a 3, C je patrné popraskání matrice vlivem prodloužené doby vystavení plazmatu, vzorky mají podobný povrch (*Obr. 33*). Vzorky 4, 5 mají dle očekávání prakticky stejný povrch vzhledem ke obdobné úpravě a stejné koncentraci (*Obr. 34*). Vzorky 2 a 4 mají výrazně odlišný povrch (viz. *Obr. 36*) i přes stejnou dobu vystavení plazmatu. Patrně se projevil rozdíl u různých procesních plynů.

Měření fázového rozdílu AFM mikroskopem neprokázalo změnu materiálu u žádného ze vzorků, což může být způsobeno obalením kolonií částic karbonyl železa matricí. Ke změně nedošlo ani u žádného plazmovaného vzorku. Jediná výrazná změna je patrná u vzorku D (*Obr. 31*), který nebyl vystaven plazmatu, u něhož díky velkým rozdílům v morfologii povrchu mohlo dojít k částečnému poodkrytí karbonyl železa.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zhotovení vzorků karbonyl železa, jejich upravení v plazmatu a následná diskuse výsledků. Byly zhotoveny vzorky karbonyl železa v matricích silikonu a 2 –hydroxyethylcelulózy, ve kterých bylo karbonyl železo orientováno vlivem magnetického pole, čímž vytvořilo kolonii „řetězků“. To bylo prokázáno měřením pomocí optického mikroskopu. Vzorky byly upraveny v plazmatu při použití dvou různých plynů a různých dob vystavení plazmatu.

Vzorky karbonylu v matrici 2 – hydroxyethylcelulózy byly měřeny pomocí SEM. měření prokázalo obalení kolonie částic karbonyl železa matricí v případě neplazmovaného vzorku, jak bylo patrné z měření optického mikroskopu. Dále bylo prokázáno částečné a téměř úplné odstranění matrice z povrchu částic karbonyl železa vlivem krátkodobé a dlouhodobé úpravy plazmatem. Nejmenší obalení částic karbonyl železa vykazoval vzorek vystavený plazmatu po dobu 5 minut při směsi plynu Argonu a par cyklohexanu.

Vzorky karbonylu železa v silikonové matrici byly měřeny AFM mikroskopem. Byla pozorována změna morfologie povrchu v závislosti na druhu úpravy v plazmatu. Povrch v některých místech vykazoval výrazné zvýšení, což je způsobeno kolonií částic karbonyl železa.

Měření fázového rozdílu naznačuje přítomnost dvou druhů materiálů na povrchu v jediném vzorku, což může být způsobeno pokrytím karbonyl železa matricí. Vystavení vzorků plazmatu pravděpodobně nevedlo k obnažení částic karbonyl železa v silikonové matrici.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BASF. *CIP ProductOverview*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.inorganics.basf.com/ca/internet/en/function/conversions:/publish/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/CIP_General_PO_e.pdf
- [2] *Alibaba.com:Globaltradestartshere*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.alibaba.com/product-free/114289266/carbonyl_Iron_powder.html
- [3] BASF. *How is iron powder manufactured?* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.inorganics.basf.com/ca/internet/en/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/Technology>
- [4] *Vintagecassettes*. [online]. Updates: January 04, 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://vintagecassettes.com/_history/history.htm
- [5] BASF. *Story: steadyvoltageforprocessors*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.basf.com/group/corporate/en/news-and-media-relations/science-around-us/electrical-components/story>
- [6] UVAROVA, I. V., M. T. Rusov and N. P. Samchenko. *Ammoniasynthesis catalysts prepared...* *Pow. Met. and Met. Ceramics* 1969, 1, s. 40-43.
- [7] HSIEN, Yu-Zan, and Shun-Tian Lin. *Diamond tool bits with iron...* *Materials Chemistry and Physics*. 2001, Pages 121-125.
- [8] Sigma - Aldrich. *Sigma – Aldrich*. Carbonyl iron. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/c3518?lang=en®ion=CZ>
- [9] Sigma - Aldrich. *Sigma aldrich: Bezpečnostní list*. [online]. Datum revize 07.10.2010 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=CZ&language=cs&productNumber=C3518&brand=SIGMA&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Fsigma%2Fc3518%3Flang%3Den>
- [10] DUDKOVÁ, I. a B. Dvořák. *Laboratoř oboru chemie a chemické technologie: Měření vybraných technických parametrů průmyslových katalyzátorů*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/labchcht-001/n150013-b4.pdf>

- [11] *Quantachrome instruments: Tapped density analyzers: Autotap and dual autotap*. [online]. 2006 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.quantachrome.com/density/autotap.html>
- [12] GORDEUK, et al. *Carbonyl iron therapy for iron deficient anemia*. *Blood*. 1986 Mar; 67(3): 745-52.
- [13] JANÁČEK, Zdeněk, Petr, Ponížil. 1995. *Úvod do fyziky pevných látek*.
- [14] TOMÁŠ, Martin. *Dielektrika: Fyzika normálních dielektrik*. [online]. © copyright 2009 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.dielektrika.kvalitne.cz/dielvprompoli.html>
- [15] YOUPING, Duan, LiGuofang, LiuLidong and LiuShunhuta. *Electromagnetic properties of carbonyl...* *Bull. Mater. Sci.* 2010, Vol 33, No 5, p. 633-636.
- [16] VYBÍRAL, Bohumil. *Magnetické pole v látce : Elektrodynamika II.* [elektronická skripta]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/magvll.pdf>
- [17] ROSENFELD, Robert. *Vel. částic práš. železa vyr. z pent. žel.* Sbor. věd. prac. VŠ Báňská v Ostravě. 1968, XIV, číslo 5, řada hutnická, čl. 480.
- [18] MITTASCH, A., W. Schubardt, C. Müller: *Z. phys. Ch.* 40, 1, (1902), 46, 37, (1903). D. P. 500692.
- [19] ROSENFELD, R.: *Kand. dis. práce*. 1966. PFUK. Bratislava.
- [20] American Elements. *America elements: Carbonyl iron*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.americanelements.com/feci.html>
- [21] BASF. *CIP for diamond tools*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.inorganics.basf.com/ca/internet/en/function/conversions:/publish/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/1655_FL_CIP_DiamondTools_03.pdf
- [22] BASF. *CIP for Metal Injection Molding*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.inorganics.basf.com/ca/internet/en/function/conversions:/publish/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/1655_FL_CIP_MIM_04.pdf
- [23] *Magnetisc: Autorizovaná distribuce pro Českou republiku*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.ryston.cz/windows-1250/magnetics.html>
- [24] *Pk chemie*. [online]. © 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.praskovekovy.cz/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=58&Itemid=26

- [25] Sigma - Aldrich. *Sigma – Aldrich*. Iron. [online].[cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/44890?lang=en®ion=CZ>
- [26] JANOCHA, H. *Adaptronics and Smart Structures*. Vydání 2. Springer-Verlag, 2007, ISBN 3540719679, 9783540719670.
- [27] JOLLY, M.R., Bender, J.W., and Carlson, J.D, 1998.*Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids*. SPIE 5thAnnual Symposium on Smart Structures and Materials; San Diego, CA.
- [28] POYNOR, James, C. *Innovative Designs for Magnetorheological Dampers*. [elektronická skripta]. ©2001 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08142001-101447/unrestricted/Thesis_James_Poynor.pdf
- [29] CARLSON, David, J. a Mark R. Jolly. *MR Fluid, foam and elastomer devices*. Mechatronic. 2000, p. 555-569.
- [30] BECKER, Will. *Wikipedia The Free Encyclopedia: Magnetorheological fluid*. [online]. This page was last modified on 26 April 2012 at 19:26 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetorheological_fluid
- [31] "Designing with MR Fluids", Lord Corporation Engineering note, Thomas Lord Research Center, Cary, NC, December 1999.
- [32] *LORD: AskUsHow*. LORD Magneto-Rheological (MR). [online]. ©2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: [http://www.lord.com/products-and-solutions/magnetorheological-\(mr\)/mr-production-and-engineering.xml](http://www.lord.com/products-and-solutions/magnetorheological-(mr)/mr-production-and-engineering.xml)
- [33] Shtarkman EM. US Patent 4,992,190 1991.
- [34] Winslow WM. J Appl Phys 1949;20:1137-40.
- [35] SEDLACIK, M., et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 387(2011) 99-103
- [36] MADHEKAR, N.S. and R.S. Jangid, 2009. *Variable dampers for earthquake protection of benchmark highway bridges*, Smart Mater. Struct. 18 115011.
- [37] UHROVÁ, Eva. *helvetiapharma*. Výhody přípravku SUPERŽELEZO pro těhotné ženy. [online]. 2010 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.helvetiapharma.cz/6-article-vyhody-pripravku-superzelezo-pro-tehotne-zeny>

- [38] *Ferralet 90*. Carbonyl iron vs. Ferrous Iron. [online]. Copyright © 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.ferralet.com/Patient_Information/About_Iron/Forms/Carbonyl-Vs-Ferrous.aspx
- [39] AVILÉS, O. Misael, Armin D. Ebmer a James A. Ritter. *Ferromagnetic sedimentation for magnetic targeting...* J. Magn. Magn. Mater. 310(2007). 131-144.
- [40] RABÍŠKOVÁ, Miloslava. *Remedia: Internetové stránky českého farmakoterapeutického dvouměsíčníku*. Využití nanočásticových systémů v medicíně. [online]. Copyright © 2009 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.remédia.cz/Clanky/Lekove-formy/Vyuziti-nanocasticovych-systemu-v-medicine/6-H-j7.magarticle.aspx>
- [41] UDREA, L.E., N.J.C. Strachan, V. Badescu, O. Rotariu. *An in vitro study of magnetizing particle targeting in small blood vessels*. Phys. Med. Biol. 51 (2006) 4869-4881.
- [42] SHENG, R, Flores G A and Liu J, 1999. *In vitro investigation of a novel cancer...* J. Magn. Magn. Mater. 194 167–75
- [43] LIU, J., Flores G A and Sheng R, 2001. *In-vitro investigation of blood embolization ...* J. Magn. Magn. Mater. 225 209–17
- [44] LUBBE, A S, Bergemann C, Brock J and McClure D G, 1999. *Physiological aspects in magnetic drug targeting*. J. Magn. Magn. Mater. 194 149–59
- [45] JAIN, S, Mishra V, Singh P, Dubey P K, Saraf D K and Vyas S P, 2003. *RGD-anchored magnetic liposomes for monocytes/neutrophils-mediated brain targeting*. Int. J. Pharm. 261 43–55
- [46] JORDAN, A, Scholz R, Maier-Hauff K, et al. *Presentation of a new magnetic...* J Magn Magn Mater 2001; 225: 118–126.
- [47] GOODWIN, S. *Magnetic targeted carriers offers site-specific drug delivery*. Oncology, News International 2000; 9: 22.
- [48] PARDOE, H, Clark PR, Pierre TG et al, 2003. *A magnetic resonance paging based...* Mag Res Imaging 21; 483 - 488
- [49] LINGYUN, Zhao, et all. *Word Congr. on Med. Phys. and Biom. Eng...: Application of Carbonyl Iron as a Novel Mediator...* Springer, 2010 ISBN 3642038867, 9783642038860s. 172-175.

- [50] TADASHI, Matsumata, et all. *Phagocytosis of bacterial magnetite by leucocytes*. Appl. Microbiol. Biotechnol. 1989, 31, 401-405.
- [51] MERAVÝ, Tomáš, Jan Mrkos. *Domácí hrátky s plazmatem*. [elektronická skript]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2009-2010/Zima09/proc/plazma.pdf>
- [52] KREJČÍ, V.: *Plazma, čtvrté skupenství hmoty, I*. Vydání, nakladatelství Orbis, Praha 1974 kap 1-2.
- [53] GROSS, Boleslav, Konstantin Miklóssky a Bronislav Grycz. *Technika plazmatu*. 1 vydání Praha, SNTL, 1967. Řada teoretické literatury.
- [54] CHEN F., F., Chang J., P. *Lecture Notes on Principles of Plasma Processing*, Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 2003
- [55] *Oddělení aeronomie: Ústav fyziky atmosféry AV ČR*. Co je to plazma? [online]. 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/iono/definice.html>
- [56] AUBRECHT, Vladimír. *Radiční transport energie v plazmatu elektrického oblouku*. Brno, 1998 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.uvee.feec.vutbr.cz/~aubrecht/habil.pdf> Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektroniky a informatiky, Ústav elektrických strojů a přístrojů.
- [57] *Oddělení aeronomie: Ústav fyziky atmosféry AV ČR*. Plazmová frekvence. [online]. 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/iono/frekvence.html>
- [58] *Techmania edutorium: Plazma*. [online]. Copyright (c) 2008 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=616
- [59] KŘIVOŠEJ, J. et all. *Využití rychlé kamery na snímání plazmatu*. [online]. [cit. 2012-05-16]. (Dostupné z url: <http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2011/cd/prispevky/sbpdf/tokGolemII.pdf>)
- [60] WEINZETTL, Vladimír. *Termojaderná fúze*. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://server.ipp.cas.cz/~vwei/fusion/fusion_c.htm

- [61] *Řezání plazmatem*. [online]. 2009 [cit. 2009-29-04]. Dostupné z WWW: <http://www.juraweld.cz/str%20metody%20uvod1.htm>.
- [62] TICHOPÁDOVÁ, Dagmar. *ZDN.cz:Sestra. Plazmová sterilizace*. [online]. 9.2.2007 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.zdn.cz/clanek/sestra-priloha/plazmova-sterilizace-291167>
- [63] OSTRIKOV, K. *Reactive plasma as versatile nanofabrication tool*. *Rew. of Modern Phys.* 2005, vol 77, s. 489-511.
- [64] FRIDMAN, A., and L. A. Kennedy. *Plasma physics and engeneering*. 2004, (Taylor& Francis, New York).
- [65] LIEBERMAN, M.A., and A.J.Lichtenberg. *Principles of Plasma Discharges and Material Processing*. 1994, (Wiley, New York).
- [66] VLADIMIROV, S.V., and K Ostrikov, 2004. *Phys. Rep.* 393, 175.
- [67] ILIJIMA, S., *Nature* (London). 1991, 354, 56.
- [68] POOLE, C. P., Jr., and F. J. Owens, *Introduction to Nanotechnology*. 2003 (Wiley, New York).

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEM	skenovací elektronový mikroskop.
AFM	mikroskopie atomárních sil
CI	carbonyl iron
LD	lethal dose
ϵ	permitivita [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
D	elektrická indukce [$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$]
E	intenzita elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
ϵ_0	permitivita vakua ($8,85\cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$)
ϵ_r	relativní permitivita [1]
x	obecná veličina
ω	frekvence (s^{-1})
ϵ^*	permitivita jako komplexní číslo [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
ϵ'	reálná část permitivity [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
ϵ''	imaginární část permitivity [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
i	imaginární jednotka
R	odrazivost [dB]
E_r	intenzita odraženého elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
E_i	intenzita dopadajícího elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
m_e	magnetický moment elektronu [$\text{H}\cdot\text{C}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}$]
I	elektrický proud [A]
μ_0	permeabilita vakua ($\mu_0 \sim 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$)
S	plocha [m^{-2}]
e	elementární náboj ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
m_{orb}	moment hybnosti elektronu [$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]

m	hmotnost [kg]
r	poloměr [m]
g	gyromagnetický poloměr [m^2C^{-1}]
s	spin elektronu ($\pm 1/2$)
μ_r	relativní permeabilita [1]
χ	magnetická susceptibilita [1]
μ^*	permeabilita jako komplexní číslo [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
μ'	reálná část permeability [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
μ''	imaginární část permeability [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
T	teplota [K]
M	magnetizace [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]
B	magnetická indukce [T]
H	intenzita magnetického pole [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]
p	tlak [Pa]
K_p	rovnovážná konstanta [1]
n	látkové množství [mol]
N	poměr látkových množství [1]
V	objem [m^3]
k	rychlostní konstanta
R	univerzální plynová konstanta ($8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)
d	průměr [m]
ρ	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
t	čas [s]
z	počet částic [1]
MR	magnetoreologický
τ	napětí [Pa]

τ_y	smykové napětí [Pa]
η	plastická viskozita [Pa·s]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost tekutiny [s^{-1}]
G	modul pružnosti ve smyku [Pa]
γ	zkos [1]
MDT	magneticdrugtargeting
E_n	energie [J]
k_b	boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)
U_i	ionizační potenciál [eV]
h	Debyeova stínící délka[m]
2-HEC	2-hydroxyethylcelulóza

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Částice karbonyl železa</i> [2].	12
<i>Obr. 2. Závislost permitivity na frekvenci. ϵ' je reálná část a ϵ'' imaginární část permitivity</i> [15].	14
<i>Obr. 3. Závislost odrazivosti na frekvenci pro silikonové vzorky o různých koncentracích karbonyl železa</i> [15].	15
<i>Obr. 4. Závislost permeability na frekvenci. μ' je reálná část a μ'' imaginární část permeability</i> [15].	17
<i>Obr. 5. Hysterezní smyčka pro magneticky měkký materiál.</i>	18
<i>Obr. 6. Příprava karbonyl železa</i> [17].	19
<i>Obr. 7. Závislost počtu molů železa vzniklého v reakční směsi dávkované za 1 sekundu</i> [17].	22
<i>Obr. 8. Závislost růstu železných kuliček na čase</i> [17].	23
<i>Obr. 9. Schéma výroby společnosti BASF</i> [1].	24
<i>Obr. 10. Uspořádání MR kapaliny bez přítomnosti magnetického pole</i> [30].	27
<i>Obr. 11. Uspořádání MR kapaliny v přítomnosti magnetického pole</i> [30].	28
<i>Obr. 12. MR kapalina v tlakovém (squeeze) módu</i> [28].	29
<i>Obr. 13. MR kapalina ve smykovém (shear) módu</i> [28].	30
<i>Obr. 14. MR kapalina ve ventilovém (valve) módu</i> [28].	30
<i>Obr. 15. (a) malá vzdálenost od magnetického zdroje/velký gradient magnetického pole – částice jsou přichyceny ke stěně krevní cévy; (b) velká vzdálenost od magnetického zdroje/malý gradient magnetického pole – částice jsou unášeny krevním řečištěm</i> [39].	32
<i>Obr. 16. Teplota elektronů (T_e) a těžkých částic (T_h) v obloukovém plazmatu</i> [56].	36
<i>Obr. 17. Výskyt plazmatu podle teploty a podle hustoty</i> [60].	39
<i>Obr. 18. Schéma plazmového hořáku (a) se závislým obloukem, (b) s plynovou stabilizací s nezávislým obloukem (c) s vodní stabilizací (1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmatu, 6 – obrobek, 7 – přívod vody)</i> [61].	40
<i>Obr. 19. Uspořádání částic karbonyl železa v silikonové matrici. (a) uspořádání bez přítomnosti magnetického pole, (b) uspořádání v přítomnosti magnetického pole.</i>	47

<i>Obr. 20. Uspořádání částic karbonyl železa v matrici 2 - HEC. (a) uspořádání bez přítomnosti magnetického pole, (b) uspořádání v přítomnosti magnetického pole.</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 21. Kolonie částic karbonyl železa v matrici 2 – HEC.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 22. Detail kolonie částic karbonyl železa v matrici 2 – HEC.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 23. Vzorek I , SEM.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 24. Vzorek II , SEM.</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 25. Vzorek III , SEM.</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 26. Vzorek IV , SEM.</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 27. Vzorek V, SEM.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 28. Vzorek V v menším zvětšení, SEM.</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 29. Vzorek 6, měřeno AFM mikroskopem.</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 30. Vzorky 1, A měřeno AFM mikroskopem.</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 31. Vzorek D měřeno AFM mikroskopem.</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 32. Vzorky 3, C měřeno AFM mikroskopem.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 33. Porovnání morfologie vzorků 1 a 3.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34. Vzorky 4, 5 měřeno AFM mikroskopem.</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 35. Vzorky 2, B měřeno AFM mikroskopem.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 36. Porovnání morfologie vzorků 2 a 4.....</i>	<i>58</i>

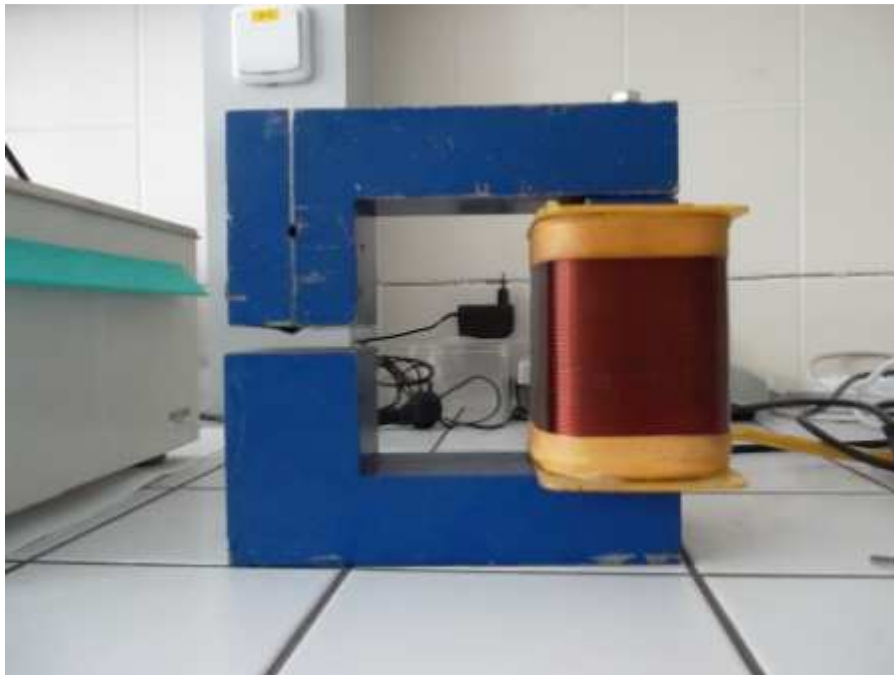
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vlastnosti karbonylu železa [7-9].....</i>	13
<i>Tab. 2. Ukázka tříd komerčně prodávaného karbonyl železa a různorodosti jeho vlastností. m. je zkratka pro měkké třídy, t. tvrdé.....</i>	25
<i>Tab. 3. Charakteristika několika komerčně využívaných MR kapalin [29].....</i>	27
<i>Tab. 4. Hmotnost vzorků se silikonovou maticí o hmotnostních koncentracích 3,23 %.....</i>	45
<i>Tab. 5. Hmotnost vzorků se silikonovou maticí o hmotnostních koncentracích 9,09 %.....</i>	46
<i>Tab. 6. Hmotnost vzorků s 2-HEC maticí o hmotnostních koncentracích 2,94 %.....</i>	47
<i>Tab. 7. Popis úpravy vzorků plazmatem.....</i>	48

SEZNAM PŘÍLOH

PI: Fotografie použitých přístrojů.

PŘÍLOHA PI: FOTOGRAFIE POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ



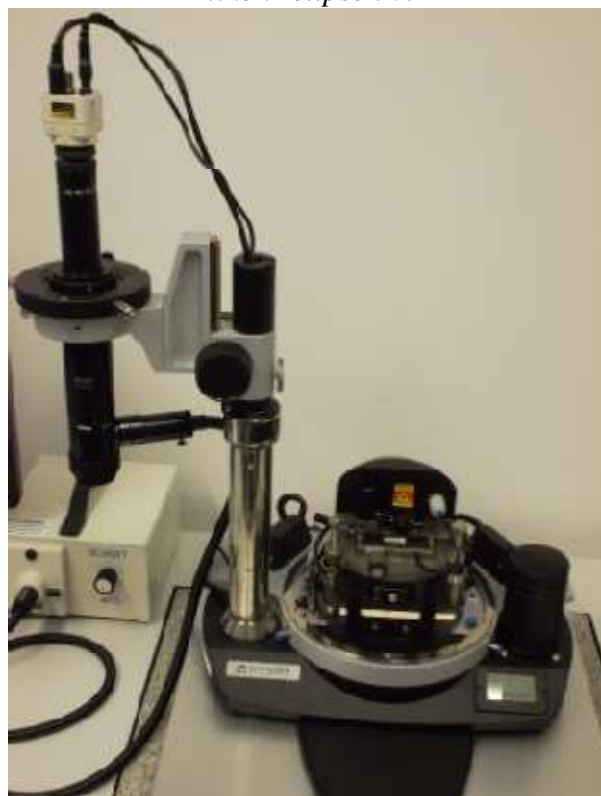
Elektromagnet



Plazmový reaktor DienerFemto.



Nikon Eclipse 50i



AFM NT-MDT Mikroskop