

# VÝVOJOVÉ TRENDY MAGNETICKÝCH UPÍNAČŮ PRO UPÍNÁNÍ FEROMAGNETICKÝCH PŘEDMĚTŮ

**Pavel Volný**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie

## **1 Úvod**

V rozvinuté strojírenské výrobě jsou neustále kladeny vyšší požadavky na zvyšování produktivity práce. Při každém způsobu obrábění je nutné bezpečně a spolehlivě upnout obrobek, což se provádí mechanickými, hydraulickými či pneumatickými upínači. Zmíněné způsoby upínání obrobku jsou však časově i manuálně náročné operace. Z těchto důvodů se hledaly cesty, jak snížit dobu nutnou k upnutí obrobku a dále jak jednoduše upnout více obrobků zároveň.

Proto byly vyvinuty magnetické upínače, které slouží k upnutí feromagnetických obrobků na bruskách, frézkách, hoblovkách, vrtačkách i soustruzích a mohou se též používat při manipulaci s feromagnetickým materiálem jako přídržná nebo nosná zařízení.

Počátek magnetického upínání ve strojírenství, resp. kovoobrábění spadá do roku 1896, kdy byl patentován první elektromagnetický upínač pro broušení. Od té doby byly vyvinuty a zdokonaleny další principy v upínání pomocí magnetické síly a to magnetický upínač s permanentními magnety (patent z roku 1943) a elektropermanentní upínač (představen roku 1960).

V následujících kapitolách přiblížíme jednotlivé magnetické upínací systémy, jejich principy a praktické provedení, naznačíme, kam směřuje vývoj v tomto odvětví. Uvedeme důležité konstrukční a technologické aspekty návrhu magnetických upínačů a provedeme technicko-ekonomické zhodnocení současně vyráběných upínačů. Představíme několik světových výrobců upínacích zařízení společně s vybraným sortimentem magnetických upínačů.

V experimentální části práce ověříme některé vlastnosti elektromagnetických upínačů a blíže se seznámíme s procesem odmagnetování obrobku po jeho sejmutí z upínače. Ověříme také funkci vzorku elektropermanentního upínače, jehož konstrukci si ukážeme v poslední kapitole této práce.

## **2 Magnetické upínače**

V nynější době se pro obrábění díky svým užitným vlastnostem stále více prosazují magnetické upínače. Magnetické upínání má výhody v jednoduchosti, časové nenáročnosti a variabilitě upnutí více obrobků. Tento způsob upnutí přispívá tedy ke zvýšení produktivity

práce při mnoha procesech, jako např. při hromadném broušení, ale i frézováním, hoblováním apod.

Jsou známy tři principy magnetického upínání, které se v praxi běžně používají. Nejstarším magnetickým upínačem je elektromagnetický upínač využívající cívek napájených stejnosměrným proudem. O něco vývojově mladším upínačem je magnetický upínač s permanentními magnety a za nejmodernější můžeme považovat elektropermanentní upínač. Ten spojuje výhody obou předchozích typů v jeden funkční celek.

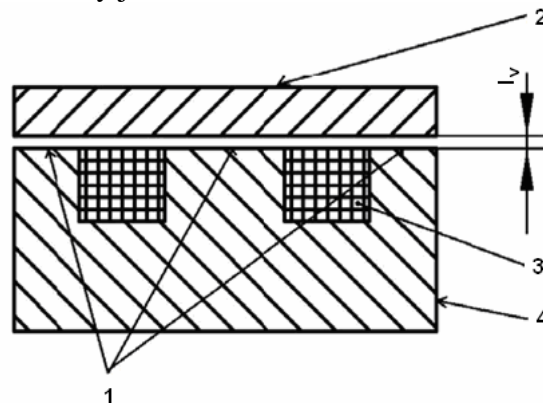
Uvedme si nyní jednotlivé magnetické upínací systémy se stručným popisem jejich funkce a vlastností.

## 2.1 Elektromagnetický upínač

Magnetické upínání pomocí elektromagnetu je principiálně nejstarší, ale i v dnešní době se najde spousta aplikací této technologie. Elektromagnetický upínač (EMU) je dnes značně rozšířený zejména pro použití u rovinných brusek.

Základním principem EMU jsou cívky napájené usměrněným proudem, z nichž se stane elektromagnet. Elektromagnetický upínač je tedy závislý na vnějším zdroji energie. Jakmile dojde k odpojení vnějšího zdroje energie, magnetické pole rychle zaniká a dochází k poklesu magnetické síly na malou remanentní hodnotu. Z tohoto hlediska lze tento upínací systém považovat za rizikový, neboť v případě výpadku energie, např. při poruše, upnuté těleso může odpadnout. Na toto je třeba dávat pozor zejména v případě elektromagnetických zvedáků při přenášení těžkých břemen.

Konstrukce EMU se vyznačují tím, že budící vinutí je umístěno v tělese z feromagnetického materiálu - vaně a při zapnutí vytváří elektromagnetické pole. Základní modul EMU bez tzv. pólové desky je znázorněn na obr. 1.

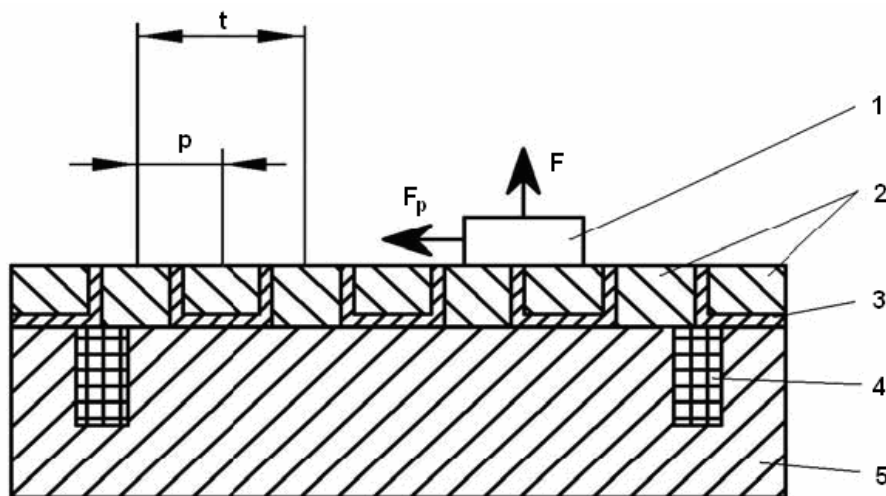


Obr. 1: Základní modul EMU bez pólové desky

(1 – celková aktivní plocha pólů, 2 – obrobek, 3 – cívka, 4 – těleso upínače,  $l_v$  – vzduchová mezera)

Mezi obrobkem a adhezní plochou upínače se vyskytuje vždy určitá vzduchová mezera  $l_v$  (dána drsností a nerovností povrchu styčných ploch) a aktivní plocha pólů bez nemagnetických spár. Aby byla chráněna budící cívka, např. i před vlhkostí, uzavírají se obvykle magnetické systémy pólovou deskou, na které vzniká vlastní adhezní plocha. Pólová deska současně působí jako pólový nástavec, jehož vhodným tvarováním lze vynásobit počet magnetických pólů (vzniká magnetický multipól) na adhezní ploše upínače a přizpůsobit

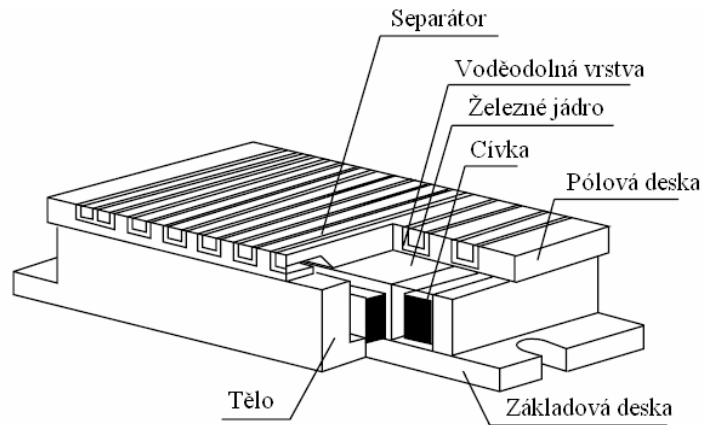
magnetické pole tvaru a velikosti obrobku. Magnetický obvod s pólovou deskou je znázorněn na obr. 2.



**Obr. 2: Základní modul EMU s pólovou deskou**  
 (1 – obrobek, 2 – pólová deska, 3 – nemagnetické spáry, 4 – cívka, 5 – těleso upínače)  
 (t – pólová rozteč, p – pólový interval,  $F_p$  – posuvná síla, F – adhezní síla)

Pólová deska je obvykle složena z měkké oceli (např. třídy 11) a nemagnetických dělicích spár (např. z epoxidového kompozitu, mosazi či bronzu) s relativní permeabilitou  $\mu_r \approx 1$ . Nad budící cívkou tak vzniká adhezní plocha střídavě rozdělená na severní a jižní póly a adhezní síla využitelná pro upnutí obrobků působí rovnoměrně po celé upínací ploše. Vzdálenost středů dvou sousedních nestejných pólů se nazývá interval p a příslušná vzdálenost dvou stejných pólů je pólová rozteč  $t = 2p$ . Velikost pólové rozteče souvisí s geometrickým uspořádáním pólů a dělicích spár. Přiložíme-li feromagnetický obrobek na dva nestejnomyenné póly, jak je patrné z obr. 2, pak se při zapojené budící cívce uzavřou magnetické indukční čáry obrobkem a silové účinky magnetického pole se projeví vznikem adhezní síly F. Adhezní síla F je síla, potřebná k odtržení obrobku a působí ve směru kolmém k upínací ploše, je-li upínač v činnosti. Tuto sílu lze přibližně spočítat, nebo přesněji změřit. Důležitá je průměrná adhezní síla, která se vztahuje na celou upínací plochu, tj. při jejím 100% obsazení obrobky. Posuvná síla  $F_p$  je síla potřebná k posunutí obrobku ve směru rovnoběžném s adhezní plochou, přičemž platí, že  $F_p < F$ . Prakticky bývá  $F_p$  asi 20 až 30% F, podle kvality povrchů obrobku a adhezní plochy.

Průchodem proudu cívkou je způsobeno zahřívání cívky i celého upínače, což u některých méně kvalitních EMU negativně ovlivňuje přesnost upínací plochy a životnost celého upínače. Další představu o skutečném provedení EMU získáme z obr. 3.



**Obr. 3: Elektromagnetický upínač**

Vycházející z obr. 4 můžeme zavést zjednodušující předpoklad, že veškerá reluktance neboli magnetický odpor upínače bude způsobena pouze vzduchovou mezerou, tj. magnetický odpor železa  $R_{mz}$  u upínače a obrobku bude zanedbán, pak lze adhezní sílu pro EMU podle obr. 1 určit vztahem

$$F = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \frac{(N \cdot I)^2}{4 \cdot l_v^2} \cdot S \quad [\text{N}] \quad (1.)$$

nebo

$$F = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B^2 \cdot S \quad [\text{kp; T, cm}^2], \quad (2.)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $B$  je magnetická indukce ve vzduchové mezeře,  $NI$  jsou „ampéřzávity“ budící cívky,  $l_v$  je velikost vzduchové mezery a  $S$  je aktivní plocha pólů.

Pro uvažovaný model EMU při zanedbání rozptylového magnetického toku můžeme adhezní sílu určit dle často užívaného praktického vztahu

$$F \cong \left( \frac{B}{0,5} \right)^2 \cdot S \quad [\text{kp; T, cm}^2] \quad (3.)$$

a hustotu adhezní síly podle

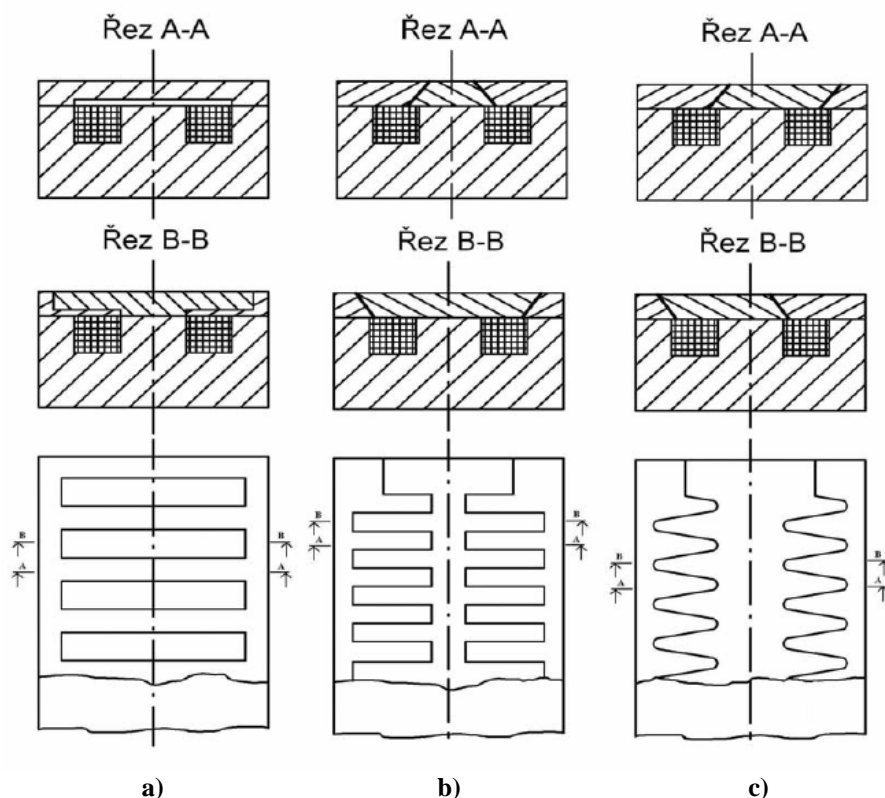
$$f = \frac{F}{S} = \left( \frac{B}{0,5} \right)^2 \quad [\text{kg.cm}^{-2}]. \quad (4.)$$

Ve vztazích (2.) až (3.) jsou z praktického hlediska použity jiné než základní fyzikální jednotky.

Pro reálný upínač musíme uvažovat určitou hodnotu magnetického odporu železa  $R_{mz}$ . Tato hodnota, která je důležitá pro velikost poskytované adhezní síly, jak bude uvedeno v následujících kapitolách, závisí na geometrii a materiálu železné části upínače. Z tohoto hlediska existuje mnoho konstrukčních řešení EMU, patentově chráněných, některé představíme a experimentálně ověříme vlastnosti a chování z hlediska jejich užitných vlastností.

### 2.1.1 Příklady uspořádání magnetických obvodů EMU

Jak bylo řečeno, elektromagnetických upínacích systémů existuje spousta druhů. Jako příklad ukážeme tři případy provedení EMU s pólovou deskou různé morfologie.



Obr. 4: Různé konstrukce EMU

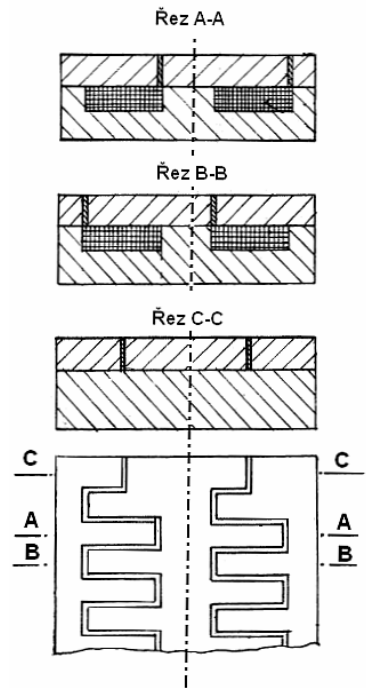
V daném případě uvažujeme, že pólová deska je přiložena na spodní těleso upínače, které je pro všechny tři typy EMU zvoleno stejné a do kterého je vložena budicí cívka. Jak je patrné z obr. 4, je na adhezní straně pólových desek různé uspořádání severních a jižních pólů, oddělených nemagnetickými spárami, přičemž celková aktivní plocha pólů je u všech typů pólových desek téměř stejná. Nejsou však shodné magnetické vlastnosti takto vytvořených EMU.

Velikost upínací neboli adhezní síly  $F$  závisí na reluktanci magnetického obvodu  $R_{mz}$ , čili celkový magnetický odpor upínače při konstantních „ampéřzávitích“  $NI$  budicí cívky silně ovlivňuje dosažitelnou adhezní sílu.

Z experimentů a výpočtů [4] vyplývá, že dle kvality magnetického obvodu je nejvýhodnějším řešením z obr. 4 model c, který je označován jako tzv. prstové uspořádání pólové desky. Jeho nevýhoda tkví v poměrně nákladné výrobě pólové desky, neboť tvar magnetických pólů je natolik složitý, že vyžaduje použití speciálních propalovacích zařízení vybavených plazmovým hořákem.

Zbylé dva typy mají malou upínací sílu v důsledku vysokého  $R_{mz}$  celého uspořádání a malou mechanickou stabilitu pólové desky. Jsou tedy koncepčně zastaralé, provozně nespolehlivé a již se od nich ustoupilo, avšak i na jejich základě se v průběhu řady let mnohé nedostatky EMU eliminovaly. Výsledkem vývoje jsou nové koncepce elektromagnetického druhu upínačů, ať již se jedná o nové morfologie pólových desek či dokonce EMU bez samotné pólové desky.

Kupříkladu pólová deska s magnetickými póly ve tvaru meandrů obdélníkového průběhu podle patentu č. 237175 (obr. 5) odstraňuje výrobní potíže desky prstového typu. Deska je výrobně jednodušší díky tomu, že sklony stěn meandrů v celém průřezu pólové desky jsou kolmé k rovině adhezni plochy. Pólovou desku tak lze vyrábět na běžných propalovacích strojích. Tato skutečnost současně s vynikajícími užitnými vlastnostmi, jako je vysoká hustota a rovnoměrnost adhezni síly na celé upínací ploše či tuhost a mechanická stabilita, řadí zmíněnou pólovou desku mezi špičková upínací řešení.

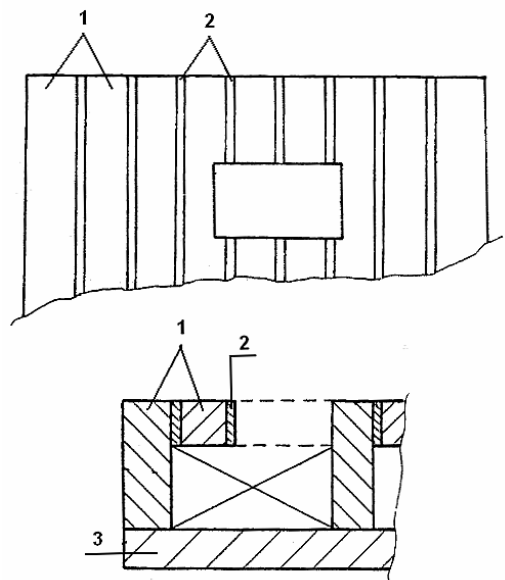


Obr. 5: Novější typ pólové desky

Dalším patentovaným konstrukčním řešením EMU (patent č. 278473, obr. 6) je upínač pod označením *Super chuck*. Jeho podstata spočívá v tom, že jednotlivé magnetické nástavce (1) jsou zkonstruovány z pásů či desek z feromagnetického materiálu a jsou od sebe odděleny nemagnetickými pásy (2) z mosazi. Tím lze výrazně snížit pracnost výroby a redukovat odpad. Magnetické pólové nástavce jsou rozměrově a tvarově řešeny tak, že magnetický obvod je ze spodní strany uzavřen rovnou deskou (3) z feromagnetického materiálu, čímž odpadá výroba tzv. vany upínače.

Díky vysoké hustotě a rovnoměrnosti adhezni síly po celé ploše zmíněného EMU, v důsledku minimalizace rozptylového magnetického toku, lze tento patentovaný EMU považovat za velmi kvalitní ve svém oboru. Tuto skutečnost jsme demonstrovali v experimentální části v kap. 7.

V průběhu vývoje se konstruktéři snažili vytvořit EMU bez pólové desky, kde není budící cívka soustředěna do standardního tvaru, ale je rozprostřena po celé ploše, čímž by se odstranilo několik nedostatků upínačů s deskou jako je např.:



Obr. 6: EMU „Super chuck“

- Velký magnetický odpor celého uspořádání, který je dán magnetickým odporem vzduchových mezer vlastní pólové desky a geometricky rozměrné vany, která je vyráběna většinou odléváním a má obvykle horší magnetické vlastnosti než pólová deska.

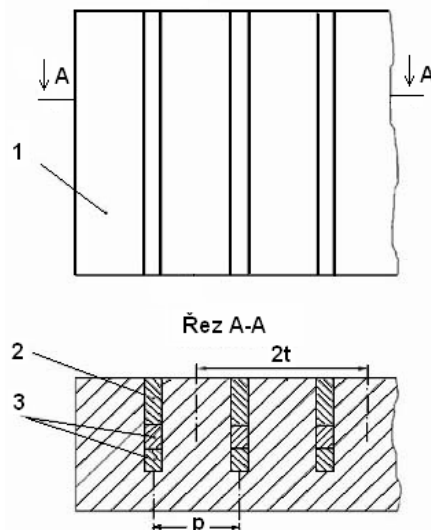
- Menší mechanická stabilita pólové desky, která díky magnetické izolaci nesouhlasných pólů netvoří kompaktní celek.
- Malá spolehlivost, neboť EMU není, nebo ne zcela, hermeticky uzavřený celek a může tak docházet k pronikání vlhkosti k vinutí.

Výše uvedené nedostatky se vcelku podařilo odstranit v patentovaném řešení elektromagnetického upínače (dle patentu č. 8498 – 76, obr. 7). Nový upínač bez klasické koncepce snímatelné pólové desky je vytvořen pouze z jediného kompaktního tělesa z feromagnetického materiálu, v jehož horní části byla vytvořena multipólová upínací plocha. Vinutí, které je uloženo v přímých rovnoměrně rozmístěných drážkách, je hermeticky uzavřeno zalisovaným nemagnetickým klínem vhodné výšky (s ohledem na potřeby přebroušení) a lze jej připojit na regulovatelný zdroj stejnosměrného proudu  $I_{ss}$ .

Díky snížení konstrukční výšky celého uspořádání vnutí upínač obrobku co nejkratší indukční čáry a zvýší se tak velikost upínací síly. Vytvořením adhezní plochy přímo na jedné straně vany upínače odpadá výrobně pracná pólová deska, sníží se koeficient rozptylu magnetického pole a taktéž magnetický odpor celého uspořádání.

Dále toto řešení EMU zajišťuje:

- Rovnoměrné rozložení upínací síly po celé ploše upínací desky.
- Velkou hustotu upínací síly ve srovnání s ostatními druhy EMU.
- Jednoduchost, tuhost a kompaktnost konstrukce.
- Menší spotřebu materiálu jak pro vinutí, tak pro magnetický obvod, menší pracnost výroby a nižší váhu výsledného zařízení.
- Vyšší energetickou účinnost v důsledku vyloučení vany z magnetického obvodu, a tím pádem zmenšení magnetického rozptylu.



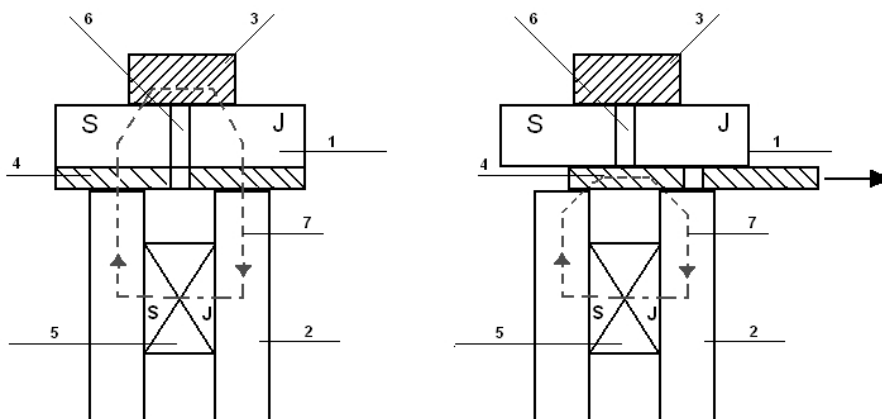
**Obr. 7: Koncepce EMU bez pólové desky**  
 (1 - multipólová plocha, 2 - nemagnetický klín, 3 - vodiče cívky)  
 (t – pólová rozteč, p – pólový interval )

## 2.2 Magnetický upínač s permanentními magnety

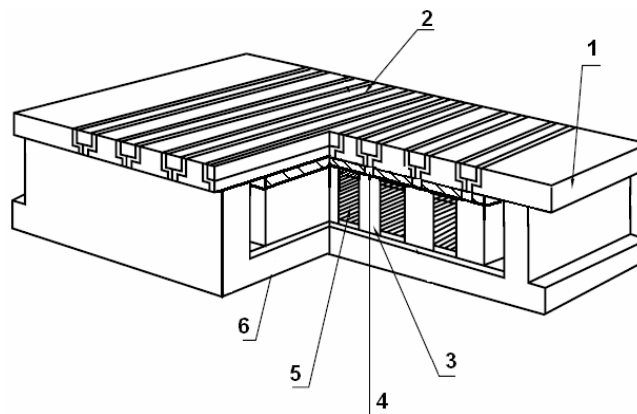
Tyto magnetické upínače používají pro vznik přídržné síly permanentní magnety z různých materiálů, říkáme jim proto permanentní magnetické upínače (PMU). Pro PMU se v současnosti nejčastěji používají tzv. neodymové magnety, které poskytují nejvyšší hodnoty magnetické remanence  $B_r$ . Permanentní magnet je nezávislý na zdroji energie a upínací systém je z hlediska provozu bezpečnější.

Permanentní magnety se nezahřívají, což je jedna z výhod tohoto systému. Jistý problém skýtá fakt, že obrobky, které si po sejmutí z upínače ponechají určitý zbytkový magnetismus, je nutné odmagnetovat zařízeními k tomu určenými, jak bude uvedeno v následujících kapitolách.

Jedním z hlavních limitů pro tento druh upínacího systému je požadavek uvedení upínače do stavu zapnuto nebo vypnuto. Jsme zde omezeni velikostí mechanické síly potřebné k posunutí tzv. zkratovací planžety z feromagnetického materiálu, která se nachází v prostoru mezi permanentními magnety a pólovou deskou. Posunem planžety navodíme stav, kdy magnetické indukční čáry jsou buď vtaženy dovnitř upínače (vypnuto), nebo vystoupí nad pólovou desku (zapnuto). Tento omezující faktor způsobuje, že PMU jsou vhodné pro menší dílce, jako mezní velikost systému se udává rozměr cca 300x600 mm. Na obr. 8 je zobrazen schématický pohled na praktickou konstrukci PMU s pólovou deskou.



**Obr. 8: Princip PMU, zapnuto, vypnuto**  
(1 - pólová deska, 2 - pólové nástavce, 3 - obrobek, 4 - zkratovací planžeta, 5 - magnet, 6 - nemagnetická spára, 7 - tok magnetických indukčních čar)



**Obr. 9: Magnetický upínač s permanentními magnety**  
(1 - pólová deska, 2 - nemagnetické spáry, 3 - železné jádro, 4 - zkratovací planžeta, 5 - magnet, 6 - hliníková vana)



Jak jsme zmínili, PMU se uvádějí v činnost mechanickým posunem zkratovací planžety. Ta se ovládá nejčastěji ručně pomocí pákového ovladače, běžně v provedení násuvného klíče a vačkového převodu. Díky tomuto je upínací systém jednoduchý na ovládání. Na obr. 10 a 11 vidíme reálné provedení PMU, a to jak v provedení obdélníkovém tak kruhovém.



Obr. 10: Obdélníkové provedení PMU



Obr. 11: Kruhové provedení PMU

### 2.2.1 Druhy materiálů permanentních magnetů

Pro bližší seznámení s technologií PMU a též elektropermanentních upínačů je nutné se blíže seznámit se samotnými permanentními magnety (PM), které jsou zdrojem magnetického toku a tudíž základní částí těchto upínacích zařízení.

Přestože jsou tvrdé ferity cenově nejpříznivější a celosvětově zatím stále nejvíce používanými PM, pro magnetické upínače s vysokými požadavky na adhezní sílu nejvíce vyhovují magnety ze sloučenin vzácných zemin.

V tomto případě se jedná o PM obsahující vzácné zeminy, jako je neodym (Nd) nebo samarium (Sm) a složky železa (Fe) a bóru (B).

Ve srovnání s tradičními permanentními magnety mají tyto PM podstatně vyšší funkční parametry. Mají významně vyšší hodnoty koercitivity  $H_c$  nebo remanence  $B_r$  nežli známé a osvědčené trvalé magnety z kalené oceli, slitiny AlNiCo či sloučenin tvrdých feritů. Permanentní magnety na bázi  $\text{SmCo}_5$  a  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , do té doby nejsilnější známé PM, doposud používané s velkým úspěchem, byly začátkem 80. let minulého století zásadně doplněny vývojem magnetů na bázi  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Neodymové magnety jsou v důsledku lepší dosažitelnosti surovin cenově výhodnějšími. Jejich nevýhodou je nižší Curieova teplota a v důsledku toho vyšší teplotní koeficienty koercivity a remanence. Kvůli teplotním koeficientům, které jsou u magnetů ze vzácných zemin zásadně negativní, má pracovní bod při vyšších teplotách zásadní význam.

Pokroky ve vývoji materiálu zlepšily doposud značně silnou náchylnost ke korozi magnetů NdFeB, takže za normálních podmínek použití mohou být určité materiály z této skupiny nasazeny, aniž by byla nutná dodatečná povrchová úprava, např. ve formě povlaku niklu, zinku, epoxidové pryskyřice nebo povrchové pasivace.

### 2.3 Elektropermanentní upínač

Posledním, nejmladším principem používaným pro magnetické upínání obrobků je elektropermanentní upínač (EPMU). Oproti koncepcím PMU a EMU skýtá mnoho výhod.

Jedná se o jakýsi hybrid mezi PMU a EMU. Z obou uvedených čerpá výhody a spojuje je v jeden funkční a výkonný systém. Na rozdíl od EMU potřebuje tento pouze krátký, řádově milisekundový, impuls (či impulsy) energie elektromagnetického pole k aktivaci magnetického materiálu. Materiál se stává po svém nasycení zdrojem permanentního magnetického toku. Opačně orientovaným energetickým impulsem lze celý upínací systém včetně obrobku odmagnetovat. Díky krátkým proudovým impulsům se systém nezahřívá, zůstává ve funkčním stavu chladný, čímž je zaručena jeho maximální rozměrová stabilita. Výhodou EPMU je provozní bezpečnost, upínací síla je zaručena i při výpadku elektrické energie. Integrací mikroprocesorových řídicích obvodů do systému lze následnou demagnetizaci upínaného obrobku dovést k vysoké dokonalosti. Z toho vyplývá, že napájecí systém EPMU lze vybavit vlastním demagnetizačním cyklem a nemusí být tedy potřebná následná demagnetizační zařízení.

Shrňme si výhody elektropermanentního upínače:

- *Nízká spotřeba energie:* upínač potřebuje energii jen během fáze zmagnetování nebo odmagnetování.
- *Bezpečnost upnutí:* pokud by během pracovního cyklu vypadl zdroj napájení, deska i obrobek zůstanou zmagnetovány.
- *Žádné teplotní výkyvy:* minimální rozměrové změny, vysoká přesnost obrábění.
- *Vysoká upínací síla:* srovnatelná či vyšší s nejlepšími EMU.
- *Flexibilita:* odmagnetovaný upínač je ihned připraven pro další obrobek i odlišného tvaru.
- *Demagnetizace:* snadné sejmutí obrobku z upínací desky a snadný proces demagnetizace (magnetické „vyčištění“).

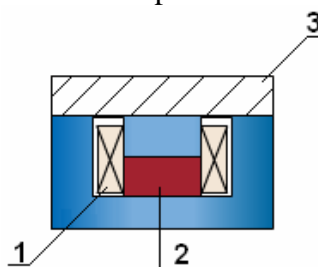
Konkrétních konstrukčních provedení EPMU je mnoho a nové stále vznikají. Společný mají většinou druh použitého magnetického materiálu, jsou vybaveny silnými PM, dnes většinou neodymovými magnety.

Koncepčně lze nabídku předních světových výrobců EPMU rozdělit do několika skupin:

### 2.3.1 Paralelní uspořádání magnetických pólů

Jako první se zaměříme na EPMU s paralelním uspořádáním magnetických pólů. Samotné zařízení se vizuálně příliš neliší od EMU, pólová deska je téměř stejná, avšak ve vnitřních částech se odlišují.

Provedení upínače je takové: jedná se o celek složený ze segmentů, kde je jeden PM obklopený budící cívkou. Na obr. 12 vidíme principiální schéma EPMU, v reálném provedení bývá mezi obrobek a těleso upínače umístěna pólová deska.



**Obr. 12: Schéma EPMU**  
(1 – cívka, 2 – PM, 3 – obrobek)

Permanentní magnet je při vypnutém stavu upínače neaktivní a nemagnetuje. Teprve přivedením impulsu elektrického proudu do cívky přejde PM do aktivního zmagnetovaného stavu. Opačný elektrický impuls magnet deaktivuje. Tento princip jsme využili pro náš modelový vzorek EPMU, jak je uvedeno v kap. 8.

Jsou známi i systémy, kdy se celek skládá ze segmentů se dvěma PM a jednou budící cívkou. V tomto případě jsou PM vždy aktivní, ale magnetický okruh je ve vypnutém stavu odkloněn a upínací plocha je neaktivní. Při zapnutí elektrický impuls změní polaritu jednoho z magnetů. Magnetické pole generované magnety je následně orientováno směrem na upínací desku, což vede k upnutí obrobku. Nový elektrický impuls vypne (přepne) magnetický systém. Tento princip je dnes hojně využíván pro nové koncepce EPMU, využívá se zde směřování magnetických indukčních čar dovnitř či ven z upínače.

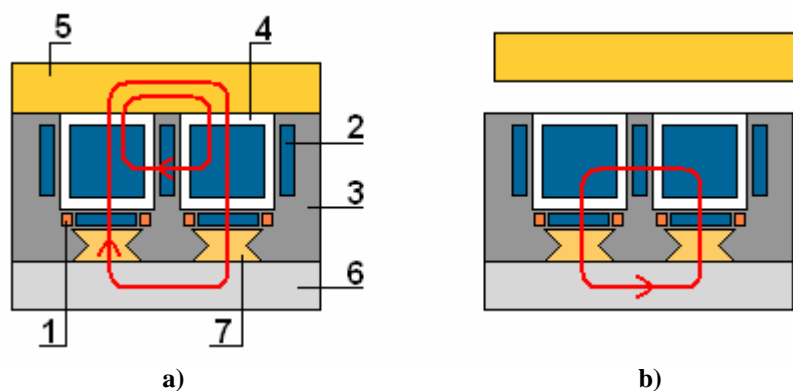
### 2.3.2 Čtvercové magnetické póly

Někteří výrobci přicházejí s novou koncepcí s charakteristickým uspořádáním magnetických pólů, jedná se o tzv. čtvercové magnetické póly. Na rozdíl od předchozí zmíněné koncepce se tato vyznačuje vyšší adhezní silou. Jako příklad můžeme uvést zařízení od firmy SPD na obr. 13.



**Obr. 13: Provedení EPMU se čtvercovými póly**

Jelikož pouze málo informací je dostupných, je obtížné vysledovat pravý fyzikální princip funkce tohoto provedení. Výrobci udávají ve svých katalogových listech princip zařízení tento: každý pól je tvořen krychlí z feromagnetického materiálu, horní stěna představuje pracovní plochu, dalších pět stěn je kryto magnetickým materiálem (obr. 14). Po čtyřech stranách pólu jsou tedy uspořádány statické PM, zatímco pod pólem je umístěn přepólovatelný PM opatřený cívkou. Magnetické póly jsou zality epoxidovou pryskyřicí ve vakuovém prostředí, čímž je zajištěna dokonalá trvalá ochrana elektrických cívek proti průniku chladicí kapaliny, která se při obrábění často používá.



**Obr. 14: Principiální schéma čtvercových pólů**

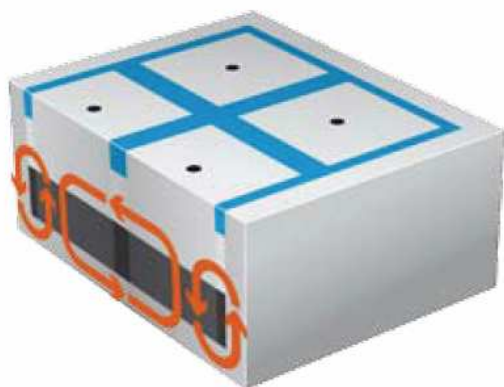
(1 – cívka, 2 – PM, 3 – epoxidová pryskyřice, 4 – feromagnetický pól, 5 – obrobek, 6 – feromagnetická základna, 7 – podpěra)

Během zmagnetování (obr. 14 a) je pól ze čtyř stran “napájen” magnetizmem, magnetické toky všech pěti PM se sečtou a začnou působit vně systému, tj. uzavírat se přes upínací obrobek. Při odmagnetování (obr. 14 b) se statické PM a přepólovatelný magnet “zkratují”, magnetický tok se začne uzavírat mezi magnety po stranách a magnetem spodním a následkem toho se magnetismus stáhne pod povrch desky, který se stane neutrálním. Jinak řečeno, je-li upínací prvek aktivován, působí magnetická pole navzájem proti sobě a vysílají magnetické indukční čáry přes horní stranu. Obrobek je zachycen a upnut. Při vypnutí upínače přepólováním spodního magnetu vznikne odlišný magnetický obvod, který účinným způsobem zadrží magnetismus uvnitř upínadla.

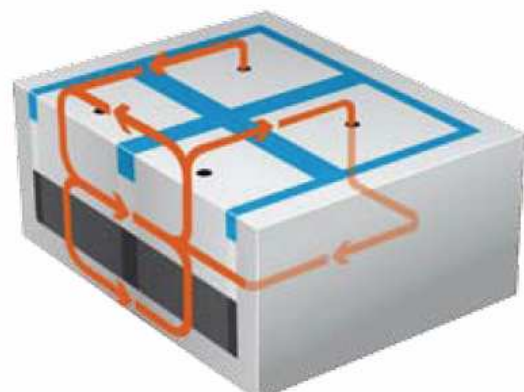
Systém obložení každého z pólů desky z pěti stran magnety umožňuje usměrnění indukčních čar ve vysoké koncentraci pouze na šestou upínací plochu pólů. Toto mimo jiné přináší významnou výhodu ve srovnání s paralelním uspořádáním pólů, kde dochází k šíření magnetismu i mimo upínací plochu magnetu, a tím k jeho pronikání do stroje, frézovacích hlav a nástrojů.

Tento systém i v aktivovaném stavu zaručuje naprostou magnetickou neutralitu kovového pláště desky, a tím zamezuje jakémukoliv pronikání magnetismu mimo upínací plochu. Plášť desky je zhotoven vyfrézováním z plného materiálu pro zajištění jeho dlouhodobé geometrické stálosti.

Čtvercové póly jsou s maximálními výhodami využity v maticovém formátu (obr. 15, 16) jako například u modelu *Power matrix* od firmy Eclipse magnetics. Každý pól je obklopen póly různé polaroty. Kolem každého pólu tak vznikne intenzivní magnetické pole, které zajistí stejnou velikost upínací síly ve všech směrech. Jednotlivé póly jsou na desce umístěny jako na šachovnici s kladnou a zápornou polaritou (severní a jižní póly), což při jejich aktivovaném stavu umožňuje uzavírání indukčních čar v upínaném obrobku křížem. Tím je upínací síla mnohem vyšší než u systému paralelních pólů, kde se čáry uzavírají jen ze dvou stran, a je zcela symetrická a konstantní po celé ploše. To znamená, že lze provádět obrábění v podélném a příčném směru nebo v jejich kombinaci zcela stejným výkonem. Na rozdíl od tohoto je upínací síla paralelních pólů vyšší ve směru kolmém na póly a nižší při tlaku působícím ve směru pólů.



Obr. 15: Vypnutý stav

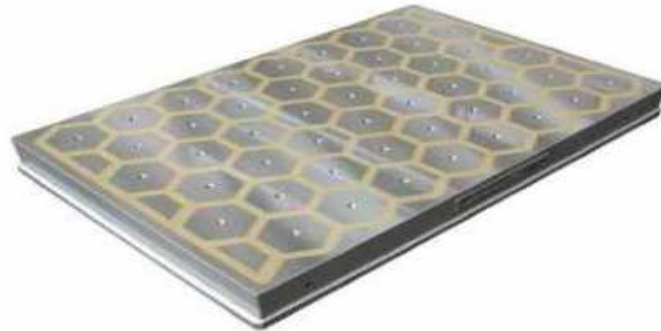


Obr. 16: Zapnutý stav

Usměrněné šíření magnetického pole těchto upínačů rovněž umožňuje použití velmi jednoduchých pólových nastavců z běžné konstrukční oceli, které je možno i tvarově upravovat pro specifická použití, jako referenční dorazy, při průchozím vrtání atp.

### 2.3.3 Hexagonálně uspořádané póly

Nový typ EPMU s hexagonálně uspořádanými póly (obr. 17), vyvinutý firmou SAV, si zachovává všechny výhody předchozí generace EPMU, jako je zvýšení obráběcích rychlostí, snadná obsluha, 100% aktivní upínací plocha, bezpečné upnutí i při výpadku elektrického proudu, póly oddělené mosazí a další. Výrobce díky hexagonálnímu uspořádání pólů udává však některé výhody, díky kterým tento systém předčí čtvercový systém pólů. Mezi ně můžeme brát např. velkou hustotu magnetických indukčních čar vytvářející lepší koncentraci magnetického toku či naprosto rovnoměrné rozložení upínacích sil - žádné mrtvé zóny.



Obr. 17: Hexagonální pólování

### 2.3.4 Zdroje pro elektropermanentní upínače

Pro EPMU jsou potřeba náročnější napájecí zdroje na rozdíl např. od zdrojů pro EMU, kde stačí obvykle obyčejný regulovatelný stejnosměrný zdroj.

Jelikož k namagnetování až k nasycení potřebují permanentní magnety (PM) ze vzácných zemin ve srovnání s tvrdými ferity přibližně dvou- až čtyřnásobnou intenzitu magnetického pole a magnety jsou syceny prakticky až na 100%, pokud není požadováno jinak, jsou na tak velké hodnoty potřeba speciální zdroje. Nejčastěji se používají různé velké kondenzátorové baterie, které se vybíjejí do magnetizačních cívek upínače. K jejich vybití dnes často slouží polovodičové prvky. Velikost přídržné síly se dá ovládat jak pomocí velikosti napětí, na které se nabíjí kondenzátory, tak počtem magnetizačních impulsů.

Pro elektropermanentní upínače jsou tedy nutné zdroje poskytující proudový impuls. Jak bylo uvedeno, vytvoření energie pro impuls o vysoké proudové špičce docílíme výbojem kondenzátoru. Platí základní vztah:

$$C \cdot U = I \cdot t \quad [F, V, A, s.]. \quad (5.)$$

Aritmetická střední hodnota nabíjení i vybíjení je  $\frac{1}{2} U$ . Pak energie nabitého kondenzátoru o kapacitě  $C$  je:

$$A = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad [J, F, V]. \quad (6.)$$

Tuto energii je nutno odevzdat do magnetizační cívky ve formě krátkodobého impulsu o čase  $t$ , čemuž odpovídá výkon  $P$  dle

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{C \cdot U^2}{t}, \quad \text{kde } t = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C} \quad (7.)$$

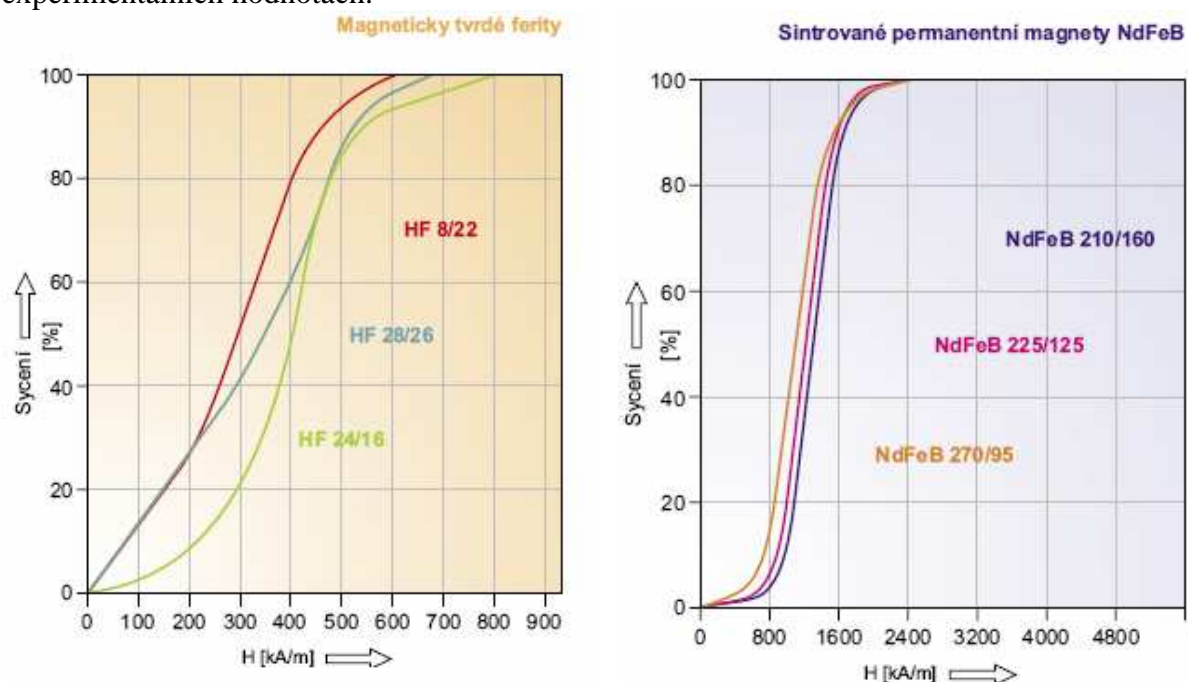


a pak

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{C \cdot U^2}{\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad [W, F, V, H, F]. \quad (8.)$$

Z rovnice (8.) je patrné, že výkon pulsu  $P$  je závislý na kapacitě kondenzátorové baterie, nabíjecím napětí a indukčnosti celého obvodu. Je tedy výhodné použít bezindukční kondenzátory.

Vhodná volba kapacity kondenzátorové baterie je důležitá pro zvolený magnetický materiál. Z diagramů (např. na obr. 18) lze určit intenzitu magnetického pole potřebnou k nasycení příslušného magnetického materiálu. Jako empirické pravidlo se často používá trojnásobné hodnoty koercivity  $H_c$ . Křivky vztahující se na jednotlivé skupiny materiálu a znázorňující intenzitu magnetického pole pro první namagnetování jsou založeny na experimentálních hodnotách.



Obr. 18: Potřebné intenzity magnetického pole pro úroveň sycení

### 3 Sortiment magnetických upínačů na trhu

Budeme-li se zajímat o přední evropské výrobce magnetických upínačů, najdeme jako nejvýznamnější na trhu především tyto firmy:

- Walker magnetics - pro ČR v zastoupení firmou Walker Pilana magnetics
- SAV - v zast. SAV Czech
- Technomagnete - v zast. Mag centrum
- SPD - v zast. CIESSETRADE
- Eclipse magnetics - v zast. SR TKB-KIPONS plus

Tyto společnosti nabízejí většinou sortiment všech tří druhů magnetických upínačů.

### 3.1 Sortiment elektromagnetických upínačů

Elektromagnetické upínací systémy jsou stále využívány v mnoha aplikacích i přes skutečnost, že jsou ve velké míře vytlačovány modernějšími EPMU.

Z výrobců uveďme např. *Walker magnetics* či *SAV*. Pro názornost si ukážeme model *Unigrip* od firmy *Walker* v praktické aplikaci, a to broušení (obr. 19). Upínač je napájen stejnosměrným napětím 110 V. Tímto napětím jsou napájeny téměř všechny konstrukční typy EMU. Najdeme však i upínače napájené stejnosměrným napětím 24 V, ale i 210 a 360 V. Konstrukce naprosté většiny EMU je z důvodu používání chladicí kapaliny při třískovém obrábění odolná proti vlhkosti, krytí je nejčastěji v provedení IP 65 (zařízení je prachotěsné, chráněné proti dotyku drátem a proti tryskající vodě).



Obr. 19: Model Unigrip v aplikaci s rovinnou bruskou

### 3.2 Sortiment magnetických upínačů s permanentními magnety

I přes skutečnost, že většina výrobců systémů pro magnetické upínání soustřeďuje svou pozornost na EPMU, existuje stále značný objem nabídky PMU, zejména pro jejich cenu, jednoduchost obsluhy a minimální provozní náklady.

Konstrukční provedení na první pohled vypadá shodně s EMU. Liší se ovšem v principu své funkce. Jak bylo dříve řečeno, neobsahují cívku, ale PM.

Na základě katalogové nabídky několika předních českých i světových výrobců budeme demonstrovat různá upínací řešení a několik typů konstrukcí EMU, ať již užívaných pro frézování, broušení na plocho či kulato, soustružení nebo pro elektroerozivní obrábění.

Nadnárodní firma *Walker magnetics*, která má svou výrobní pobočku i v ČR a která je držitelem několika patentů, je velkým průkopníkem v oblasti magnetického upínání.

Z katalogu firmy vybereme např.:

- Pro broušení na plocho

Model *Neomicro*, skládající se z ocelových a mosazných lamel a využívající sílu neodymových magnetů.



**Obr. 20: Model Neomicro**

- Pro broušení na kulato a soustružení

Model *Neostar* je upínač s tzv. radiálním pólováním, na rozdíl od předchozího modelu, který je s tzv. příčným pólováním. Kruhový upínač *Neostar* umožňuje vyvrtání středícího otvoru skrze upínač, což může být někdy využíváno pro přesnější upnutí obrobku.



**Obr. 21: Model Neostar**

### 3.3 Sortiment elektropermanentních upínačů

V současné době neustálého zvyšování cen energií je jednoznačnou konkurenční výhodou téměř nulová spotřeba elektrické energie. I proto se stále více uživatelů orientuje na elektropermanentní upínací systémy. Výrobci na tuto skutečnost samozřejmě reagují a nabídka v tomto odvětví je velmi pestrá. Na rozdíl od EMU a PMU probíhá v rámci konkurenčního boje mezi výrobci inovační proces konstrukčních řešení upínačů využívajících elektropermanentního systému značně rychleji.

Přes tuto skutečnost jsou i v této oblasti, zejména díky výborným užitným vlastnostem a funkčnosti často využívány klasické konstrukce, jejichž vnější provedení se podobá typům EMU a PMU. Jedná se o EPMU obdélníkového tvaru s příčně pólovanou upínací deskou (obr. 22) či o kruhový typ používaný pro různé druhy obrábění (obr. 23).



**Obr. 22: Příčně pólovaný EPMU firmy SAV**



**Obr. 23: Kruhový EPMU firmy SAV**

Postupně se však prosazují i nové, progresivní konstrukční řešení EPMU, jak bylo zmíněno v kap. 2.1.1, které zobrazíme na obr. 24 a obr. 25.





Obr. 24: Power matrix



Obr. 25: Super quad

## 4 Demagnetizace

Po sejmutí předmětu z upínacího zařízení v něm obvykle zůstává remanentní (zbytkový) magnetizmus. I když je úroveň remanence nízká a obrobek lze sejmut z upínače, je magnetická remanence v mnoha aplikacích na obtíž a je nutno ji odstranit. K tomuto účelu slouží demagnetizátory neboli odmagnetovače.

V podstatě se demagnetizace, tedy zbavení obrobku zbytkového magnetizmu, dělí do dvou kroků. V prvním kroku je třeba umožnit sejmutí obrobku z upínací plochy a ve druhém kroku je nutné zbavit obrobek zbylého remanentního magnetizmu (tzv. ho magneticky vyčistit).

V prvním kroku musí být prováděna demagnetizace přímo na pólové desce EPMU či EMU vždy před sejmutím obrobku a to impulsem proudu vhodné intenzity a opačné polaroty vzhledem k polaritě magnetizačního budičoho proudu. Tento způsob demagnetizace však většinou neumožňuje dokonalé odstranění zbytkového magnetizmu z upínaných předmětů, i když mnohé moderní EPMU jsou vybaveny mikroprocesorově řízenými demagnetizačními cykly pro kvalitní odmagnetování. Demagnetizaci nelze provádět na upínacích permanentních.

Demagnetizační proces se dále dělí na stejnosměrnou a střídavou metodu. Při stejnosměrné demagnetizaci jde v principu o jednorázové přepólování magnetického pole, kdy se obrátí smysl proudu do magnetizační cívky a velikost intenzity magnetického pole se sníží dle příslušné křivky  $B = f(H)$  upínaného materiálu. Tohoto principu jsme využili při konstrukci přepínacího demagnetizačního zařízení, jehož popis a funkce je rozebrána v kap. 7.

Pro dokonalé odstranění zbytkového magnetizmu se volí střídavá metoda demagnetizace, kdy se používají speciální střídavá odmagnetovací zařízení, jejichž hlavní částí je cívka napájená střídavým proudem.

- Zmagnetované předměty jsou odmagnetovány např. vkládáním do dutiny této cívky, což je tzv. tunelový typ demagnetizátoru. Tunelový typ (obr. 26) se často využívá pro automatický provoz demagnetizačního procesu, a to buď s využitím dopravníkového pásu anebo využitím vhodného sklonu samotného demagnetizátoru, kdy se menší

obrobky nechávají propadávat dutinou cívky, čímž se postupně snižuje hodnota jejich magnetické remanence.

- Cívka může být opatřena neuzavřeným magnetickým obvodem z transformátorových plechů, přes jehož nemagnetickou mezeru je odmagnetovávaný vzorek, nejčastěji ručně, posouván. Jedná se o tzv. deskový typ demagnetizátoru. Tento typ demagnetizátoru může být využíván obráceně, to znamená, že po povrchu zmagnetovaného předmětu se posouvá s demagnetizátorem v místě nemagnetické mezery. V tomto případě jsou demagnetizátory obvykle rozměrově, tvarově i hmotnostně přizpůsobeny požadavkům na ruční manipulaci a nazývají se ruční demagnetizátory.

Podstata střídavého demagnetizačního procesu u deskového i ručního demagnetizátoru je stejná a spočívá v tom, že odmagnetovávané předměty v blízkosti nemagnetické mezery v magnetickém obvodu demagnetizátoru jsou vystaveny účinkům střídavého magnetického pole, jehož amplituda magnetické indukce  $B_{\max}$  dosahuje minimálně hodnoty remanentní indukce  $B_r$  v odmagnetovávaném předmětu. Posunem zmagnetovaného předmětu přes nemagnetickou mezeru, nebo posunem demagnetizátoru po povrchu předmětu se magnetická indukce v předmětu postupně snižuje z hodnoty  $B_{\max}$  až k nule, čímž dojde k úplnému odmagnetování.



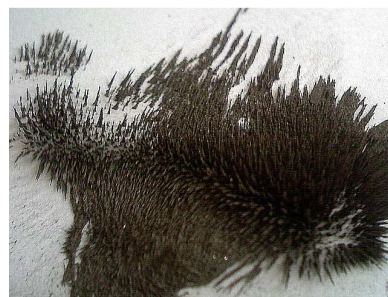
Obr. 26: Tunelové provedení od firmy Walker

Demagnetizace odmagnetovacími zařízeními, která pracují se střídavým magnetickým polem síťové frekvence, je snadná a účinná, avšak pouze u tenkých předmětů. Vlivem skin efektu střídavé magnetické pole proniká pouze do určité hloubky pod povrch. Tato skutečnost reprezentovaná hloubkou vniku  $\delta$  závisí nepřímo úměrně na permeabilitě a elektrické vodivosti předmětu a na frekvenci magnetického pole. Pro frekvenci 50 Hz dosahuje u běžné oceli řádově 0,1 až 1 mm. U silnostěnných předmětů nedojde za těchto okolností k odmagnetování vnitřních částí předmětů, magnetické pole dovnitř nepronikne. Hloubka vniku, která se zvětšuje s klesajícími frekvencemi, se určí dle vztahu

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}, \quad (9.)$$

kde  $\delta$  je hloubka vniku,  $\rho$  měrný odpor,  $\omega$  úhlový kmitočet a  $\mu$  je permeabilita.

Z těchto důvodů se magnetická pole pro demagnetizaci vytvářejí budícími poli o frekvenci  $f < 50$  Hz. Pro frekvenci kolem 10 Hz, kdy je velká hloubka vniku a kvalitní demagnetizace, jsou potřeba specifické zdroje, ovšem konečná remanentní magnetizace je po proběhnutí demagnetizačního děje cca  $B_r \leq 1$  mT. Zbytková hodnota se měří gaussmetrem či vizuálně, orientačně, pomocí Fe prachu (obr. 27).



Obr. 27: Znázornění magnetické remanence v obrobku pomocí železného prachu

## 5 Konstrukční a technologické aspekty návrhu magnetických upínačů

Nezbytným předpokladem pro účelný návrh a konstrukci upínače je přesná znalost požadavků zákazníka. Obecné požadavky na upínače jsou na základě zkušeností již známy, avšak mohou se vyskytnou požadavky nové, specifické, jež si vyžadají přizpůsobení či vylepšení stávající konstrukce. Mezi hlavní požadavky na magnetické upínače můžeme řadit:

- velká adheze po celé upínací ploše,
- příznivá pólová rozteč,
- malá spotřeba energie,
- mechanická stabilita,
- velká přesnost a odolnost povrchu upínací plochy,
- odolnost proti vlhku a korozi,
- rozměry upínací plochy,
- výška magnetického pole indukčních čar na pólovou deskou.

Požadavku velké adhezivní síly po celé ploše je možné dosáhnout co největší magnetickou indukci  $B$  ve vzduchové mezeře mezi obrobkem a upínací plochou, malým podílem nemagnetických spár na pólové desce a dále např. vhodným pólovým nástavcem, zajišťujícím intenzivní průchod indukčních čar obrobkem.

Platí, že k získání stejných velikostí adhezivních sil je u EMU s pólovou deskou vždy zapotřebí větší intenzity magnetického pole  $H$ , tzn. zvýšení počtu tzv. ampérvávitů  $NI$ , proti upínačům bez pólové desky v důsledku delších indukčních čar, většího magnetického odporu a dodatkové vzduchové mezery mezi pólovou deskou a tělesem upínače. Ověření výše uvedeného lze nalézt ve vztahu

$$\Phi \cdot R_{mz} = N \cdot I, \quad (10.)$$

kde  $\Phi$  [Wb] je indukční magnetický tok,  $R_{mz}$  [ $H^{-1}$ ] magnetický odpor železa a  $NI$  je počet tzv. ampérvávitů [A].

Požadavek příznivé pólové rozteče souvisí s tím, pro jaké tloušťky a velikosti obrobků je upínací systém určen. Pro malé rozměry a tloušťky obrobků je nutno zmenšovat pólovou rozteč, aby nedocházelo k magnetickému přesycení obrobků, a tím k poklesu upínací síly. Pomocí vhodného příslušenství lze snadno u upínače s podélným pólováním, jako je třeba elektromagnetický upínač označený EMU<sub>4</sub> v kap. 7, zmenšit pólovou rozteč a přizpůsobit tak zařízení pro upnutí drobnějších dílců.

Požadavek malé spotřeby energie se týká především EMU, neboť ostatní dva typy jsou energeticky nenáročné. Krom finanční stránky je tato podmínka zdůvodněna také nutností zamezení nadměrného oteplení systému způsobené Jouleovými ztrátami, vznikajícími průchodem proudu vinutím. Oteplením dochází k nežádoucím rozměrovým změnám a následně se zhoršuje přesnost obrábění. Oteplením stoupá ohmický odpor vinutí a při konstantní napájecím napětí systému dochází k následně poklesu upínací síly.

S dovoleným oteplením je spojena otázka návrhu jmenovitých provozních parametrů zařízení. Upínač by, je-li správně navržen, měl mít pracovní bod nastaven v blízkosti ohybu (tzv. koleně) své charakteristiky  $B = f(H)$ , neboť za touto oblastí se již s narůstající intenzitou pole  $H$  magnetická indukce  $B$  zvětšuje pouze minimálně a další zvýšení intenzity neboli

zvýšení proudu způsobí pouze nadměrné oteplení cívky upínače. Z provozního hlediska je dovolené max. oteplení EMU 70°C. Měřením (kap. 7) jsme ověřili návrh několika dostupných EMU a posoudili správnost umístění jejich pracovního bodu.

Z požadavku na mechanickou stabilitu vyplývá nutnost používat materiál s odstraněným vnitřním pnutím. Je třeba omezit všechna pnutí v konstrukci systému související s jeho montáží na obráběcí stroj. Důležité je pevné uchycení pólové desky na tělese upínače, zabránění vzniku dutin a nepodepřených míst pod pólovou deskou.

Materiál magnetického obvodu, zejména samotné pólové desky musí mít dobré mechanické vlastnosti, aby za provozu nedocházelo k jeho nadměrnému opotřebením. Materiály s dobrými mechanickými vlastnostmi obvykle mají horší vlastnosti magnetické a naopak.

Aby byl splněn požadavek malé energetické náročnosti a velkých adhezních sil upínače, je nutno k výrobě magnetického obvodu použít materiál s velkou relativní permeabilitou  $\mu_r$  a obvod tvarově řešit tak, aby magnetický odpor železa  $R_{mz}$  byl minimální, což jsme viděli na příkladu několika tvarově odlišných pólových desek EMU v kap. 2.1.1. Správnou volbou materiálu a geometrie magnetického obvodu lze tedy značně ovlivnit  $R_{mz}$ , a tím dosáhnout vysokých hodnot upínací síly  $F$ . Protože upínaný obrobek je součástí magnetického obvodu a přispívá k celkovému odporu  $R_{mz}$ , závisí adhezní síla též na jeho magnetických vlastnostech, tvaru, velikosti a tloušťce.

Z důvodů opotřebením a koroze adhezní plochy musí být zachována možnost dodatečných úprav, občasného přebroušení upínací plochy, aniž by docházelo ke zhoršení magnetických vlastností a spolehlivosti upínače. Tímto přebroušováním se odstraňují např. rýhy, které vznikají při manipulaci těžších obrobků. Během životnosti upínače se obrousí až několik mm jeho konstrukční výšky. S tímto faktem je třeba při návrhu EMU počítat, zejména důležité pro návrh hloubky drážek, do nichž bude uloženo vinutí u upínačů bez pólové desky.

Někdy při obrábění používané chladicí prostředky působí korozními účinky zejména na adhezní ploše, kde působí jako elektrolyt v místech kontaktů materiálů s různým elektrochemickým potenciálem. Odolnost proti vlhkosti a korozi systému závisí zejména na správné volbě materiálu pro vytvoření nemagnetických dělicích spár. Dobře se osvědčují nekovové syntetické materiály např. na bázi epoxidových pryskyřic, které nekorodují a spáry jsou dostatečně těsné proti vnikání vlhkosti do prostoru budící cívky.

Navlhání budících cívek se dá významně omezit jejich dokonalou impregnací, popřípadě jejich zalitím zalévací izolační hmotou po umístění do tělesa upínače. Tím se také zvýší odvod tepla z cívek, což příznivě ovlivní životnost jejich izolace. Ideální je magnetický upínač provést jako zcela hermeticky uzavřený celek, kdy nedojde k pronikání vlhkosti při jeho provozu ani ke zpětnému nasávání vlhkosti při chladnutí upínače do prostoru budících cívek. Zmenšení poruchovosti izolací budících cívek lze též dosáhnout volbou co nejnižších napájecích napětí.

Rozměry magnetických upínačů jsou samozřejmě omezeny, jak z důvodů výrobně technických, tak z důvodů mechanické stability. Jak víme, velikost PMU je omezena velikostí přepínací síly. Ostatní typy lze stavět do větších rozměrů. Z důvodů mechanické stability se někdy velké upínací plochy sestavují kombinací několika upínačů menších rozměrů, mezi nimiž jsou ponechány dilatační spáry. Při velkých nárocích na přesnost obrábění a u upínačů

větších rozměrů musí být upínače upevněny ke stroji též uprostřed adhezní plochy tak, aby se nebránilo tepelným dilatacím (především u elektromagnetického typu) a vyloučilo se pokřivení adhezní plochy.

Výška magnetického pole vystupujícího nad upínací plochu musí být volena s ohledem na druh a zejména tloušťku upínaných předmětů. Snažíme se vyhnout pronikání magnetického pole nad obrobek např. do obráběcích nástrojů, což by mohlo negativně ovlivnit výslednou kvalitu a přesnost obrábění, zmenšit životnost nástrojů a také znesnadnit čištění obráběcího zařízení.

## 5.1 Faktory ovlivňující velikost upínací síly

Důležitými aspekty pro celkový názor na konkrétní aplikaci magnetického upínače jsou kromě technologických vlastností uvedených výše také vlastnosti upínaného obrobku, způsob kontaktu upínače s obrobkem a některé další vlivy, jako je např. teplota. Důležitými faktory ovlivňujícími velikost upínací síly, se kterými musíme počítat jsou:

### *Druh materiálu*

Jak materiál obrobku, tak samotného tělesa upínače má svůj vliv na velikost upínací síly. Nejvhodnějšími materiály pro magnetické upínání se jeví magneticky měkké druhy ocelí, jako např. ocel třídy 11 (ČSN 11 373). Tyto materiály vedou tok magnetických indukčních čar velmi snadno. Slitinové, magneticky tvrdé materiály, jako např. ocel třídy 19 (ČSN 19 463), však obsahují nemagnetické prvky, které zabraňují prostupu indukčních čar a dochází tak k redukci upínací síly. V případě litiny dochází k poklesu adhezní síly až na 50% síly oceli třídy 11, jak lze vidět i z experimentálního ověření v kap. 7. Z tohoto poznatku lze vyčíst, jak velkou roli materiál obrobku vlastně hraje.

### *Tloušťka materiálu*

Dalším důležitým faktorem je tloušťka obrobku, resp. materiálu. Tloušťka může omezit celkový počet indukčních čar procházejících od severního k jižnímu pólu. Lze uvést příklad, kdy při menší tloušťce materiálu než je šířka pólu magnetu část indukčních čar, které jsou k dispozici, protéká mimo obrobek. Dochází k rozptylu a nadbytečné indukční čáry nebudou přispívat k upínací síle.

### *Vzduchová mezera*

Vzduchová mezera jako součást elektrického obvodu značně ovlivňuje velikost indukce  $B$  nárůstem reluktance  $R_m$ . Magnetické indukční čáry obtížně procházejí vzduchem. Nemá-li obrobek žádný přímý kontakt s póly magnetu, tj. mezi magnetem a obrobkem existuje určitá nemagnetická (vzduchová) mezera, počet magnetických siločar je omezen a upínací síla bude v závislosti na tomto redukována. Vzduchová mezera je především způsobena drsností povrchu danou pravidelnými stopami zanechanými nástroji po obrábění. Magneticky neaktivní vrstvy, nečistoty, rez, barva a okuje působí rovněž stejným způsobem jako vzduchová mezera. Experimentálním posouzením vlivu vzduchové mezery jsme demonstrovali v kap. 7 fakt výrazné redukce upínací síly narůstající vzduchovou mezerou.

### *Kontaktní plocha*

Za účelem dosažení maximální adhezní síly magnetu by měl obrobek pokrývat co možná nejvíce severních a jižních pólů. Jestliže obrobek není natolik velký, aby dostatečně pokryl severní a jižní pól, je třeba pokusit se o to, aby obrobek pokryl přibližně stejné části každého pólu. Obsazenost upínací plochy nám určuje, jakým způsobem budou siločáry

procházet obrobkem. Magnetické doplňky upínačů, jako jsou různé pólové nástavce, tak mohou pomoci kompletně uzavřít okruh mezi severním a jižním pólem skrz obrobek, snížit rozptylové toky, zajistit „nasátí“ indukčních čar do obrobku. I proto jsme v našem měření (kap. 7) zvolili metodiku takovou, že okolí měřicího přístroje bylo zakryto pomocnými ocelovými deskami. Nastane-li případ, kdy obrobek pokrývá pouze jeden pól, spoléháme se vlastně na vzduchovou mezeru, na vzduch, který má přenášet indukční čáry k druhému pólu.

### *Teplota*

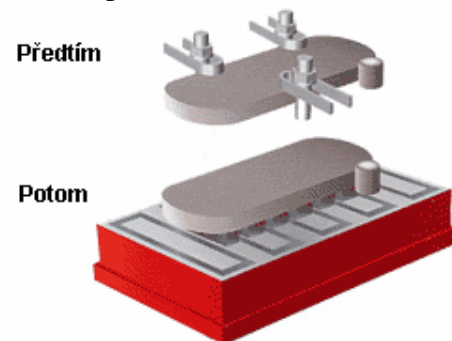
Teplota ovlivňuje nejenom fyzické rozměry (uplatnění dilatačních jevů) materiálu, ale díky ní může také docházet k poškozování izolace. Navíc bychom neměli zapomínat na magnetické vlastnosti látek. Permanentní magnety mají takzvaný negativní teplotní koeficient, což je příčinou zhoršení jejich magnetických vlastností s narůstající teplotou.

## 6 Technicko-ekonomické zhodnocení současných upínačů

Srovnáme-li klasické mechanické a magnetické upínací systémy pro obrábění feromagnetických obrobků nalezneme zřejmé rozdíly, které hovoří ve prospěch systémů magnetických.

Na rozdíl od klasických mechanických upínacích systémů není potřeba žádných nástrojů, jako jsou různé upínky (obr. 28). Obrobek je držen magnetickou silou, upínací síla je rovnoměrně rozdělena po celé kontaktní ploše, přičemž obrobek je plně přístupný a je ho tedy možné obrábět z pěti stran bez jakéhokoliv přenastavování, což příznivě ovlivní produktivitu práce. Mimo to způsobují tradiční upínací metody strukturální pnutí, které může následně vést k deformaci obrobku a ztrátě přípustné tolerance.

Výhoda magnetického systému je i v úspoře pracovního času, stroj je lépe využit a může pracovat efektivněji a rychleji, všechny pracovní kroky, tj. pojezdy nástrojů, nejsou ničím omezeny. Lze také obrábět více jednotlivých obrobků zároveň. Díky jednoduchému procesu upnutí, odmagnetování a následnému sejmutí obrobku u EPMU lze zařízení snadno zautomatizovat a případně zařadit do automatizované výrobní linky.



**Obr. 28: Odpadnutí potřeby upínek**

Potlačením vibrací magnetickým upnutím se také prodlužuje životnost nástrojů a náradí při současném zlepšení přesnosti a kvality obráběného povrchu.

Pokud budeme porovnávat různé systémy magnetického upínání mezi sebou, pak jedním z faktorů bude spotřeba energie. V dnešní době zdražování energií se nejeden uživatel bude rozhodovat podle této vlastnosti vybíraného upínacího systému. Bereme-li v úvahu, že PMU upínač má spotřebu energie nulovou, EMU spotřebu, oproti ostatním typům, značnou a EPMU minimální, lze vyvodit, mezi kterými systémy se zákazník, uvažující energetickou spotřebu výrobního procesu, bude rozhodovat. Ceny energeticky úsporných systémů jsou možná o něco vyšší, ale vyšší pořizovací cena je kompenzována energetickými úsporami vyvolanými nulovou nebo minimální spotřebou elektrické energie. Záleží samozřejmě také na konkrétním provozu a aplikaci upínacího zařízení. Obecně však lze říci, že investice do



nákladnějších nízkoenergetických upínacích systémů je výhodná a lze to vidět i na množství moderních aplikací těchto zařízení.

Magnetické upínací systémy můžeme porovnávat také dle poskytované adhezční síly. Pro upnutí menší dílců se bude více hodit PMU, který je naopak nevhodný pro obrobky velkých rozměrů. Moderní elektropermanentní systémy jsou vyráběny v širokých mezích adhezční síly a v souvislosti s jejich vývojem lze očekávat nadále vzrůstající trend jejich upínací síly.

Pro porovnání magnetických upínacích systémů nám může posloužit následující tabulka.

**Tabulka 1: Porovnání magnetických upínacích systémů**

| Magnetické upínací systémy |                            |                                    |                              |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|
|                            | Elektromagnetický          | Permanentní                        | Elektropermanentní           |
| Výhody                     | Kvalitní upínací síla      | Nulová spotřeba energie            | Minimální spotřeba energie   |
|                            | Velké rozměry              | Jednoduchá obsluha                 | Stálá bezpečnost             |
|                            | Automatizace               | Stálá velikost síly                | Perfektní upnutí             |
|                            | Elektronicky ovládaná síla |                                    | Kvalitní odmagnetování dílce |
|                            |                            |                                    | Minimální ohřev upínače      |
|                            |                            |                                    | Automatizace                 |
|                            |                            |                                    | Moderní technologie          |
| Nevýhody                   | Zahřívání upínače          | Omezení velikostí síly             | Vyšší pořizovací náklady     |
|                            | Odpadnutí při poruše       | Jen pro menší dílce                | Složitější napájecí zdroje   |
|                            | Náklady za el. energii     | Zbytkový magnetismus               |                              |
|                            |                            |                                    |                              |
| Cena*                      | Cca 20 tis. Kč             | 9 tis. – 40 tis. Kč, dle provedení | -                            |

\* ceny aktuální k únoru 2009, dle nabídky firmy SAV.

## 7 Experimentální posouzení různých konstrukcí EMU a způsobu demagnetizace

### Cíle experimentu

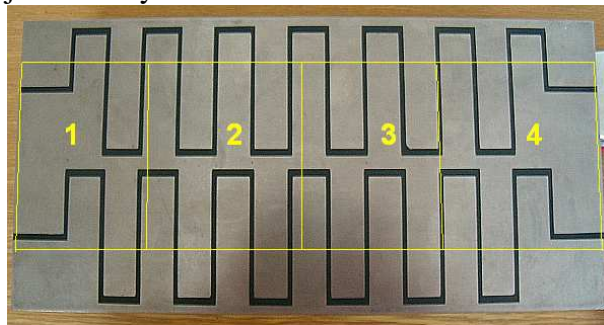
V následujících kapitolách se seznámíme s výsledky experimentů provedených na několika druzích EMU. Veškeré hodnoty byly získány na podporu předchozích teoretických úvah. Kladli jsme si zejména otázky:

- Jak morfologie pólové desky ovlivní velikost upínací síly samotného EMU?
- Jak ovlivní zvětšení vzduchové mezery mezi pólovou deskou a obrobkem velikost upínací síly?

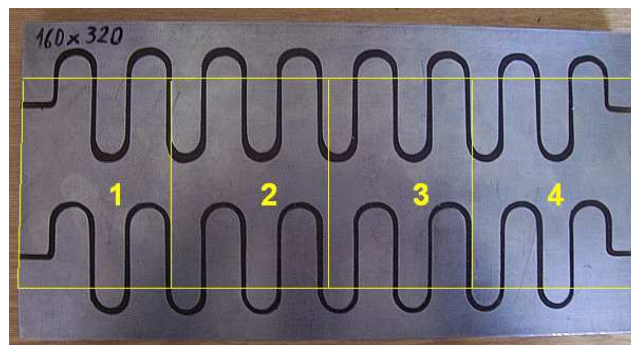
- Jsou jednotlivé dostupné konstrukce EMU správně navrženy z hlediska položení jejich pracovního bodu na křivce  $B = f(H)$ ?
- Jaká bude úroveň zbytkové (remanentní) magnetizace v obrobku sejmutého z EMU po stejnosměrné demagnetizaci a jaký vliv bude mít následná střídavá demagnetizace vzorků z různých materiálů?

### *Přístroje a pomůcky*

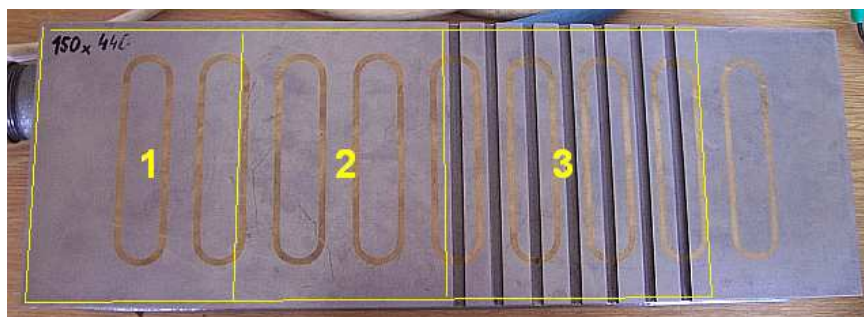
Vlastní experimenty byly prováděny se dvěma typy EMU (rozměr 160x320 mm a 150x440 mm) s cívkou uloženou ve feromagnetické vaně, na kterou se umístili postupně tři různé pólové desky. Na obr. 29 až 32 jsou vyobrazeny jednotlivé pólové desky, označme si je EMU<sub>1</sub> až EMU<sub>3</sub>. Na obr. 23 je EMU konstrukce „Super chuck“, který jsme si uvedli v předcházejícím textu na obr. 6 a který si nyní označíme EMU<sub>4</sub> (rozměr 200x400 mm). Upínač EMU<sub>1</sub> byl v předcházejícím textu vyobrazen na obr. 4 c, reálně je ovšem v provedení s obdélníkovými meandry. Upínač EMU<sub>2</sub> byl v teoretické části zobrazen na obr. 5, opět však s mírně odlišnou morfologií pólové desky. Nejstarší z námi dostupných upínačů a to EMU<sub>3</sub>, principiálně odpovídá upínači z obr. 4 a. Na jednotlivých deskách jsou názorně vyznačeny měřené pozice, na které se umísťovalo měřidlo adhezních sil při současném zakrytí okolního prostoru pólové desky, jak bude vysvětleno dále.



Obr. 29: EMU<sub>1</sub>

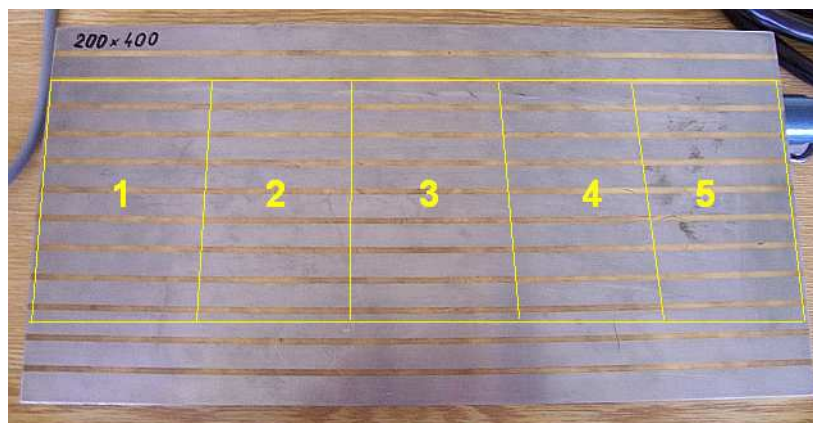


Obr. 30: EMU<sub>2</sub>



Obr. 31: EMU<sub>3</sub> s vyfrézovanými drážkami



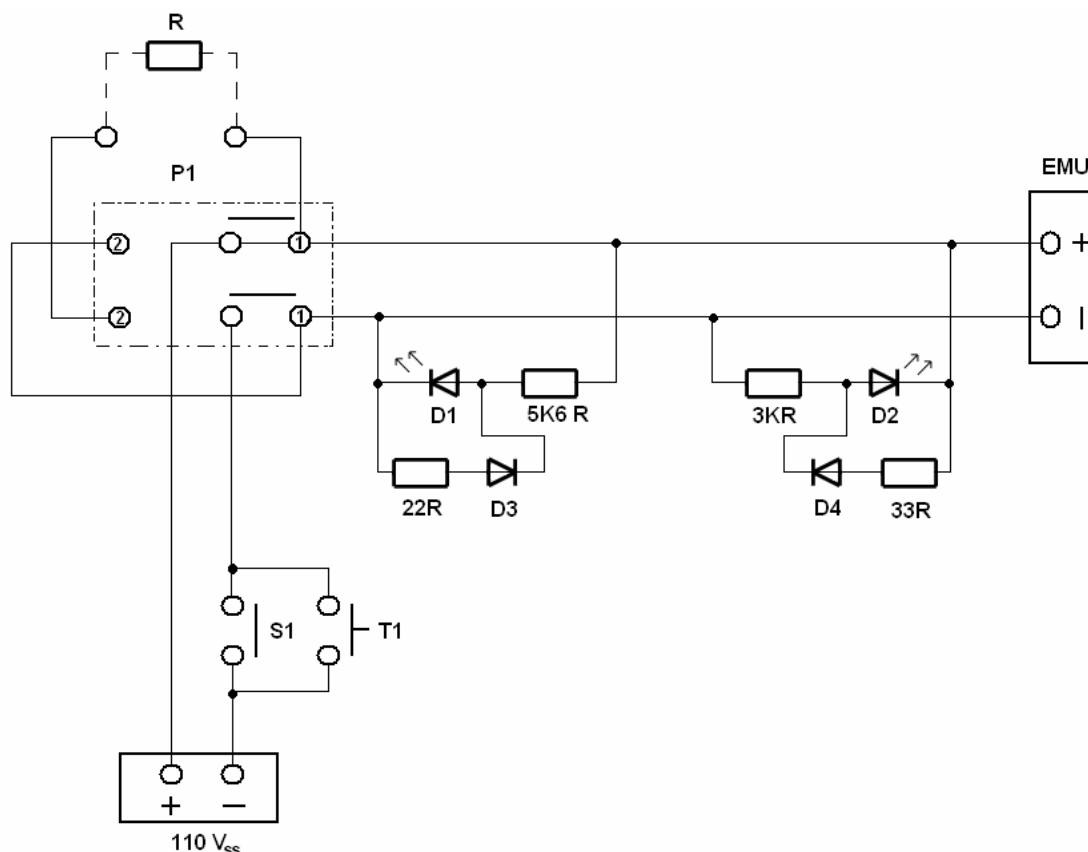


Obr. 32: EMU<sub>4</sub>

Kromě samotných upínačů a pólových desek bylo pro experiment nezbytné zařízení umožňující změnu polarity stejnosměrného proudu do cívky. Vyvinuli jsme proto kompaktní přepínací zařízení se signalizací směru proudu, viz obr. 33, jeho schéma na obr. 34. Doplnění zařízení signalizačními diodami dává možnost znázornění zpětného proudového pulsu vzniklého indukčností cívky, který nastane při vypnutí upínače. Toto zařízení slouží i k případné stejnosměrné demagnetizaci obrobků. Mechanická přepínací část uspořádání vycházela principiálně ze staršího mechanického přepínače, který jsme měli k dispozici.



Obr. 33: Přepínací zařízení



Obr. 34: Schéma přepínacího zařízení

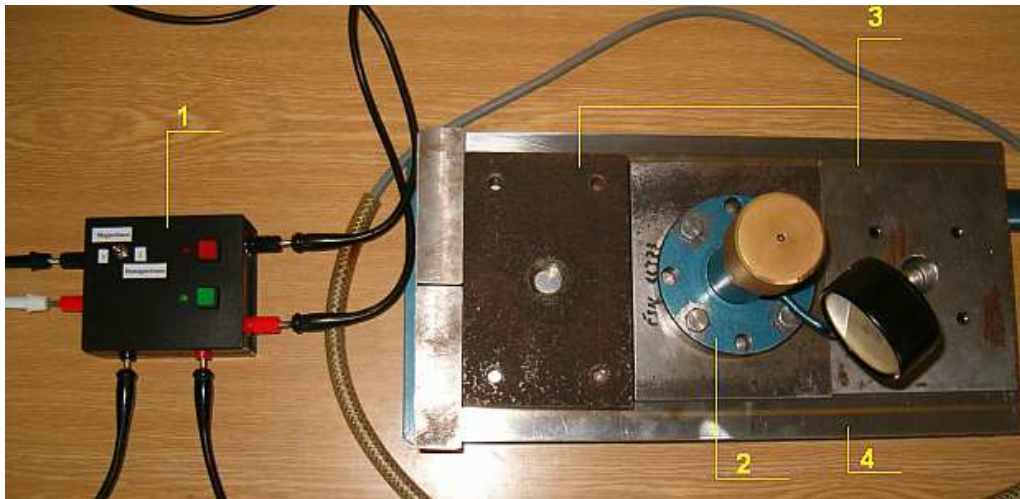
Přepínací zařízení pracovalo následovně: pro upnutí je přepínač P1 v poloze 1 a stiskem spínače S1 je obrobek upnut, světelná dioda D1 signalizuje zapnutý stav. Pro demagnetizaci rozepneme spínač S1 a následně přepneme přepínač P1 do polohy 2. Mžikovým stiskem tlačítka T1 přivedeme opačný proudový impuls do cívky upínače. Světelná dioda D2 opět signalizuje správnou funkci zařízení. Diody D3 a D4 jsou zapojeny jako ochranné pro signalizační diody. Do demagnetizační větve lze připojit odpor R pro zmenšení demagnetizačního proudu, kvůli požadavkům stejnosměrné demagnetizace. Hodnoty odporů byly určeny pro jmenovité napětí použitých upínačů a to 110 V<sub>ss</sub>. Pro jiná napájecí napětí se dají hodnoty součástek upravit.

Pro zjišťování hodnot upínacích sil bylo použito měřidlo adhezí síly vyvinuté na katedře elektrotechnologie ČVUT FEL, které je na obr. 35. Princip měřidla je založen na Pascalovu zákonu, kde v pracovní komoře s olejem jsou dva písty, jeden s menším a druhý s větším průměrem, které tvoří hydraulický převodník. Přímým měřením tlaku v pracovní komoře lze jednoduchým přepočtem vyjádřit síly potřebné na odtržení vzorku z upínací desky. Pomocí měřidla lze pohodlně a rychle „utrhnout“ velmi velké upínací síly, které se standardně pohybují v řádech tisíců N. Maximální rozsah síly s ohledem na rozsah použitého manometru je 12,5 kN.



Obr. 35: Měřidlo adheze

Celkový pohled na měřicí pracoviště pro zjišťování velikosti adhezí síly je na obr. 36. Skládá se z přepínacího zařízení (1), měřidla adheze (2), zakrývacích ocelových desek (3) a samotného EMU (4).



Obr. 36: Měřicí pracoviště pro měření adhezní síly

### Metodika měření

Pro správné měření upínací síly bylo nutné zvolit vhodnou metodiku. Zvolený postup vychází ze zavedených postupů výrobců upínacích zařízení. Pro srovnatelnost výsledků zjišťovaných různými autory musí být celková upínací plocha zakryta feromagnetickým materiálem, čímž odstraníme závislost adhezní síly na velikosti odtrhovaného předmětu. Tedy obrobek je při úplném obsazení pólové desky rozdělen na několik samostatných dílů a odtrhuje se pouze jeden díl, což sníží velikost celkové adhezní síly ve srovnání s odtrhem kompaktního obrobku, který by zakrýval celou desku. Kdybychom se snažili odtrhávat obrobek velikosti celé upínací plochy, potřebovali bychom jednak příliš velkou sílu, zadruhé by hrozilo mechanické poškození upínače. Na druhou stranu pokud bychom se snažili odtrhnout pouze samotné měřicí zařízení o výrazně menší ploše než upínací deska, změřené výsledky by byly značně zkreslené. Důvodem by bylo neobjektivní zachycení rozptylových toků kolem samotného měřidla. Pólovou desku jsme tedy kolem měřidla adheze zakryli ocelovými deskami, viz obr. 37.



Obr. 37: Zakrytí adhezního měřidla ocelovými pláty

Měření adhezní síly následně probíhalo tak, že na pólové desce byla určena měřená místa a v těchto místech byla zjištěna, pomocí měřidla přišroubovaném na ocelovém vzorku (ocel ČSN 11 373, rozměr 150x125 mm, drsnost povrchu  $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ ), velikost adhezní síly v plném nabuzení cívky upínače, tj.  $U = 110 V_{ss}$ . Zjistili jsme takto rozložení síly na různých místech pólové desky, které lze vidět z příložených grafů. Stejně měření bylo provedeno znovu s ocelovým slitinovým vzorkem (ocel ČSN 19 463) stejných rozměrů a obrobení styčné plochy.

Pro zjištění závislosti adhezní síly na velikosti vzduchové mezery jsme, při současném zakrytí okolí měřidla, vkládali mezi měřidlo a desku plastové fólie o tloušťce 0,1 mm, které simulovali stupeň kvality obrobení a drsnost předmětu. Toto jsme prováděli v místě pólových desek, kde byla naměřena nejvyšší adhezní síla. Pro porovnání vlivu materiálu upínaného obrobku na velikost přídržné síly jsme i tento experiment v celém rozsahu provedli s dvěma různými druhy ocelí (ČSN 11 373 a ČSN 19 436).

Pro správnou interpretaci výsledných hodnot jsme sílu  $F$  přepočítali na tzv. hustotu adhezní síly  $f$  podle vztahu

$$f = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}; \text{N}, \text{m}^2], \quad (11.)$$

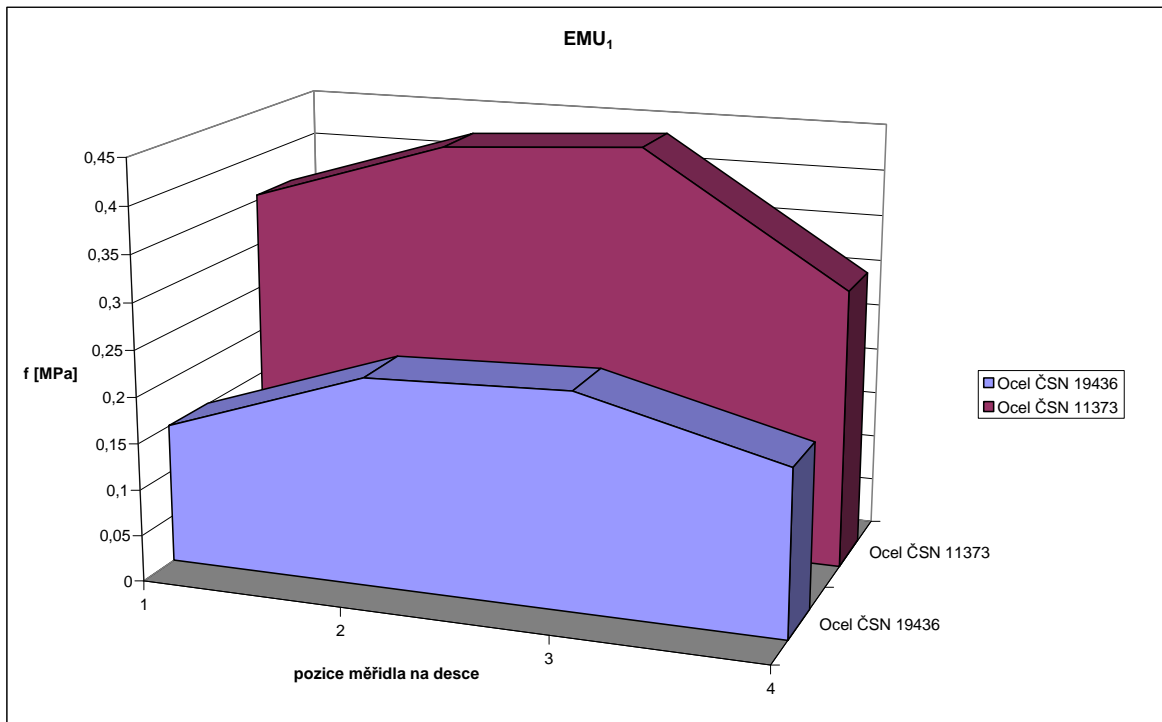
kde  $F$  je maximální adhezní síla zjištěná při odtržení zkušební vzorku [N] a  $S$  je plocha zkušební vzorku, v našem případě cca  $0,018 \text{ m}^2$ .

Pro ověření správnosti návrhu upínačů z hlediska položení jejich pracovního bodu byla měřena adhezní síla v závislosti na budícím proudu, který byl zvyšován od nulové hodnoty do hodnoty mírně nad jmenovitou. V každém proudovém kroku, který byl zvolen, byla měřicím zařízením určena velikost síly nutné na odtržení zařízení v určeném místě pólové desky. Tato síla byla následně přepočítána na magnetickou indukci dle rov. (3.) a graficky znázorněna závislostí  $B = f(I)$ , kde proud  $I$  je obrazem intenzity magnetického pole  $H$ .

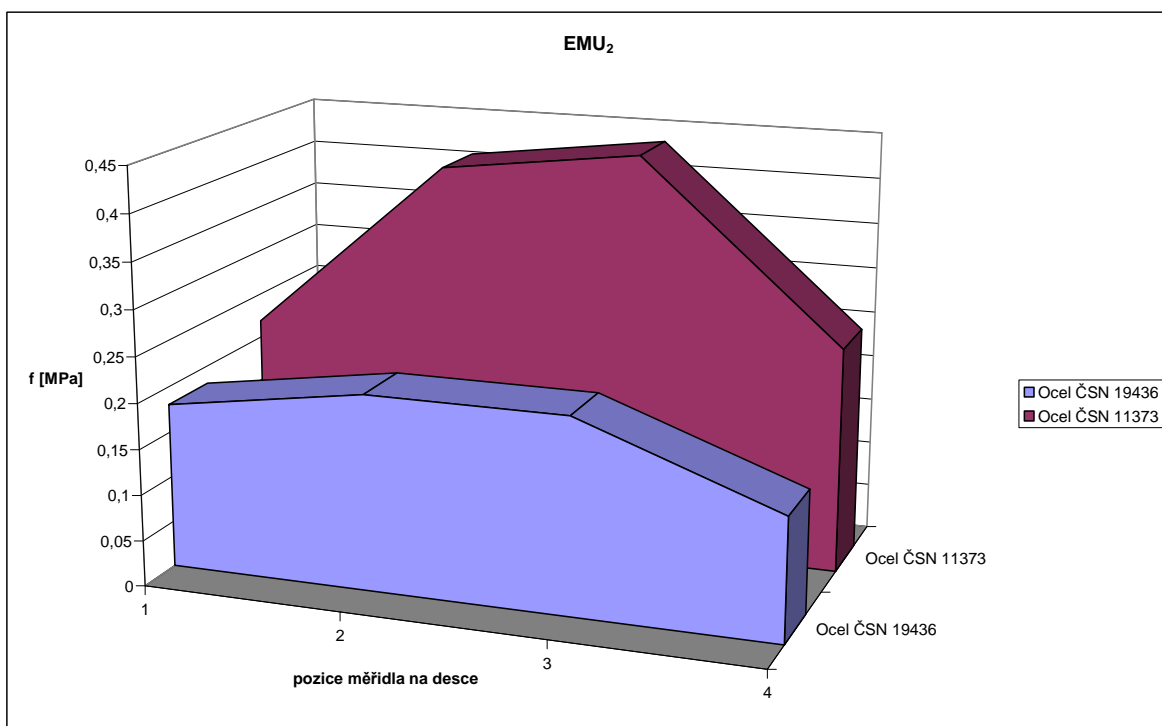
Při experimentálním ověřování účinků demagnetizace jsme vzorky z oceli třídy 11 a třídy 19 nejdříve upnuli, následně kvůli sejmutí z upínací plochy stejnosměrně demagnetovali přímo na upínači přepnutím polarity proudu do budící cívky a po sejmutí z upínače změřili pomocí gaussmetru Lakeshore 410 úroveň jejich magnetické remanence. Jelikož ve vzorku z oceli třídy 19 zůstávala po sejmutí z upínače poměrně vysoká hodnota remanence  $B_r$  (cca 15 mT), následovala střídavá demagnetizace na speciálním demagnetizátoru, po níž byla opět změřena úroveň zbytkové magnetizace na vybraných místech vzorku.

#### *Naměřené hodnoty a grafy*

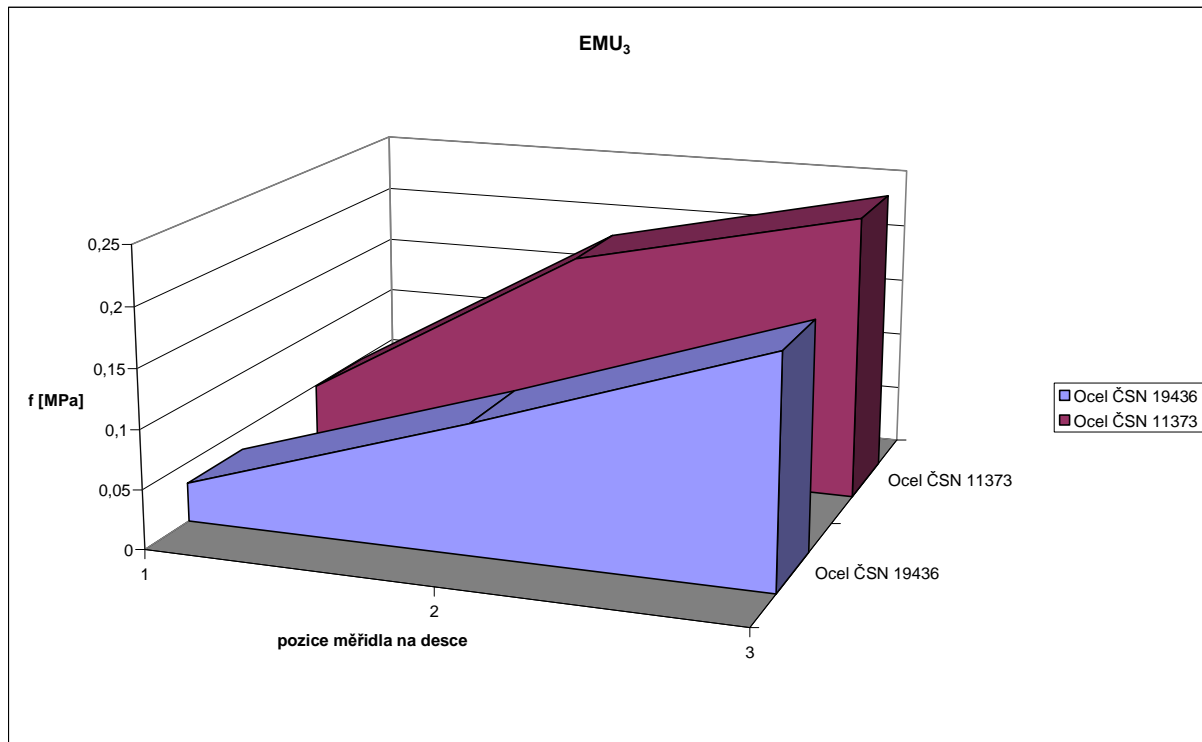
Experimentálně stanovené hodnoty hustoty adhezní síly jsou prezentovány ve formě grafů, udávajících rozložení hustoty adhezní síly v závislosti na umístění měřidla na pólové desce, obr. 38 až 41. Současně lze porovnat jak se projeví druh materiálu obrobku na síle upnutí, obr. 42 až obr. 43.



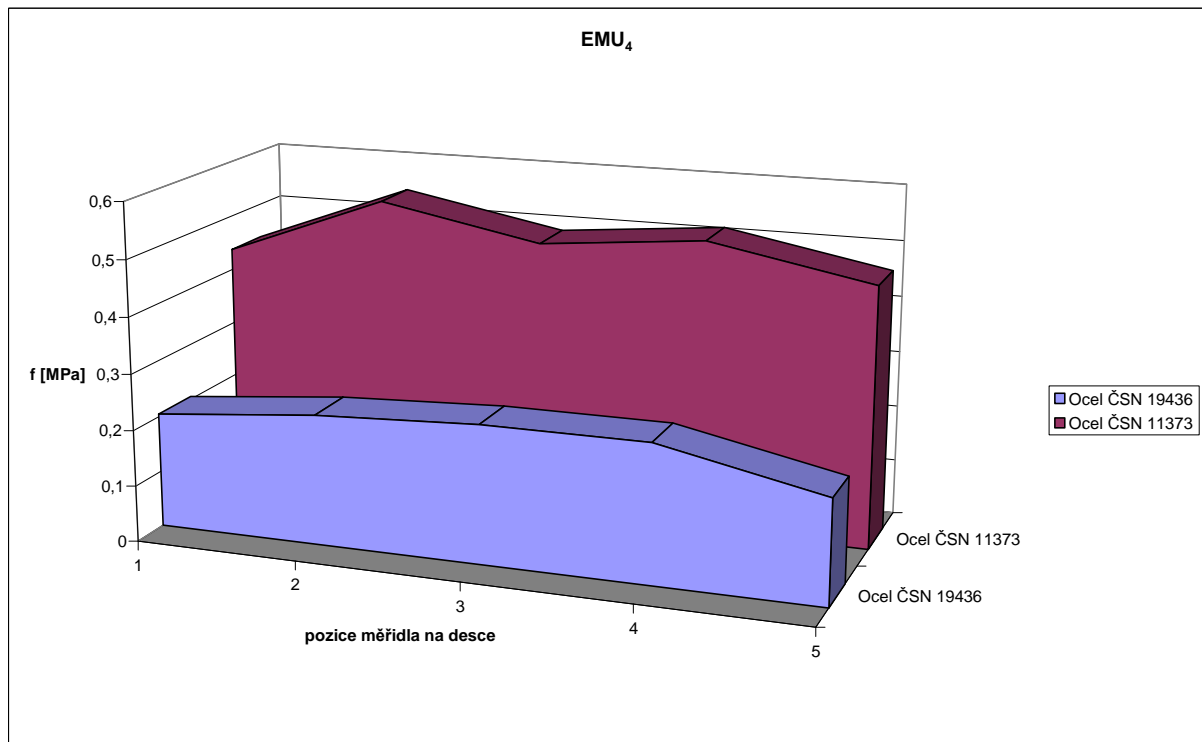
Obr. 38: Rozložení hustoty adhezní síly pro EMU<sub>1</sub>



Obr. 39: Rozložení hustoty adhezní síly pro EMU<sub>2</sub>

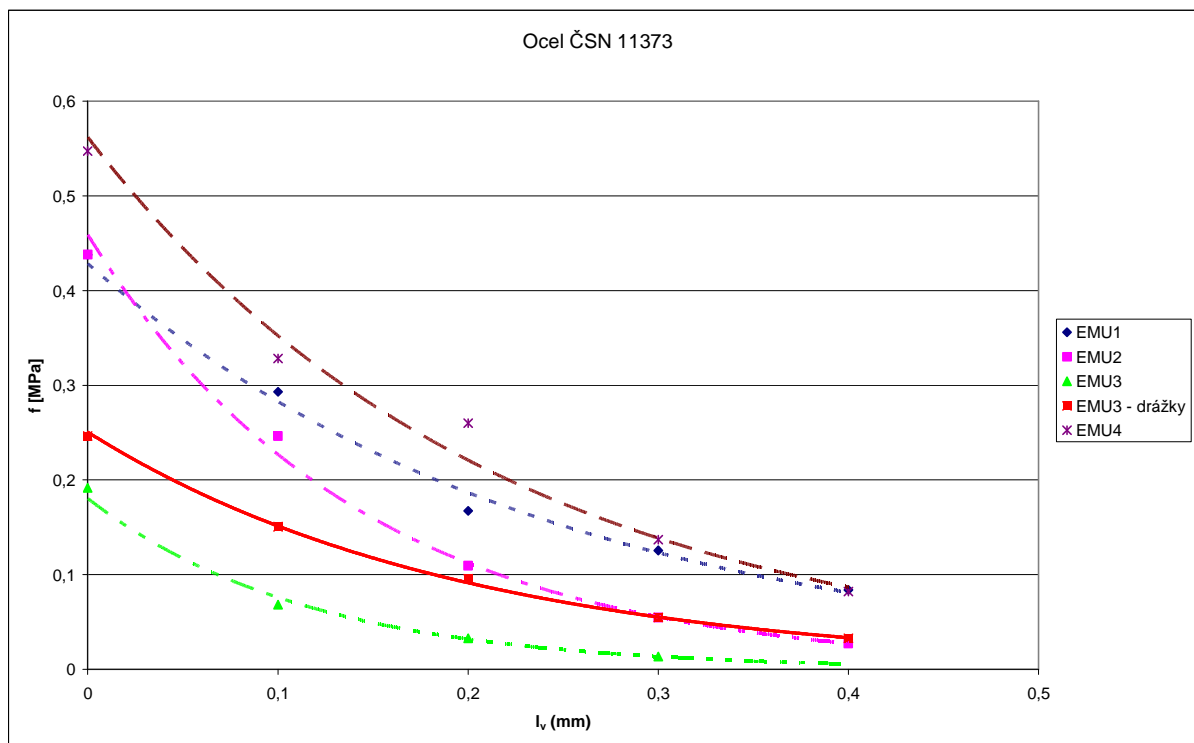


**Obr. 40: Rozložení hustoty adhezní síly pro EMU<sub>3</sub>**

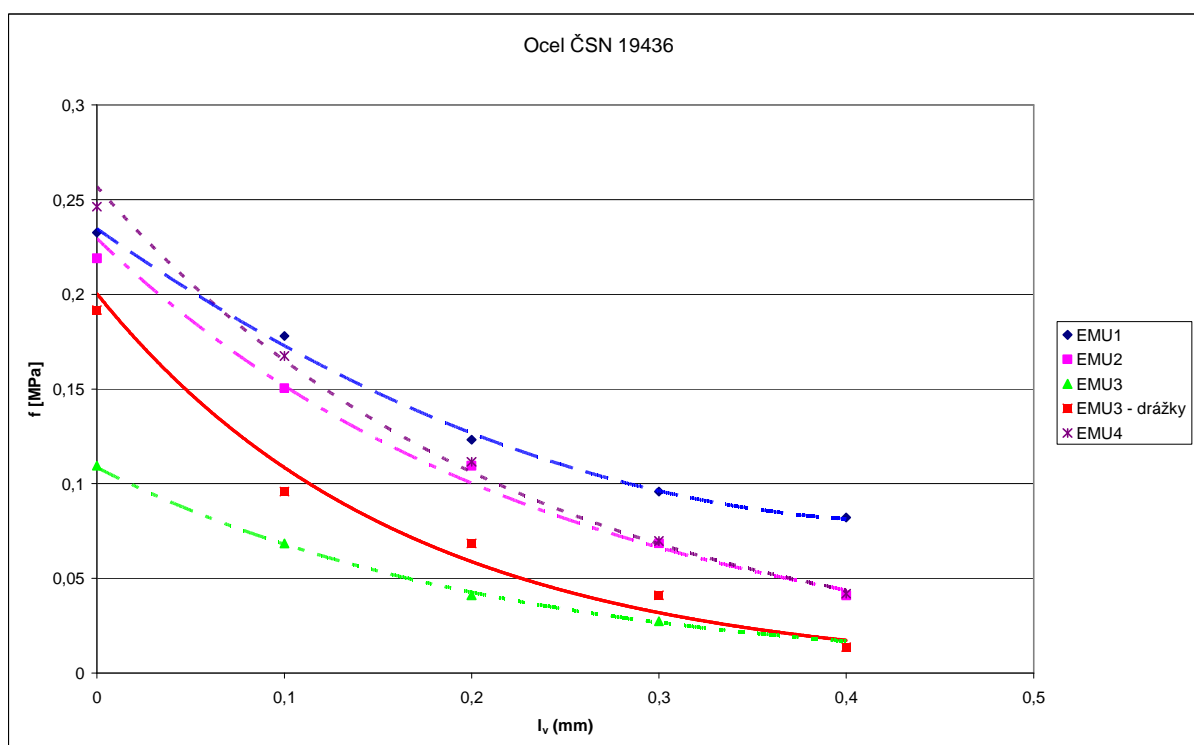


**Obr. 41: Rozložení hustoty adhezní síly pro EMU<sub>4</sub>**





Obr. 42: Vliv velikosti vzduchové mezery na velikost hustoty adhezní síly pro vzorek oceli třídy 11



Obr. 43: Vliv velikosti vzduchové mezery na velikost hustoty adhezní síly pro vzorek z oceli třídy 19

V průběhu těchto experimentů jsme dospěli k několika zjištěním. Jedním z nich bylo vyvrácení předpokladu, že při stejnosměrné demagnetizaci bude výhodné zařadit do série s cívkou upínače odpor, a tím snížit velikost proudu v demagnetizačním směru. Teoreticky by přesně vyladěná velikost odporu dokázala při stejnosměrné demagnetizaci snížit remanentní

magnetismus v obrobku až na nulovou hodnotu, jenže toto ladění odporu by si vyžádalo příliš mnoho času a je příliš závislé na druhu upínaného materiálu (každý druh má jinou magnetizační charakteristiku), takže by se v praxi vůbec časově nevyplatilo.

Jako užitečné pro stejnosměrnou demagnetizaci se ukázalo použití rychlého proudového impulsu opačné polaroty, který ovšem vyžaduje určitou praxi v ovládání přepínacího zařízení (jedná se o značně intuitivní přístup). Ovšem i při dobře zvládnutém demagnetizačním pulsu, sloužícím primárně k sejmutí obrobku z pólové desky, musí následovat další demagnetizace obrobku na střídavém demagnetizátoru pro dokonalejší odstranění remanentního magnetismu.

Z grafického znázornění rozložení hustoty adhezní síly na povrchu různých pólových desek a z grafů reprezentujících vliv vzduchové mezery na velikost hustoty adhezní síly lze odvodit následující závěry:

- U oceli třídy 11 je dosahováno téměř dvojnásobné hustoty adhezní síly oproti oceli slitinové, třídy 19, ve všech měřených pozicích na pólové desce. Toto je způsobeno lepším průnikem magnetických indukčních čar do měřicího vzorku z měkké oceli. Potvrzuje se nám, že obrobky z magneticky měkčího materiálu jsou z hlediska kvalitnějšího upnutí více vhodné než obrobky z materiálů tvrdších. Nicméně realita je taková, že musí být umožněno upínat i tyto materiály (broušení nástrojů atd.).
- V prostorovém rozložení naměřených hodnot je patrný pokles hustoty adhezní síly směrem ke krajům pólové desky. Tento zjištěný negativní jev se podařilo minimalizovat u specifické konstrukce upínače pod označením EMU<sub>4</sub>, kde bylo dosaženo vcelku rovnoměrného rozložení magnetického pole.
- Při upínání magneticky tvrdšího vzorku bylo pozorováno rovnoměrnějšího rozložení adhezních sil (od kraje ke kraji desky). Může to být vysvětleno např. sníženou schopností průniku magnetických indukčních čar do materiálu obrobku, a tím tedy jakýmsi vyrovnáním upínacího účinku po celé měřené upínací ploše, tzn. v místech, kde by síla měla být vyšší, jako u oceli měkké, nepronikne do vzorku z oceli tvrdé dostatek magnetických siločar a adhezní síla se nezvýší.
- Na vzorku upínače EMU<sub>3</sub> jsme si experimentálně ověřili nárůst hustoty adhezní síly v oblasti s vyfrézovanými drážkami. Tato úprava se příznivě projevila v nárůstu adhezní síly a v zlepšení „čisticí“ schopnosti upínače. Tuto schopnost lze využít při upínání obrobku, kdy pohybem obrobků mírně do stran lze zachytit magnetické nečistoty v drážkách pólové desky.
- Byl ověřen teoretický předpoklad o závislosti hustoty adhezní síly na velikosti vzduchové mezery  $l_v$ . Tuto závislost lze vyjádřit pomocí vztahu (12.) [4], neboť platí

$$l_v = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{\sqrt{f}} - \frac{l_z}{2 \cdot \mu_r}, \quad (12.)$$

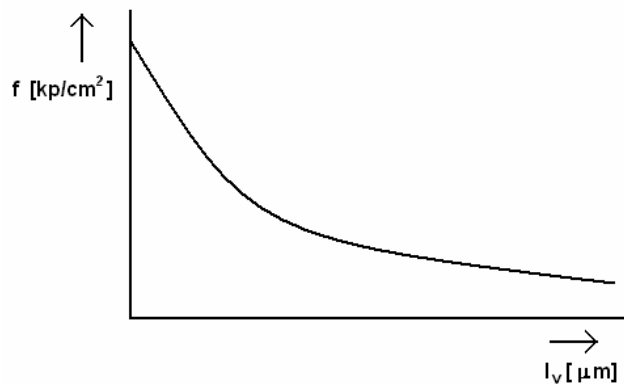
kde  $N$  je počet závitů cívky,  $I$  budící proud cívky,  $l_z$  tloušťka obrobku a  $f$  hustota adhezní síly.

Vztah (13.) po úpravě vede na vztah vyjadřující plošnou hustotu adhezní síly

$$f = \left( \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l_v + \frac{l_z}{2 \cdot \mu_r}} \right)^2 \quad [\text{kp/cm}^2; \text{H/m, A, m}]. \quad (13.)$$

Grafická reprezentace této rovnice je na obr. 44.

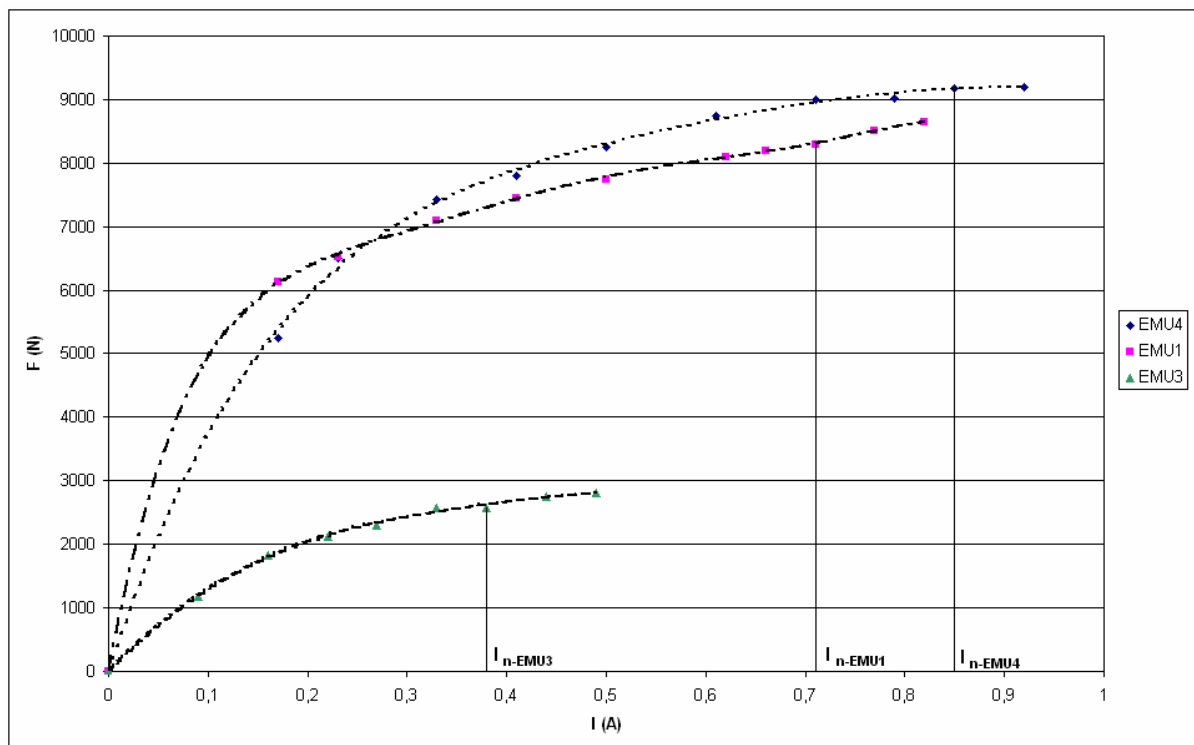




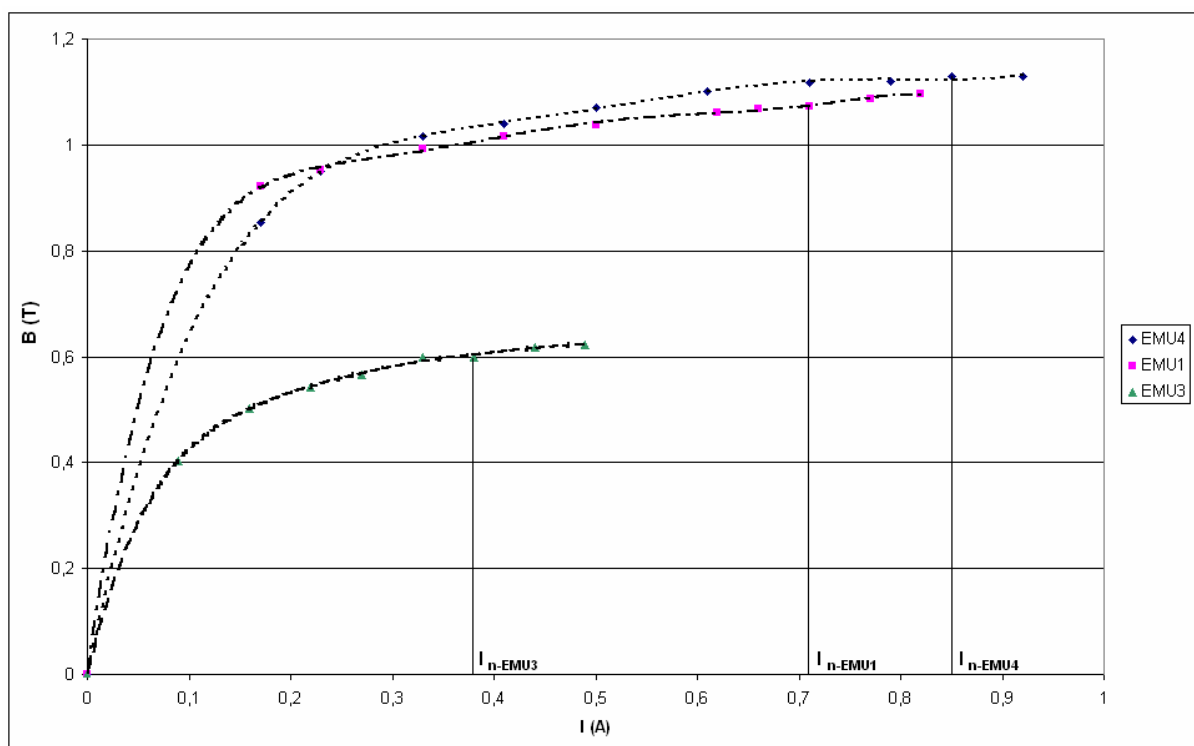
**Obr. 44: Teoretický průběh hustoty adhezní síly se zvětšující se vzduchovou mezerou**

- Z měření je patrné, že křivky hustoty adhezní síly mají předpokládaný klesající průběh. Již zvětšení vzduchové mezery o 1 mm způsobí v podstatě u všech vzorků upínačů pokles hustoty adhezní síly téměř o polovinu. Tato měření nám umožňují názorně zjistit, jak ovlivní kvalitu upnutí stav povrchů pólové desky i obrobku (drsnot, zakřivení, znečištění). Čím více se upínaný povrch bude lišit od hladkého, tím více se bude snižovat velikost hustoty adhezní síly. Je tedy žádoucí udržovat adhezní povrch upínače hladký a čistý občasným přebrušováním.

Sledováním závislosti adhezní síly  $F$  na úrovni proudu  $I$  (obr. 45) případně  $B = f(I)$  (obr. 46) můžeme vidět, že pracovní bod upínače pod označením EMU<sub>4</sub> by mohl být posunut lehce směrem k menším proudům. Od hodnoty proudu cca 0,6 A se velikost síly  $F$  ani velikost indukce  $B$  výrazně nezvyšuje. Bylo by proto možné provozovat upínač s ohledem na oteplení vinutí, i třeba na spotřebu elektrické energie při provozu, při o něco menším provozním proudu než je jmenovitých 0,85 A. Toho by se dalo dosáhnout vhodnou úpravou budící cívky upínače (zvětšit odpor cívky). Stávající řešení má spotřebu cca 94 W. Při zachování stejné budící cívky upínače a snížené hodnotě proudu 0,6 A, odpovídající snížení napájecího napětí přibližně na 80 V<sub>ss</sub>, by spotřeba činila 48 W. Při zachování stejných funkčních parametrů by se jednalo o úsporu energie o cca 50%. U konstrukce upínače EMU<sub>1</sub> lze říci, že v závislosti na nárůstu síly či indukce je pracovní bod navržen správně. To samé můžeme konstatovat i o nejstarším upínači EMU<sub>3</sub>, u kterého bylo měření provedeno v místě s vyfrézovanými drážkami.



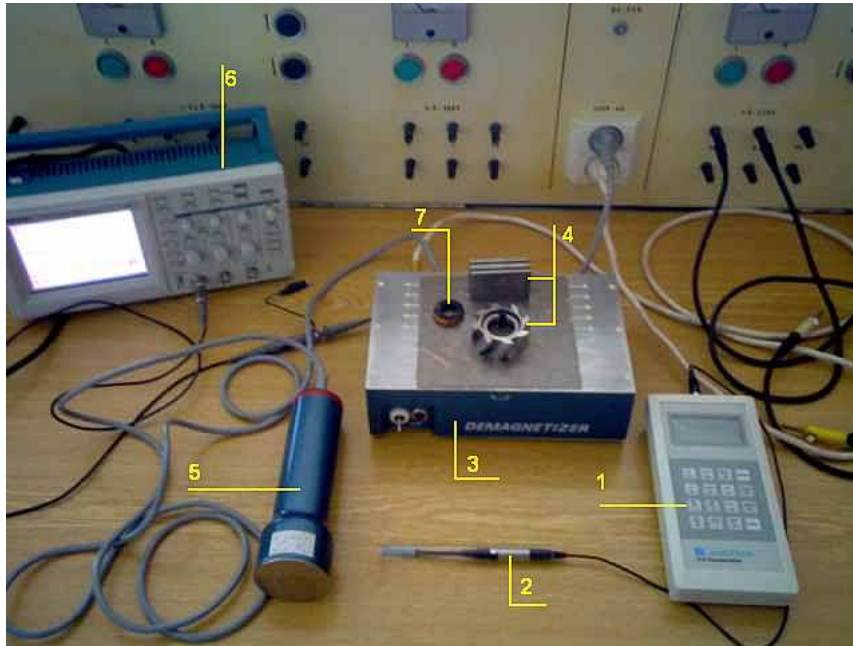
Obr. 45: Charakteristika  $F = f(I)$  pro různé druhy EMU



Obr. 46: Charakteristika  $B = f(I)$  pro různé druhy EMU

### Demagnetizace

Na obr. 47 vidíme celkový pohled na pracoviště a zařízení pro střídavou demagnetizaci vzorků. Skládá se z gaussmetru Lakeshore 410 (1) s Hallovoú sondou (2), demagnetizátoru deskového typu (3), vzorků (4), ručního demagnetizátoru (5) a osciloskopu (6) se zobrazovací sondou (7).

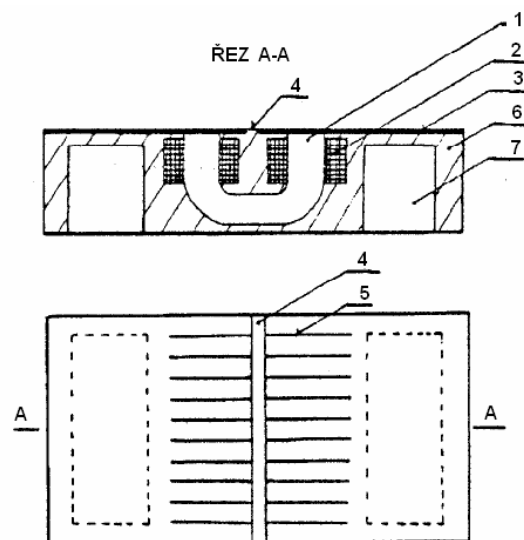


Obr. 47: Pohled na pracoviště pro střídavou demagnetizace

Pro účely střídavé demagnetizace byl použit demagnetizátor deskového typu (patent č. 277661), který díky své konstrukci odstraňuje nedostatky stávajících konstrukcí odmagnetovacího zařízení deskového typu, jako jsou zejména velká pracnost při výrobě magnetického obvodu, velká celková hmotnost a robustnost konstrukce, velké ztráty energie v magnetickém obvodu a velká spotřeba kovů.

Odmagnetovací zařízení (obr. 48) je deskového typu. Sestává z magnetického obvodu (1) s budicími cívkami (2), uzavřeného pólovou deskou (3) přerušenou nemagnetickou mezerou (4). V pólové desce (3) jsou symetricky na obě strany od nemagnetické mezery (4) vytvořeny prořezy (5). Celá sestava je zalita v bloku (6) z pevného izolantu.

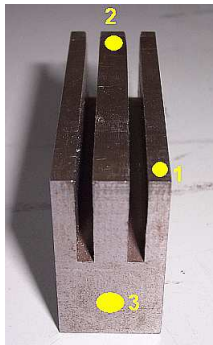
Výhodou tohoto patentovaného demagnetizačního zařízení je, že jeho magnetický obvod vytváří příznivý průběh magnetického pole (z hlediska frekvence i intenzity) v okolí nemagnetické mezery, čímž je zajištěna spolehlivá demagnetizace přiložených předmětů. Oproti původnímu magnetickému obvodu odmagnetovacího zařízení skládaného z jednotlivých transformátorových plechů má magnetický obvod z "C" jader lepší magnetické vlastnosti, je výrobně jednodušší a umožňuje snadnou a rychlou montáž. Hmotnost magnetického obvodu je několikrát nižší než u ostatních typů odmagnetovacího zařízení. Vyloučením kovového pouzdra a jeho nahrazením zalitím systému odmagnetovacího zařízení do plastu společně se sníženou hmotností magnetického obvodu zajistí, že i celková hmotnost zařízení je několikrát nižší oproti stávajícím odmagnetovacím zařízením.



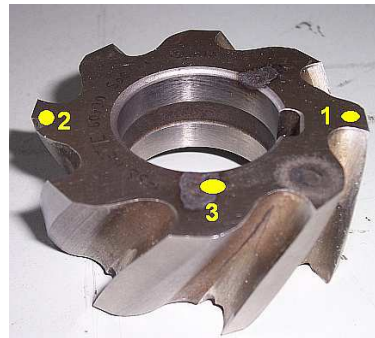
Obr. 48: Schéma deskového demagnetizátoru

Pro ověřování kvality demagnetizace byly zvoleny vzorky dvou druhů oceli (oceli třídy 11 a též oceli nástrojové, blíže neurčeného složení). Na obr. 49 a 50 vidíme vzorky s vyznačenými měřeními body. Jak jsme uvedli dříve, podmínky pro střídavou demagnetizaci jsou: snížená frekvence magnetického pole kvůli skin efektu a minimálně stejná úroveň amplitudy magnetického pole demagnetizátoru s velikostí  $B_r$  demagnetovaného vzorku. Oba požadavky splňuje námi použitý deskový demagnetizátor. Možnosti střídavé demagnetizace na tomto zařízení jsou dvojí, zaprvé elektrické snižování amplitudy magnetického pole snižováním buzení zařízení při statické poloze demagnetovaného vzorku, a zadruhé mechanický posun vzorku přes plochu demagnetizátoru, kdy směrem od středu ke krajům demagnetizátoru se amplituda pole, díky konstrukci demagnetizátoru, snižuje od maximální hodnoty do nulové.

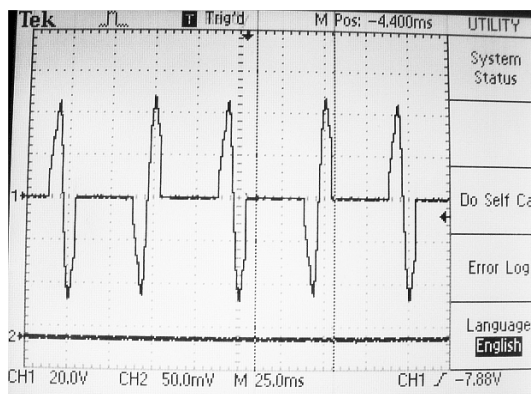
Vzorky jsme vystavili pro sejmutí z upínače nejdříve stejnosměrné demagnetizací přímo na EMU a změřili úroveň remanence gaussmetrem. Následně jsme provedli střídavou demagnetizaci na deskovém demagnetizátoru, a to zprvu pomocí varianty elektrického snižování amplitudy magnetického pole. Zde se snížením napájecího napětí demagnetizátoru regulovala amplituda magnetického pole od maximální hodnoty do nulové, jak je vidět z osciloskopických grafů na obr. 51. Výsledkem bylo téměř dokonalé magnetické vyčištění vzorků.



Obr. 49: Vzorek z oceli třídy 11



Obr. 50: Vzorek z nástrojové slitinové oceli



Obr. 51: Snižování intenzity magnetického pole demagnetizátorem

Druhou variantou střídavé demagnetizace byl tedy mechanický posun vzorků. Tento postup vyžadoval určitou praxi a zručnost. Bylo provedeno několik opakování s různým počtem přejezdů přes demagnetizátor, ale výsledné magnetické vyčištění nedosáhlo kvalit první metody jak dokládá tabulka 2, i přestože výsledné hodnoty remanence dosáhly velmi uspokojivých hodnot (pod 1 mT).

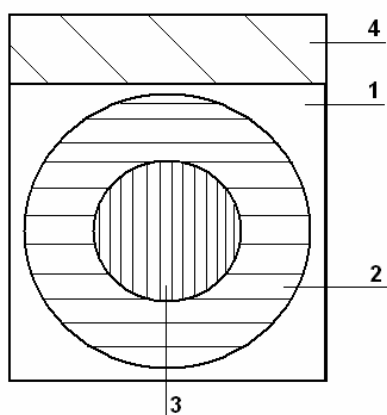
**Tabulka 2: Hodnoty magnetické remanence**

| Magneticky měkká ocel |                          |             |            |             | Magneticky tvrdá nástrojová ocel |        |                          |             |            |             |            |            |            |            |            |
|-----------------------|--------------------------|-------------|------------|-------------|----------------------------------|--------|--------------------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pozice                | Po sejmutí<br>$B_r$ (mT) | 1. varianta |            | 2. varianta |                                  | Pozice | Po sejmutí<br>$B_r$ (mT) | 1. varianta |            | 2. varianta |            |            |            |            |            |
|                       |                          | $B_r$ (mT)  | $B_r$ (mT) | 3 přejezdy  |                                  |        |                          | 6 přejezdů  |            | $B_r$ (mT)  | $B_r$ (mT) | 3 přejezdy |            | 6 přejezdů |            |
|                       |                          |             |            | $B_r$ (mT)  | $B_r$ (mT)                       |        |                          | $B_r$ (mT)  | $B_r$ (mT) |             |            | $B_r$ (mT) | $B_r$ (mT) | $B_r$ (mT) | $B_r$ (mT) |
| 1                     | 0,33                     | 0,09        | 0,14       | 0,15        | 1                                | 13,1   | 0,06                     | 0,74        | 0,32       |             |            |            |            |            |            |
| 2                     | 0,32                     | 0,08        | 0,08       | 0,1         | 2                                | 10,5   | 0,03                     | 0,19        | 0,28       |             |            |            |            |            |            |
| 3                     | 0,36                     | 0,025       | 0,16       | 0,08        | 3                                | 7,9    | 0,025                    | 0,85        | 0,69       |             |            |            |            |            |            |

Z naměřených dat (tabulka 2) lze vidět, že v magneticky měkké oceli třídy 11 zůstává po stejnosměrné demagnetizaci na upínači pouze malá remanence  $B_r$ , oproti slitinové oceli třídy 19. Jak jsme uvedli, za kvalitní demagnetizaci lze považovat hodnoty  $B_r \leq 1$  mT, tedy jak první varianta elektrická, tak i druhá varianta mechanická poskytují dostatečnou kvalitu magnetického vyčištění obrobku.

## 8 Návrh a ověření funkčního vzorku elektropermanentního upínače

Požadavkem bylo navrhnout vzorek elektropermanentního upínače a ověřit jeho funkčnost. Zvolili jsme konstrukci, kdy je použit jeden PM válcového tvaru zmagetovaný ve směru své výšky, kolem něhož se nachází cívka a který se pomocí proudového impulsu magnetuje či demagnetuje. Zmíněnou technologii používají i zavedení výrobci upínacích zařízení, častěji dnes zdokonalenou o použití více magnetů současně, kdy se cívkou ovládá jeden z magnetů a využívá se následného přesměrování magnetického obvodu. Jelikož nám ovšem šlo o pouhé ověření principiální funkce EPMU, zvolili jsme základní model a to jeden PM obklopený cívkou a instalovaný do magnetického obvodu z feromagnetického materiálu, viz schéma vzorku na obr. 52 a reálné provedení na obr. 53. Magnetický obvod vzorku se skládal z feromagnetických pólových nástavců (58x58 mm) a z feromagnetického propojovacího tělesa, vše z oceli třídy 11.



**Obr. 52: Schéma vzorku**

(1 – feromagnetický pólový nástavec, 2 – cívka, 3 – PM, 4 – feromagnetické těleso)



**Obr. 53: Reálné provedení vzorku**

I když se v praxi pro elektropermanentní upínače používají především silné neodymové magnety, pro naše potřeby a možnosti jsme vzorek, kromě použití neodymového PM z materiálu N38, sestavili i s použitím výrazně slabšího, feritového magnetu z materiálu F30. K porovnání vlastností obou druhů PM nám poslouží tabulka 3.

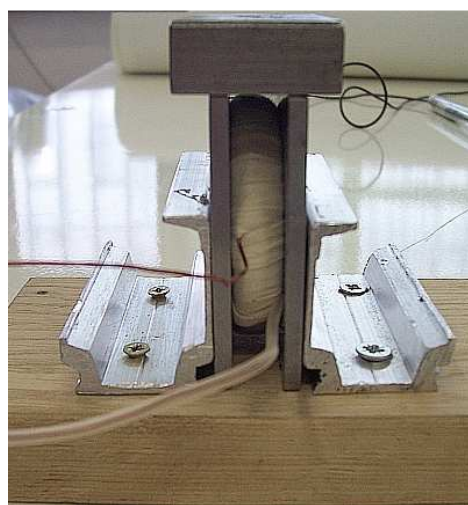
**Tabulka 3: Vlastnosti použitých PM**

| Magnet                              | Neodym          | Ferit          |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|
| Materiál                            | N38             | F30            |
| Průměr [mm]                         | 29              | 28             |
| Výška [mm]                          | 10              | 10             |
| Remanence $B_r$                     | 1,23 – 1,30 [T] | 370 – 400 [mT] |
| Koercivita $H_c$ [kA/m]             | $\geq 859$      | 175 - 210      |
| Vnitřní koercivita $H_{cJ}$ [kA/m]  | $\geq 955$      | 180 – 220      |
| Hustota energie $(BH)_{max}$ [kJ/m] | 286 - 318       | 26 - 30        |

\* katalogové hodnoty  $B_r$  jsou udávány pro zcela uzavřený magnetický obvod.

Jelikož hrozilo, že by se vzorek upínače se skládanou konstrukcí magnetického obvodu při úspěšné demagnetizaci PM proudovým impulsem rozpadl, bylo nutné vytvořit stahovací konstrukci z nemagnetického materiálu. Stahovací konstrukce (obr. 54) byla vytvořena ze dřevěné základny, hliníkových částí a bronzových šroubů, tedy z materiálů neovlivňujících magnetický obvod vzorku.

Budící cívku vzorku upínače jsme z konstrukčních důvodů zvolili stejnou jak pro feritový, tak pro neodymový PM. Vzhledem k rozměrům vzorku a s ohledem na požadovanou časovou konstantu nárůstu proudu, jak bude vysvětleno dále, jsme navinuli cívku o cca 145 závitů. Cívka je samonosná, izolována bavlněnou tkanicí.



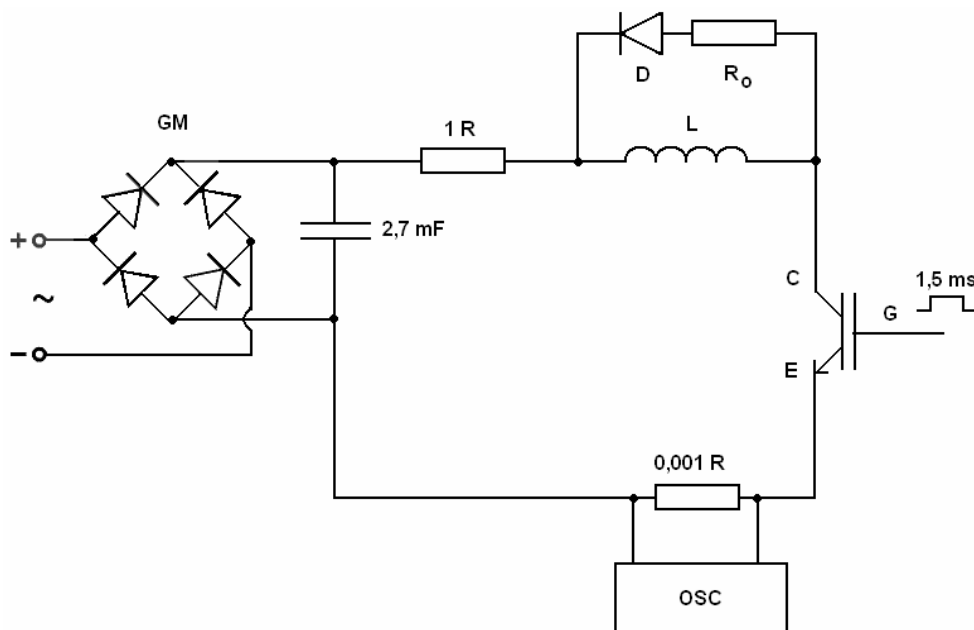
**Obr. 54: Vzorek ve stahovací konstrukci**

### Zdroj

Jak bylo zmíněno v kap. 2.3.4, elektropermanentní upínač potřebuje složitější napájecí zdroj a ani v našem případě tomu nebylo jinak. K namagnetování až k nasycení potřebují permanentní magnety ze vzácných zemin ve srovnání s tvrdými ferity přibližně dvou- až čtyřnásobnou intenzitu magnetického pole. K tomuto jsou nezbytné systémy magnetovacích cívek napájených ze speciálního pulsního zdroje, který je schopen dodat v krátkém čase velký proudový impuls.

Pro tyto účely se nejčastěji používá zdroj, u něhož se vybíjí kondenzátorová baterie s poměrně velkou kapacitou. Principiální schéma námi použitého zdroje s kondenzátory o celkové kapacitě 2,7 mF poskytujícího energii cca 200 J je na obr. 55.





Obr. 55: Principiální schéma magnetizačního zdroje

Stručný popis funkce zdroje: přes Graetzův můstek GM se nabije kondenzátorová baterie na požadované napětí, impulsem o nastavitelné délce trvání se sepne IGBT tranzistor a energie z kondenzátorů se vybijí do magnetizační cívky L, v jejíž dutině se nachází PM. Dioda D spolu s odporem  $R_o$  slouží jako ochranný vybíjecí obvod.

#### Návrh

Exaktní výpočet potřebných parametrů jak magnetizační cívky, tak např. velikosti potřebné intenzity magnetického pole, byl obtížný a přesahoval rozsah této práce. Díky tomu, že velikost permeability magnetického materiálu je nelineárně závislá na intenzitě magnetického pole a i jiné parametry nebylo možné přesně určit, zvolili jsme orientační výpočet pro určení parametrů cívky.

Z tabulky 3 jsme určili pro námi zvolený materiál příslušnou koercivitu, a s uvažováním skutečnosti, že pro zmagnetování, nasycení materiálu na 100% hodnotu, je třeba přibližně trojnásobek hodnoty koercivity  $H_{cJ}$ , určili jsme např. pro feritový magnet s ohledem na možnosti zdroje počet závitů cívky takto:

- Požadovaná intenzita magnetického pole  $H_{pož}$  - 600 kA/m
- Střední délka magnetické siločáry  $l$  - 0,1 m
- Poskytovaný proud ze zdroje  $I$  - 400 A

A následně intenzita magnetického pole:

$$H = \frac{I}{l}. \quad (14.)$$

Určili jsme tedy intenzitu magnetického pole, kterou jsme zvětšili pomocí cívky o  $N$  závitů na požadovanou hodnotu intenzity  $H_{pož}$ , potřebné k nasycení magnetického materiálu takto:

$$H_{pož} = H \cdot N. \quad (15.)$$

Vypočtené hodnoty tedy:

- Intenzita magnetického pole H - 4 kA/m
- Počet závitů cívky N - 150

Skutečný počet závitů byl s ohledem na rozměry vzorku navinut na 145. Tato hodnota je v dobré shodě s vypočtenou hodnotou závitů.

Časovou konstantu vzorku pro hodnoty cívky  $R = 1,6 \Omega$  a  $L = 1,82 \text{ mH}$  jsme určili vztahem:

$$\tau = \frac{L}{R} = 1,14 \text{ ms.} \quad (16.)$$

Čas sepnutí tranzistoru jsme tedy nastavili na hodnotu vyšší (1,5 ms), abychom se ujistili, že do vzorku pronikne proudový puls o maximální možné amplitudě.

Obdobně jsme postupovali i v případě vzorku s neodymovým magnetem, kde jsme ovšem byli limitováni skutečnými rozměry vzorku. Proto jsme byli nuceni s ohledem na výkon zdroje přijmout skutečnost, že nedosáhneme kvalit plného nasycení neodymového materiálu.

#### Ověření funkce

Po sestavení vzorku a připojení na zdroj impulsního proudu jsme pomocí gaussmetru proměřili ve vybraných bodech úroveň magnetické remanence. Následně jsme nastavili čas sepnutí IGBT tranzistoru, dobu po kterou se bude kondenzátorová baterie vybíjet do magnetizační cívky vzorku. Tato doba byla zvolena na 1,5 ms s ohledem na časovou konstantu  $\tau$ . Oscilografickým ověřením proudového pulsu jsme ověřili vypočtený předpoklad, že tato doba je dostačující, impuls je ukončen přímo po dosažení své maximální amplitudy.

Po sestavení vzorků jsme přeměřili počáteční úroveň magnetické remanence PM (jak byly dodány od výrobce) na vybraných místech vzorku (viz obr. 56), jak dokládá tabulka 4.

**Tabulka 4: Počáteční úrovně magnetické remanence**

|        | Pozice | 1    | 2   | 3   | 4    |
|--------|--------|------|-----|-----|------|
| Neodym | [mT]   | -110 | 110 | 138 | -125 |
| Ferit  | [mT]   | -18  | 27  | 20  | -20  |

\* znaménko - značí polaritu magnetu



**Obr. 56: Měřené body na vzorku EPMU**



Při použití neodymového materiálu jsme měli obavy, že námi použitý zdroj nebude schopen materiál magneticky nasytit na počáteční úroveň, což se nám potvrdilo. Jelikož bychom nebyli schopni magnet nasytit více než byl od výrobce, zahájili jsme experiment rovnou demagnetizací materiálu. Kondenzátor byl nabit na maximální napětí (300 V) a sepnutím tranzistoru se nahromaděná energie vybila do magnetizační cívky. Všechny následné stavy po proběhnutí procesu magnetizace a demagnetizace byly monitorovány pomocí gaussmetru. Již první impuls (C nabit na maximální napětí) způsobil pokles magnetické remanence PM téměř o 80% původní hodnoty. Druhý maximální impuls způsobil přechod do opačné polarizace hysterezní smyčky materiálu. Zde jsme zjistili, že nasycení materiálu je obtížnější než v původním přednostním směru magnetování od výrobce, že nejsme schopni namagnetovat materiál na stejnou hodnotu jako v magnetizačním směru. Zmagnetovali jsme materiál tedy v původním směru magnetizace na maximální možnou hodnotu remanence, kterou jsme byli schopni materiálu naším zdrojem dodat. Z tohoto výchozího stavu jsme experimentálně určili, že stačí pouhý jeden demagnetizační puls o maximální amplitudě (C nabit na  $U_{max}$ ) a následné měření magnetické remanence ukázalo téměř dokonalé magnetické vyčištění neodymového materiálu, jak dokládá tabulka 5. Opakovaným postupem magnetizace a demagnetizace jsme ověřili, že námi použitý zdroj dokáže navržený vzorek EPMU opakovaně uvést v činnost. Bohužel však nedokáže neodymový materiál nasytit na 100%, pouze na cca 50%. S výkonnějším zdrojem by však nebyl problém materiál zmagnetovat na maximální hodnotu remanence.

**Tabulka 5: Úrovně magnetické remanence vzorku s neodymovým PM**

|               | Pozice | 1   | 2    | 3    | 4   |
|---------------|--------|-----|------|------|-----|
| Magnetizace   | [mT]   | -60 | 62   | 70   | -70 |
| Demagnetizace | [mT]   | 1,1 | -0,9 | -1,1 | 0,9 |

\* znaménko - značí polaritu magnetu

Při použití feritového materiálu jsme zjistili, že první impuls v přednostní ose magnetování způsobí 100% nasycení magnetického materiálu, tedy že magnety byly dodány od výrobce v méně nasyceném stavu. Několika pokusy jsme experimentálně stanovili potřebnou úroveň napětí, na kterou je nutno nabít námi použitou kondenzátorovou baterii pro úplnou demagnetizaci feritového magnetu. Tato úroveň byla stanovena přibližně na 75 V, přesné určení bylo obtížné už kvůli samotnému tvaru hysterezní křivky feritového materiálu, která má velmi strmý nárůst.

## 9 Závěr

Předložená práce vycházející z diplomové práce (obhajoba v r. 2009) slouží k ucelenému seznámení s problematikou magnetického upínání pomocí tří principiálně odlišných upínacích systémů. Přínos práce spočívá v poznatcích vyplývajících z experimentů, které byly provedeny na několika konstrukčních variantách elektromagnetických upínačů a které mohou sloužit pro případné inovace stávajících konstrukcí upínačů. Za další je přínosem práce přehled moderních technologií elektropermančního upínacího systému, kde zvláštní pozornost byla věnována návrhu a ověření funkčního vzorku elektropermanentního upínače. Ze zkušeností získaných při návrhu a ověřování funkce tohoto vzorku může být čerpáno při dalším technologickém zkoumání tohoto progresivního systému magnetického upínání.

## 10 Použitá literatura

### *Skripta:*

- [1] Kuba, J., Mach, P.: Technologické procesy, ES ČVUT, Praha 2001, (2.vydání)
- [2] Novotný K.: Teorie elektromagnetického pole I, ES ČVUT, Praha 2002

### *Diplomové práce:*

- [3] Do, P.: Magnetické upínače pro upínání feromagnetických předmětů, bakalářská práce, FEL ČVUT, Praha 2008
- [4] Lacina, T.: Magnetické vlastnosti elektromagnetických upínačů, disertační práce, FEL ČVUT, Praha 1979

### *Patenty a průmyslové vzory:*

- [5] Klatovský V., Šmelko A.: Zařízení pro magnetování permanentních magnetů pomocí proudových impulzů, Patent č. 159669, Úřad prům. vlastnictví Praha 1974
- [6] Kuba J., Lacina T., Němec F.: Elektromagnetický upínač, Patent č. 190819, Úřad prům. vlastnictví Praha 1981
- [7] Kuba J., Lacina T., Němec F.: Pólová deska elektromagnetického upínače, Patent č. 237175, Úřad prům. vlastnictví Praha 1987
- [8] Kuba J., Novák F.: Pólová deska magnetického upínače, Patent č. 277531, Úřad prům. vlastnictví Praha 1992
- [9] Kuba J., Stoulil M.: Zařízení pro demagnetizaci feromagnetických výrobků, Patent č. 277661, Úřad prům. vlastnictví Praha 1992
- [10] Kuba J., Stoulil M.: Elektromagnetický upínač, Patent č. 278473, Úřad prům. vlastnictví Praha 1994
- [11] Kuba J., Papež V., Papežová S.: Zařízení pro napájení demagnetizátoru, Patent č. 279981, Úřad prům. vlastnictví Praha 1995
- [12] Kuba J.: Ruční demagnetizátor, Patent č. 280398, Úřad prům. vlastnictví Praha 1995
- [13] Laskaris T. a kol.: Method and apparatus for magnetizing a permanent magnet, Patent č. US 7,345,560 B2, 2008
- [14] Žák Z.: Způsob magnetování a odmagnetování permanentních magnetů, Patent č. 217178, Úřad prům. vlastnictví Praha 1985

### *On line stránky a katalogy:*

- [15] Feritové materiály Durox, Pramet Šumperk, 3. vydání, 1976, katalog výrobků
- [16] On line: <http://www.tkb.cz/pdf/power-matrix.pdf>, 5. dubna 2009, katalog produktů
- [17] On line: <http://magnety.selos.cz>, 5. dubna 2009, katalog produktů
- [18] On line: <http://www.magsy.cz>, 8. dubna 2009, katalog produktů
- [19] On line: <http://ciessetrade.cz/SPD>, 8. dubna 2009, katalog produktů
- [20] On line: <http://www.sav-workholding.cz>, 15. dubna 2009, katalog produktů
- [21] On line: <http://www.sav-czech.cz>, 15. dubna 2009, katalog produktů
- [22] On line: <http://www.magcentrum.cz>, 15. dubna 2009, katalog produktů
- [23] On line: <http://www.walkermagnet.cz>, 15. dubna 2009, katalog produktů