

## Měříme přídržnou sílu magnetických fólií

MARKĚTA MYSÍKOVÁ<sup>1</sup> – VLADIMÍRA ERHARTOVÁ<sup>1</sup> – JIŘÍ ERHART<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctrina – Podještědské gymnázium, s.r.o., Liberec

<sup>2</sup>Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická, Technická univerzita v Liberci

### Úvod

Permanentní magnety jsou příkladem materiálů s definovaným uspořádáním magnetických dipólových momentů v látce, která byla materiálu po jeho vyrobení vtištěna v silném magnetickém poli. Používají se magnety z různých práškových materiálů – neodymové (FeNdB), samarium-kobaltové (SmCo), AlNiCo, feritové (Sr nebo Ba ferit) nebo plastové [1]. V plastových magnetech je magnetický keramický prášek spojen s vhodným nemagnetickým polymerem do homogenní kompozitní směsi, vyválnován do tenké fólie a v silném magnetickém poli je v něm vytvořena magnetická struktura. Plastové magnety jsou tedy kompozitní slabě magnetické materiály, k jejichž přípravě se užívá některé z feritových složení, nebo prášků silnějších neodymových magnetů.

V plastových fóliích je vytvořena struktura magnetických domén tzv. Halbachova pole [2], které se vyznačuje tím, že jedna strana fólie je magneticky „silná“ a opačná strana téměř nemá magnetické vlastnosti. Ve svém nejobvyklejším použití – magnetické „nálepky“ např. na ledničku atd. – jsou potom fólie schopné přídržné síly pouze ze strany magnetické fólie a nebudí téměř žádné magnetické pole na opačné straně obvykle nesoucí jako další vrstvu nějakou nálepku. Struktura Halbachova pole má směry magnetických dipólových momentů vhodně uspořádány tak, že se po celé „silné“ ploše fólie uzavírají indukční čáry magnetického pole do podkladu

a fólie tak ideálně drží na magnetické podložce celou svou plochou. Je to tedy mnohem lepší uspořádání magnetických domén, než by byla homogenní orientace dipólových momentů kolmo na plochu fólie. Uspořádání směrů magnetických dipólových momentů do Halbachova pole s vhodnou periodou se tedy s úspěchem využívá ke zvýšení přídržné síly magnetů na podložce.

Přídržná síla permanentních magnetů k magneticky měkké podložce (např. feromagnetická deska z magneticky měkké oceli) je ovlivněna řadou faktorů jako je kvalita povrchu a s tím související možnost vzduchových mezer mezi magnetem a kontaktní plochou, její tloušťkou i samotnou velikostí magnetického pole permanentní magnetky. Testovací plocha z magneticky měkké oceli by měla mít malou drsnost povrchu pro zajištění dobrého kontaktu (např. „relief“ povrchu nižší než 0,001 inch = 25  $\mu\text{m}$ ) a dostatečnou tloušťku tak, aby nedošlo k saturaci magnetického pole v podložce po přiložení odtrhávaného magnetu. Návrh metody měření přídržné síly lze nalézt na webu některého z výrobců magnetů, např. [3]. Magnet bývá při měření upevněn k háčku zavěšeném na siloměru, který registruje sílu v okamžiku odtrhnutí magnetky od podložky (komerční měřidla viz např. [4]). Magnetické fólie mají však mnohem slabší magnetické vlastnosti než keramické magnetky a tak není tloušťka podkladu pro odtrhávání kritickým parametrem, stačí již tloušťka srovnatelná s tloušťkou magnetické fólie.

V předloženém článku se budeme věnovat vlastnostem plastových magnetických fólií, a to hlavně měřením přídržné síly magnetických fólií na kovové podložce. Také se budeme zabývat vlivem periody Halbachova pole na přídržnou sílu magnetických fólií. Cílem bude zjistit, jak perioda magnetizace ovlivňuje přídržnou sílu magnetických fólií a jestli výrobcem originálně používaná perioda Halbachova pole je optimální ve srovnání s vlastními vytvořenými strukturami.

## Experimentální část

Vzorky magnetických fólií (typ natural, bez dalších dodatečných vrstev papíru, plastu atd.) byly pořízeny v e-shopech prodejců magnetických materiálů [5, 6]. Jejich označení a vlastnosti uváděné prodejcem fólií shrnuje tab. 1. „Magnetickou sílu“ uvádí prodejci v praktických jednotkách hmotnosti (myšleno v ekvivalentu tíhové síly odpovídající této hmotnosti), kterou udrží přídržná síla fólie na 1  $\text{cm}^2$  své plochy. Není tedy uvedena v běžných fyzikálních jednotkách síly N (newton), hodnoty je třeba přepočítat na ekvivalent hmotnosti  $m$  zátěže udržitelné magnetickou silou fólie

(tíhové zrychlení  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , plocha fólie  $S$ )

$$F = mg = f_m g S \quad (1)$$

a vyjádřit v plošné hustotě této hmotnosti na plochu  $1 \text{ cm}^2$ . V naměřených výsledcích uvádíme tedy dále přídržnou „magnetickou sílu“

$$f_m = \frac{F}{gS} \quad (2)$$

v jednotkách  $\text{g}/\text{cm}^2$  pro snadnější porovnávání s údaji prodejce.

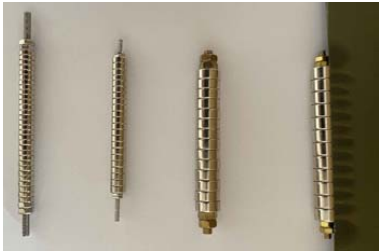
Tab. 1 Označení a vlastnosti použitých magnetických fólií uváděných prodejcem (\*Perioda Halbachova pole je určená vlastním změřením po zviditelnění magnetických domén detektorem)

| Označení | Tloušťka fólie (mm) | „Magnetická síla“ ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) | *Perioda Halbachova pole (mm) | Odkaz |
|----------|---------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------|
| MF04     | 0,4                 | 17                                           | 2                             | [5]   |
| MF-05-N  | 0,5                 | 29                                           | 2                             | [6]   |
| MF-07-N  | 0,7                 | 40                                           | 2                             | [6]   |
| MF-10-N  | 1,0                 | 58                                           | 2,5                           | [6]   |
| MF-15-N  | 1,5                 | 68                                           | 2,5                           | [6]   |

Doménová struktura v použitých fóliích byla dále modifikována pomocí vlastního uspořádání prstencových neodymových magnetek pro vytvoření vlastní periody magnetické struktury Halbachova pole. Pro takovou „přemagnetizaci“ fólií je použito těsné uspořádání neodymových prstenců navlečených na závitovou tyč s orientacemi magnetických pólů (S-J) vždy souhlasnými póly proti sobě u sousedních prstenců. Použité prstencové magnetky musejí být pevně stáhnuty na závitové tyči, kdy indukce magnetického pole vycházející radiálně na úrovni kontaktní plochy mezi magnetkami je silnější než pole jednoho prstence – viz detaily uspořádání a použití vytvořeného přípravku [2] a obr. 1.

Použité neodymové prvky pro uspořádání přípravků na vytváření vlastních period Halbachova pole jsou uvedeny v tab. 2. Magnetické neodymové materiály mají prodejcem uváděné hodnoty remanentní magnetizace  $1,22\text{--}1,26 \text{ T}$  pro typ N38 a  $1,29\text{--}1,32 \text{ T}$  pro typ N42 [7]. Všechny neodymové kruhy měly axiální magnetizaci, tj. s póly (S-J) na prstencových plochách magnetek. Perioda Halbachova pole je rovna tloušťce prstencových magnetek, viz tab. 2. Magnetická indukce na povrchu přípravků pro vlastní magnetizaci fólií do Halbachova pole vlastní periodicity je uvedena

v tab. 3, měření je provedeno teslametrem na povrchu každého přípravku, vždy pro 5 pólů S-J v radiálním směru Hallovy sondy vůči ose prstenců, viz obr. 4. Hodnoty magnetické indukce jsou zřetelně vyšší pro tlustší prstence z materiálu N38 než pro tenčí prstence z materiálu N42.



Obr. 1 Přípravky pro vytváření vlastních period Halbachova pole v magnetických fóliích (zleva periody 2 mm, 2,5 mm, 4 mm, 5 mm – spolu se zviditelněním domén detektorem)

Tab. 2 Parametry prstencových neodymových prvků pro přípravky na vlastní vytváření Halbachova pole v magnetických fóliích

| Označení       | Materiál | Průměr vně (mm) | Průměr uvnitř (mm) | Tloušťka (mm) | Perioda Halbachova pole (mm) | Odkaz |
|----------------|----------|-----------------|--------------------|---------------|------------------------------|-------|
| KR-06-03-02-N  | N42      | 6               | 3                  | 2             | 2                            | [6]   |
| KR-06-02-2,5-N | N42      | 6               | 2                  | 2,5           | 2,5                          | [6]   |
| NP011          | N38      | 10              | 4,3                | 4             | 4                            | [5]   |
| KR-10-03-05-N  | N38      | 10              | 3                  | 5             | 5                            | [6]   |

Tab. 3 Indukce magnetického pole na povrchu přípravků (měřeno pro max. 5 míst pólů S-J, čísla v závorkách udávají chybu měření)

| Perioda (mm) | Pól | Indukce (mT) |     |     |     |     |     | Průměr (mT) |
|--------------|-----|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| 2            | S   | 188          | 171 | 171 | 185 | 186 | 185 | 181 (16)    |
|              | J   | 207          | 155 | 177 | 177 | 165 | 157 | 173 (26)    |
| 2,5          | S   | 230          | 172 | 181 | 228 | 208 | 193 | 202 (32)    |
|              | J   | 247          | 217 | 219 | 179 | 207 | 199 | 211 (31)    |
| 4            | S   | 359          | 350 | 389 | 363 | 344 | 363 | 361 (32)    |
|              | J   | 344          | 348 | 340 | 387 | 362 | 360 | 357 (34)    |
| 5            | S   | 477          | 480 | 493 | 486 | 460 | -   | 479 (35)    |
|              | J   | 501          | 504 | 501 | 485 | 484 | -   | 495 (33)    |

Vzorky magnetických fólií byly vyřezány do kruhového tvaru o průměru 41 mm kancelářským odlamovacím nožem a přilepeny silnou oboustrannou lepicí páskou (typ GPT-020F [8]) na tenkou ocelovou karosářskou podložku o stejném průměru a tloušťce 1 mm. Na střed podložky byla dále přilepena kovovým epoxidem matice M4, do které je možno zašroubovat oko se závitem (M4 × 40mm) potřebné pro zavěšení siloměru při odtrhávání od podložky, viz obr. 2.

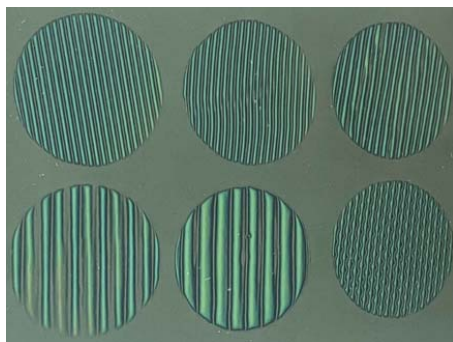


Obr. 2 Vzorky magnetické fólie připevněné na podložku a závitové oko, vlevo jsou magnetické domény vzorku na podložce zviditelněny detektorem

Takto byly připraveny vzorky z každé tloušťky magnetické fólie s originální magnetizací a také vzorky s vlastními strukturami Halbachova pole. Vlastní magnetizace fólií proběhla vždy před nalepením na podložku pomocí přípravku a vždy z původní silné strany originálně magnetizované fólie. Podélný směr domén Halbachova pole (viz proužky na obr. 3) u vlastních magnetizovaných vzorků byl stejný jako originální směr proužků magnetických domén. Kontaktní plocha při magnetizaci zůstává i nadále silnou plochou Halbachova pole nově vytvořených magnetických domén ve fólii. Přípravek byl veden v těsném kontaktu s magnetickou fólií jeho odvalováním po povrchu rukou. U jednoho vzorku pro každou tloušťku magnetické fólie byla navíc vytvořena magnetická struktura vzniklá magnetizací přípravkem ve dvou navzájem kolmých směrech, viz obr. 3.

Pro charakterizaci magnetické indukce fólií a přípravků na magnetizaci byl použit teslametr SDL900 (výrobce Extech [9]) s přesností měření 5 % rdg + 10 dgt. Pro měření indukce magnetických polí fólií byl přístroj použit v rozsahu 300 mT s rozlišením 0,01 mT, pro některé přípravky na magnetizaci i větší rozsah 3 000 mT s rozlišením 0,1 mT. Magnetická indukce byla měřena při dotyku Hallova senzoru teslametru na povrchu magnetické fólie. Pro vizualizaci struktury magnetických domén byly použity detekční fólie „magnetic flux detector“ a „colour changing flux detector“, jejichž principy a možnosti vizualizace magnetických domén jsou dříve po-

psány [2]. Délky period magnetické doménové struktury byly měřeny pomocí posuvného měřítka po jejich zviditelnění detekční fólií a odpovídají tloušťkám neodymových prstenců použitých v přípravku pro magnetizaci.



Obr. 3 Magnetické struktury Halbachova pole v magnetické fólii o tloušťce 0,4 mm zviditelněné detektorem (shora a zleva doprava postupně struktury s originální magnetizací periody 2 mm, vlastní magnetizací o periodách 2 mm, 2,5 mm, 4 mm, 5 mm a křížem magnetizovaná fólie s periodou 2 mm)

Nejmenší naměřená hodnota (12 mT) měla chybu 1 mT, největší naměřená hodnota (43 mT) chybu 2 mT. Chyby naměřených indukcí u jednotlivých vzorků fólií se tedy nachází v rozmezí 1 mT až 2 mT, tj. v rámci 5% relativní chyby měřidla.

Pro určení přídržné síly byl použit siloměr Vernier Dual-Range Force Sensor v rozsahu měření  $-10\text{ N}$  až  $+10\text{ N}$  s citlivostí 0,01 N, který měří sílu v tlaku i tahu [10]. Samotné měření přídržné síly je založeno na měření síly při odtrhávání magnetické fólie od tlusté ocelové desky pomocí zavěšení závitového oka našroubovaného na přípravek s fólií na háčku siloměru (obr. 4). Datalogování při měření siloměrem Vernier je nastaveno na 30 s, s intervalem odečtu síly po 0,1 s. Během této doby je opakovaně odtrhávána fólie od podkladové desky, z naměřených dat je vypočten průměr z kladných maxim naměřené síly (tj. síly v okamžiku odtržení fólie od desky).

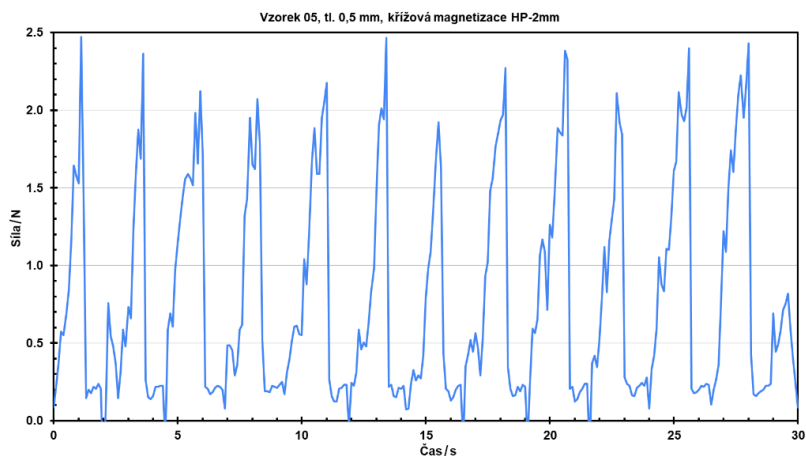
Kvalita povrchu ocelové desky (o tloušťce 15 mm) nebyla nijak dokumentována, deska byla jen lehce očištěna jemným smirkovým papírem a odmaštěna rozpouštědlem (technický benzín), odtrhávání bylo provedeno mimo otvory v desce, aby byl zajištěn kontakt celé plochy vzorku s deskou. Magnetické pole přípravků na magnetizaci fólií do struktur Halbachova pole bylo měřeno teslametrem (obr. 4).



Obr. 4 Sestava na měření přídržné síly magnetické fólie ke kovové desce a určení magnetické indukce přípravků na magnetizaci fólií do Halbachova pole

## Výsledky měření a diskuze

Pro vytvořené vzorky magnetických fólií s originální i modifikovanou periodou Halbachova pole byly siloměrem Vernier určeny hodnoty přídržné síly (příklad viz obr. 5). Během intervalu 30 s byl vzorek odtržen 10–15krát, po každém odtrhu potom znovu přitlačen k ocelové desce a odtržení bylo opakováno. Z maxim naměřených sil (příklad viz obr. 5) byla vypočtena průměrná hodnota a určena chyba měření – výsledky viz tab. 4. Relativní chyby měření se pohybují v rámci 3–8 %.



Obr. 5 Příklad naměřených hodnot přídržné síly pro magnetickou fólii tloušťky 5 mm s křížovou magnetizací Halbachova pole s periodou 2 mm

Tab. 4 Hodnoty magnetické indukce na povrchu silnější strany magnetické fólie pro různé periody Halbachova pole

| Magnetická indukce (mT) |     | 2 mm (originál) |    | 2,5 mm (originál) |    | 2 mm (nová) |    | 2,5 mm (nová) |    | 4 mm (nová) |    | 5 mm (nová) |    | 2 mm (křížem) |    |
|-------------------------|-----|-----------------|----|-------------------|----|-------------|----|---------------|----|-------------|----|-------------|----|---------------|----|
| Pól                     |     | S               | J  | S                 | J  | S           | J  | S             | J  | S           | J  | S           | J  | S             | J  |
| Tloušťka [mm]           | 0,4 | 14              | 13 | -                 | -  | 14          | 14 | 15            | 14 | 12          | 14 | 17          | 16 | 15            | 15 |
|                         | 0,5 | 16              | 15 | -                 | -  | 16          | 15 | 17            | 16 | 19          | 16 | 20          | 19 | 18            | 16 |
|                         | 0,7 | 23              | 22 | -                 | -  | 22          | 21 | 22            | 22 | 25          | 23 | 31          | 30 | 24            | 23 |
|                         | 1   | -               | -  | 30                | 27 | 27          | 26 | 29            | 28 | 32          | 32 | 40          | 33 | 26            | 25 |
|                         | 1,5 | -               | -  | 30                | 29 | 29          | 28 | 32            | 31 | 35          | 33 | 38          | 43 | 27            | 25 |

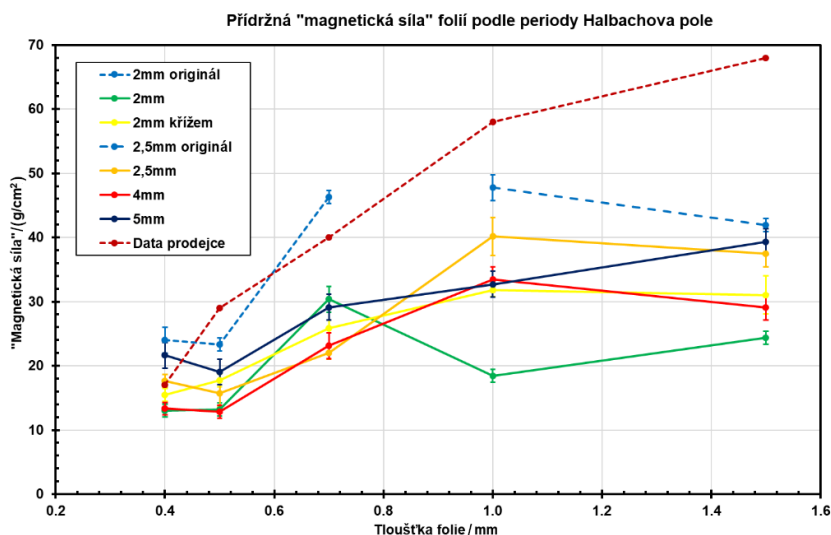
Tab. 5 Naměřené hodnoty přídržné „magnetické síly“ pro fólie (hodnoty uvedené v závorkách jsou chyby měření)

| „Magnetická síla“ (g/cm <sup>2</sup> ) |                                |          |                |            |          |          |            |
|----------------------------------------|--------------------------------|----------|----------------|------------|----------|----------|------------|
| Tloušťka folie (mm)                    | Halbachovo pole - perioda (mm) |          |                |            |          |          |            |
|                                        | 2 (originál)                   | 2 (nová) | 2,5 (originál) | 2,5 (nová) | 4 (nová) | 5 (nová) | 2 (křížem) |
| 0,4                                    | 24 (2)                         | 13 (1)   | -              | 18 (1)     | 13 (1)   | 22 (2)   | 15 (1)     |
| 0,5                                    | 23 (1)                         | 13 (1)   | -              | 16 (2)     | 13 (1)   | 19 (2)   | 18 (1)     |
| 0,7                                    | 46 (1)                         | 30 (2)   | -              | 22 (1)     | 23 (2)   | 29 (2)   | 26 (3)     |
| 1                                      | -                              | 18 (1)   | 48 (2)         | 40 (3)     | 33 (2)   | 33 (2)   | 32 (1)     |
| 1,5                                    | -                              | 24 (1)   | 42 (1)         | 37 (2)     | 29 (2)   | 39 (2)   | 31 (3)     |

Porovnáním tab. 1 a tab. 5 vidíme, že námi použitou metodou měření získáme hodnoty magnetické síly přibližně stejné s údaji prodejce pro fólie o tloušťkách 0,4 mm, 0,5 mm a 0,7 mm s originální magnetizací. Pro tlustší fólie o tloušťkách 1 mm a 1,5 mm již máme naměřeny zřetelně menší hodnoty přídržné síly, než uvádí prodejce. Také je na hodnotách sil vidět, že naše vlastní magnetizace Halbachova pole dává zpravidla menší hodnoty síly než originální magnetizace, a to tím více, čím je fólie tlustší (obr. 6). Naopak je vidět, že hodnoty magnetické indukce měřené na povrchu magnetických fólií jsou pro námi magnetizované vzorky zpravidla mírně větší než pro originální magnetizaci (tab. 4). Pouze pro křížem magnetizované fólie je indukce menší. Podařilo se nám tedy magnetizovat fólie přinejmenším stejně silně jako při jejich výrobě, neodpovídá to však zřetelnému zvýšení magnetické síly podle údajů prodejce. Důvod by bylo třeba hledat v prostorovém rozložení magnetizace uvnitř magnetických fólií (a prostorovému průběhu magnetických indukčních čar uzavírajících se při kontaktu fólie s podložkou), což jde však již nad rámec jejich charakterizace jednoduchým detektorem. Výrobci magnetických fólií neudávají metodiku měření,



ani jak dosáhli hodnot magnetické síly, které na fóliích udávají. Konkrétní podrobnosti výroby použitých magnetických fólií se nám nepodařilo zjistit.



Obr. 6 Graf závislosti magnetické přídržné síly na tloušťce fólie podle periody Halbachova pole

Při samotném magnetování mohlo zároveň dojít k nepřesnostem při pohybu magnetizačních přípravků po povrchu fólie (viz nepravidelnosti doménové struktury v obr. 3). Jednou z možností, jak se těmto problémům alespoň částečně vyhnout, je využití automatizovaných přístrojů. Samozřejmě také profesionální přístroj na mechanické zkoušky materiálů (trhačka) by odstranil možné zdroje nepřesností při odtrhávání fólie od podložky jako je třeba nepřesný směr táhnutí (a tedy měření jen menší kolmé komponenty přídržné síly).

I přesto, že student neobjeví nic zásadně nového ohledně vlastností magnetických fólií, seznámí se s principem metody charakterizace přídržné síly, praktickým vyjádřením přídržné „magnetické síly“ v „nefyzikálních“ jednotkách  $\text{g}/\text{cm}^2$ , udávaných pro názornou představu prodejcem i překvapivými vlastnostmi Halbachova pole. V každém případě však jde o jednoduše realizovatelnou školní úlohu, kde si může student vyzkoušet jak řadu věcí z magnetismu (přípravu vzorků a přípravků, magnetizaci do Halbachova pole, měření teslametrem a vizualizaci domén detektory), tak i měření po-

mocí počítačového systému Vernier (nastavení datalogování, určení hodnot a jejich zpracování, přenos dat).

## Literatura

- [1] Permanentní magnety – Co je třeba vědět o magnetech. Feromagnet, s.r.o., Světlá Hora. Dostupné z: [https://feromagnet.cz/data/files/17a3af36d92b31c685214dc31fc53f5a\\_Permanentni\\_magnety.pdf](https://feromagnet.cz/data/files/17a3af36d92b31c685214dc31fc53f5a_Permanentni_magnety.pdf).
- [2] Erhart, J., Hejsková, P.: Investigating magnetization of permanent magnets by magnetic flux viewing film. *Physics Education* 59 (2024), č. 2, 025023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad2190>.
- [3] Test Method for Determining Breakaway Force of a Magnet. Puritan Magnetics, Inc., USA. Dostupné z: <https://www.puritanmagnetics.com/inspection-testing/test-method-of-breakaway-force/>
- [4] Eriez Pull Test Kits, Eriez Manufacturing Co., PA, USA. Dostupné z: <https://www.eriez.eu/EU/EN/Products/Magnetic-Separation/Pull-Test-Kits.htm>
- [5] Magnetická fólie 0,4mm natural, Neomag-magnet s.r.o., Třinec. Dostupné z: <https://neomag.cz/cs/products/magneticka-folie-0-4mm-natural>.
- [6] Magnetické fólie natural. UNIMAGNET s.r.o., Praha. Dostupné z: [https://www.unimagnet.cz/magneticka-folie-a-pokovene-folie\\_k22/magneticke-folie-natural\\_k86/](https://www.unimagnet.cz/magneticka-folie-a-pokovene-folie_k22/magneticke-folie-natural_k86/).
- [7] Fyzikální údaje magnetů. UNIMAGNET s.r.o., Praha. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/fyzikalni-udaje-neodymovych-magnetu/>.
- [8] 3M<sup>TM</sup> oboustranná lepicí páska GPT-020F. 3M Česko, spol. s r.o., Dostupné z: <https://www.3market.cz/gpt-020f-3m-tenka-oboustranne-lepici-paska-s-vysokou-pevnosti-transparentni-tloustka-0-2-mm/>.
- [9] Teslametr Extech SDL900. Extech Instruments. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/cs/p/extech-sdl900-pristroj-pro-mereni-magnetickeho-pole-s-funkci-datoveho-zaznamniku-se-slotem-pro-sd-kartu-1385065.html>.
- [10] Dual-Range Force Sensor, Vernier, USA, Dostupné z: <https://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/DFS-BTA>.