

NEDESTRUKTIVNÍ MAGNETICKÉ MĚŘENÍ HLOUBKY PROKALENÍ FUNKČNÍCH PLOCH VAČKOVÝCH HŘÍDELÍ

Jirásková Věra

Sekce – Materiály a technologie,

Fakulta strojní, 2. ročník

Navazující magisterský studijní program – MATERIÁLY A TECHNOLOGIE

Abstrakt: Cílem práce byl vývoj aplikace metody magnetické skvrny pro určování hloubky prokalení funkčních ploch vačkových hřídelí. Uvedená metoda umožňuje nedestruktivní stanovení hloubky prokalení pomocí přístroje Doména.

Teoretická část se zaměřuje na princip metody magnetické skvrny a postupný vývoj přístroje Doména.

V praktické části jsou pak předloženy tři aplikace měření hloubky prokalení na tepelně zpracovaných dílech, přičemž se liší výchozí stav struktury před TZ, následně struktura jednotlivých hloubek prokalení dílů a rozdílné je i zakřivení kontrolovaných ploch.

Klíčová slova: vačkový hřídel, povrchové kalení, přístroj Doména, magnetická skvrna, struktura materiálu

1 Úvod

Vývoj aplikace byl cíleně proveden pro vačkový hřídel Tedom (obr.1), což je speciální hřídel se 7 ložisky, 6 sacími a 6 výfukovými vačkami. Vačky mají vejčitý tvar. Hřídel je součástí motoru a při chodu zajišťuje pohyb ventilů podle aktuálního natočení. Jednotlivé palce vaček jsou vůči sobě posunuty o přesně stanovený úhel. Tímto nastavením dochází k požadovanému otevírání a zavírání sání paliva a následně výfuku spalín v hlavě válců. [1]

Činné plochy vačkového hřídele jsou značně kontaktně namáhány, proto je nutné zvýšení tvrdosti, a tím odolnosti proti opotřebení. A to je provedeno indukčním kalením ložisek i vaček. Indukční kalení je povrchová úprava materiálu s předepsanými požadavky. Přesnou specifikaci kalených vrstev předepisuje výkres jednotlivých součástí / dílů.

Z důvodu zrušení kalírny firmy Tedom jsou díly nyní kaleny u externího poskytovatele. Při každé dodávce se kalených dílů ověřuje povrchová tvrdost a hloubka prokalení. Povrchovou tvrdost lze zkontrolovat pomocí tvrdoměru. Ověření hloubky prokalení je prováděno destruktivní metodou po rozříznutí dílu, vybroušení kontrolované plochy a změření hloubky prokalení. Celý tento proces je časově i finančně značně náročný.

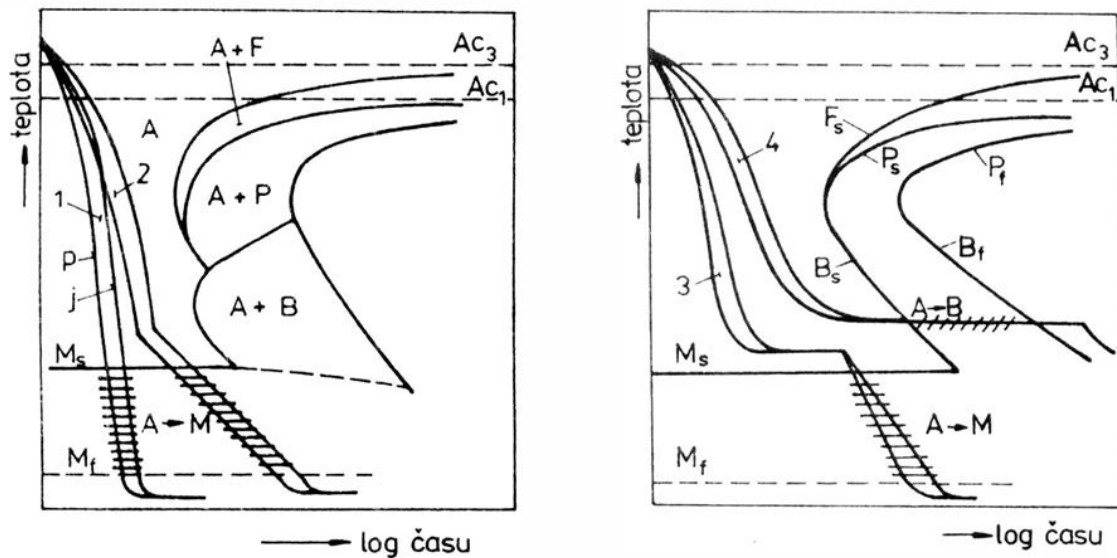
Firma Tedom přístroj v provedení Doména B2 již vlastní. Za určitých podmínek by bylo možné provést nedestruktivní kontrolu hloubky prokalení rychleji a levněji.



Obr. 1 – Vačkový hřídel Tedom

2 Kalení

Kalení je způsob tepelného zpracování, který provádíme za účelem zvýšení tvrdosti dílu. Kalení lze v určitých mezích korigovat podle struktury, které bychom chtěli dosáhnout – viz. obr. 2.



Obr. 2 – Možné průběhy kalení – 1. – základní kalení, 2. – lomené kalení, 3. – termální kalení, 4. – izotermické kalení [2]

Při kalení se materiál ohřeje nad teplotu A_{c3} u podeutektoidních ocelí a nad teplotu A_{c1} u nadeutektoidních ocelí a následně dojde k rychlému ochlazení vysokou rychlostí. Tímto způsobem získáme martenzitickou strukturu, která je oproti původní struktuře feritu a perlitu mnohem tvrdší.

V praktické části byly díly povrchově indukčně kalené. Při indukčním kalení dochází k ohřevu výrazně výše nad teploty A_{c3} a A_{c1} a austenitizaci pouze povrchové vrstvy v několika milimetrech pomocí induktoru.

Na obrázku 3 je zobrazen induktor se sprchou, kterým se kalili vačkové hřídele Tedom. K dosažení požadované povrchové tvrdosti bylo nutné díl po ohřevu okamžitě ochladit.



Obr. 3 – Induktor pro kalení vačkových hřídele Tedom

2.1 Hloubka prokalení

Hloubku prokalení stanovuje norma stanovuje norma ČSN EN ISO 18203 jako vzdálenost mezi povrchem a vrstvou, ve které HV dosahuje hodnoty specifikované výrazem „mezí tvrdost“. Tuto „mezí tvrdost“ lze vyjádřit rovnicí:

$$\text{Mezní tvrdost HV} = A \times \text{minimální tvrdost povrchu (HV)} \quad (1)$$

Nejčastěji se jako A udává hodnota 0,80 jako 80% minimální tvrdosti. Přehled mezních tvrdostí pro kalené vrstvy je uveden v normě ČSN ISO EN 18203.

V experimentální části byla použita hranice pro odečet hloubky prokalení hodnota R_{ht} 450 značena SHD pro kalené díly, hodnota R_{ht} 550 značena CHD pro cementované a následně kalené díly. Pro určení skutečné hloubky prokalení bylo nutné vždy jeden kus rozříznout.

3 Nedestruktivní metody stanovení hloubky prokalení

Pro úspěšnou aplikaci těchto metod je nutné provést předchozí výzkum ke stanovení těsné závislosti mezi parametry a veličinami, vyjádřené spolehlivým matematickým modelem s vysokým koeficientem regrese (R^2 min. 0,9)

Mezi nedestruktivní metody stanovení hloubky prokalení se řadí:

- a) Metoda magnetoinduktivní (MT) – vyhodnocení dle zvoleného elektrického či magnetického parametru, který souvisí se stavem mikrostruktury po tepelném zpracování
- b) Metoda vířivých proudů (ET) – stanovení změn fyzikálních vlastností materiálu při působení střídavého magnetického pole
- c) Metoda pomocí ultrazvuku (UT) – využívá šíření ultrazvukových vln, které závisí na modulu pružnosti a hustotě daného materiálu a Poissonově konstantě

3.1 Princip metody magnetické skvrny

Ve feromagnetických materiálech existují magnetické momenty na atomární bázi, které jsou neuspořádané. Tyto magnetické momenty se vyskytují uvnitř magnetických domén, které mají mikroskopické rozměry. Domény si lze představit jako malé magnety uvnitř materiálu, které jsou různě orientovány, proto se navenek materiál jeví jako magneticky neutrální. Při zmagetování dojde k růstu domén posunem tzv. Blochových zón a k polarizaci shodnou s vnějším magnetickým polem nebo dojde ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky. Když vnější magnetické pole přestane působit, vrátí se některé domény do původního stavu. Některé domény zůstanou zpolarizované, protože v návratu do původního stavu jim brání atomy feromagnetika, atomární napětí a mřížkové poruchy. Tím vzniká remanentní polarizace. Pokud materiál obsahuje karbid železitý, martenzit, četné dislokace a hranice zrn je hodnota remanentní polarizace vysoká. Zmagetované místo vykazuje vlastní magnetické pole o intenzitě H_r . [3]

Závislost mezi vlastním magnetickým polem H_r a vnějším magnetickým polem H_0 je dána vztahem:

$$H_r = H_0 - N \cdot I_r / \mu \quad [A/m] \quad (2)$$

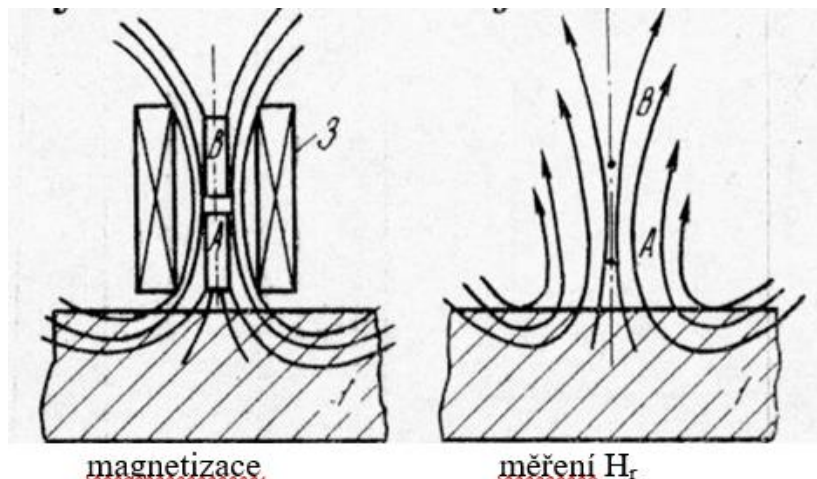
kde:

Ndemagnetizační činitel, který závisí na tvaru kontrolovaného povrchu

I_rremanentní polarizace

μpermeabilita prostředí

Ke zmagetování se používá příložná silová cívka a působí na něj impulsní magnetické pole o intenzitě H_0 (viz. obr. 4). Snímačem může být Hallova nebo Försterova sonda. Použitý přístroj Doména používá Hallovu sondu.



Obr. 4 – Vznik magnetické skvrny pomocí magnetizační cívky – A-B snímač H_r , 3 magnetizační cívka, šrafovaná část feromagnetikum [3]

Hallova sonda je elektronická součástka, která se používá pro měření magnetického pole či jiné veličiny převedené na magnetické pole, nebo pro různé snímače, kde je použit permanentní magnet.

Přístrojem Doména B3 (resp. B2) je možné měřit různé veličiny, ať už zbytkový magnetismus nebo tvrdost, a měnit intenzitu magnetizace. Z praktických zkušeností bylo zjištěno, že martenzitická struktura vykazuje nižší hodnoty než sorbitická a lze indikovat hloubky vrstev až 6 mm při nastavení stupně magnetizace M3 a M4 z osmi možných. Pro výpočet mechanických vlastností bylo potřeba zadat do paměti přístroje předem stanovené konstanty A a B pro následné dosazení do rovnice: [3]

$$C = A \cdot M + B \quad (3) \quad [3]$$

Před měřením je třeba nastavit z paměti korekční konstanty nebo sondu zkalibrovat pomocí známého etalonu, což bude případ dílů v praktické části. [4]



Obr. 5 – Doména B3 – součástí přístroje je válcová sonda s Hallovým snímačem v ose plochého čela, který detekuje zbytkový magnetismus M

3 Experiment

Při měření bylo nutné vzít v úvahu zakřivení jednotlivých měřených ploch, protože má vliv na konečné vyhodnocení. Z toho důvodu byly stanoveny matematické závislosti pro jednotlivé funkční části zvlášť.

Níže v textu jsou uvedena označení:

$M1 [k_{\text{onst}} \cdot \text{A/m}]$ – 1.měření – zmagnetování panenského materiálu

$M2 [k_{\text{onst}} \cdot \text{A/m}]$ – 2.měření – opakované měření bezprostředně po 1.měření

$dM = M1 - M2 [k_{\text{onst}} \cdot \text{A/m}]$ – rozdíl jednotlivých měření pro matematickou závislost a další vyhodnocení

$\delta M1 = dM/M1 [-]$ – matematická závislost pro první měření

$\delta M2 = dM/M2 [-]$ – matematická závislost pro opakované měření

$L_{\text{mp}} [\text{mm}]$ – matematické vyhodnocení hloubky prokalení

3.1 Stanovení intenzity magnetizace

Nejprve bylo nutné zvolit intenzitu magnetizace. Volba intenzity byla provedena na vzorcích cementovaných a vačkových hřídelích, kde je po zakalení dosaženo rovnoměrné vrstvy prokalení právě vlivem předchozí cementace (viz. obrázek 6).

Byly vyhodnoceny pro konkrétní funkční plochy matematické závislosti hloubek prokalení na zbytkovém magnetismu – tyto závislosti zde nejsou uvedeny.



Obr. 6 - Prokalení – příčný průřez vačkou – rovnoměrné indukční zakalení cementované vrstvy po obvodu

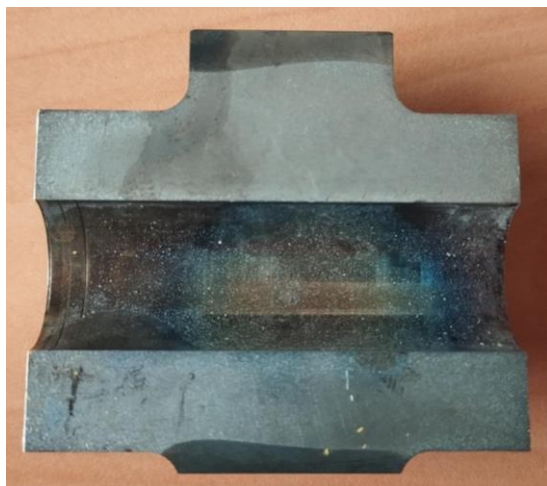
Jak je možné vidět v tabulce 2, nejvyšší korelační koeficient má stupeň magnetizace s intenzitou 3.

Tabulka 2 – Korelační koeficienty pro nastavení intenzity magnetizace

	R^2	M1	M2	dM	$\delta M1$	$\delta M2$
Magnetizace stupeň 1	Ložiska	0,2956	0,1324	0,6324	0,8708	0,8694
	Válec vačky	0,7913	0,7573	0,7626	0,7331	0,638
	Palec vačky	0,9547	0,9701	0,874	0,7629	0,7634
	Čep bez kalení	0,807	0,8033	0,6941	0,8392	0,8335
Magnetizace stupeň 3	Ložiska	0,9493	0,877	0,9579	0,8466	0,8443
	Válec vačky	0,9838				
	Palec vačky	0,5733	0,4415	0,944	0,8029	0,8035
Magnetizace stupeň 6	Ložiska	0,9265	0,9163	0,8848	0,7937	0,7896
	Palec vačky	0,6903	0,6299	0,9357	0,2759	0,2747
	Čep bez kalení	0,9596	0,9649	0,6201	0,5057	0,4992

3.2 Získání matematické závislosti pro indukčně kalené vačkové hřídele Tedom

Následně byly provedeny kroky k získání závislosti hloubky prokalení a zbytkového magnetismu. Došlo ke změření zbytkového magnetismu vačkového hřídele Tedom s intenzitou magnetizace stupně 3, následně byl vačkový hřídel rozřezán a získány skutečné hodnoty hloubek prokalení.



Obr. 7 – Rozříznutá část vačky Tedom – podélný řez - průběh prokalení na palci a válcové ploše

Regresní analýzy dat měření zbytkového magnetismu z interních zpráv Tedom

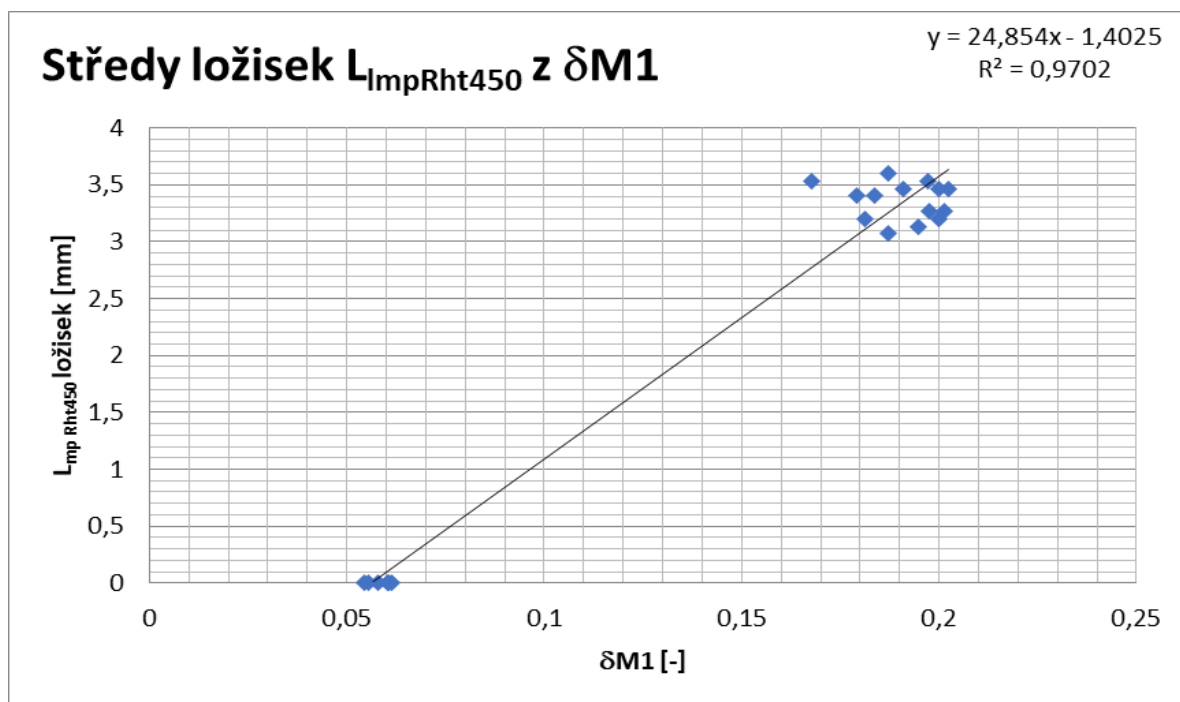
Zjištění závislostí vycházelo ze získaných dat u jednotlivých přejímek vačkových hřídelů při vstupní kontrole po kalení u externího poskytovatele. Na základě těchto dat byly získány matematické závislosti a jejich korelační koeficienty. Podle tabulky 3 byly uvedeny jen grafy s nejvyšším korelačním koeficientem pro každou závislost, což je zároveň i matematická

závislosti, kterou je možné použít pro nedestruktivní kontrolu hloubky prokalení přístrojem Doména B2 ve společnosti Tedom.

Tabulka 3 – Korelační koeficienty pro konkrétní závislosti

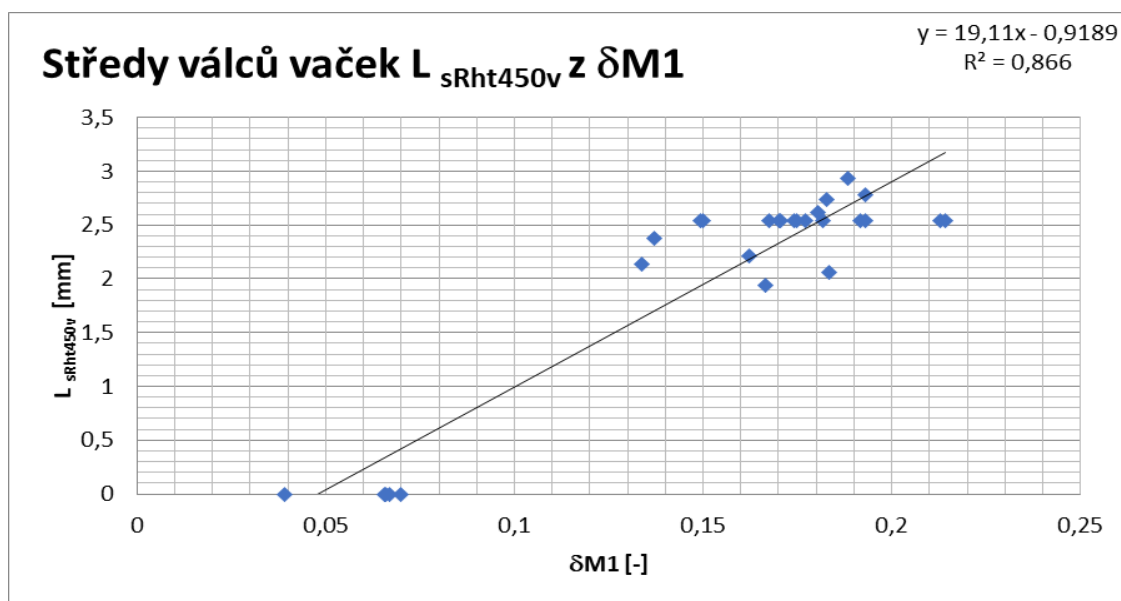
Část vačky	R ²	M1	M2	dM	δM1	δM2
Ložisko	oko mp	0,1254	0,8473	0,9573	0,9694	0,9633
	oko s			0,9321	0,9547	0,9513
	Rht450mp				0,9702	
Válcové plochy vaček	oko mp	0,2124	0,7441	0,7776	0,824	0,8076
	oko s			0,8618	0,865	0,8403
	Rht450mp				0,866	
Palce sacích vaček	oko mp	0,215	0,6021	0,9004	0,95	0,9423
	oko s			0,8847	0,9404	0,9394
	Rht450mp				0,9509	
Palce výfukových vaček	oko mp	0,4331	0,813	0,9063	0,9535	0,9496
	oko s	0,4427	0,8163	0,8938	0,9445	0,9394
	Rht450mp				0,9586	

Závislost pro hloubku prokalení ve středu ložisek váčkových hřídelí $L_{\text{impRht450}}$



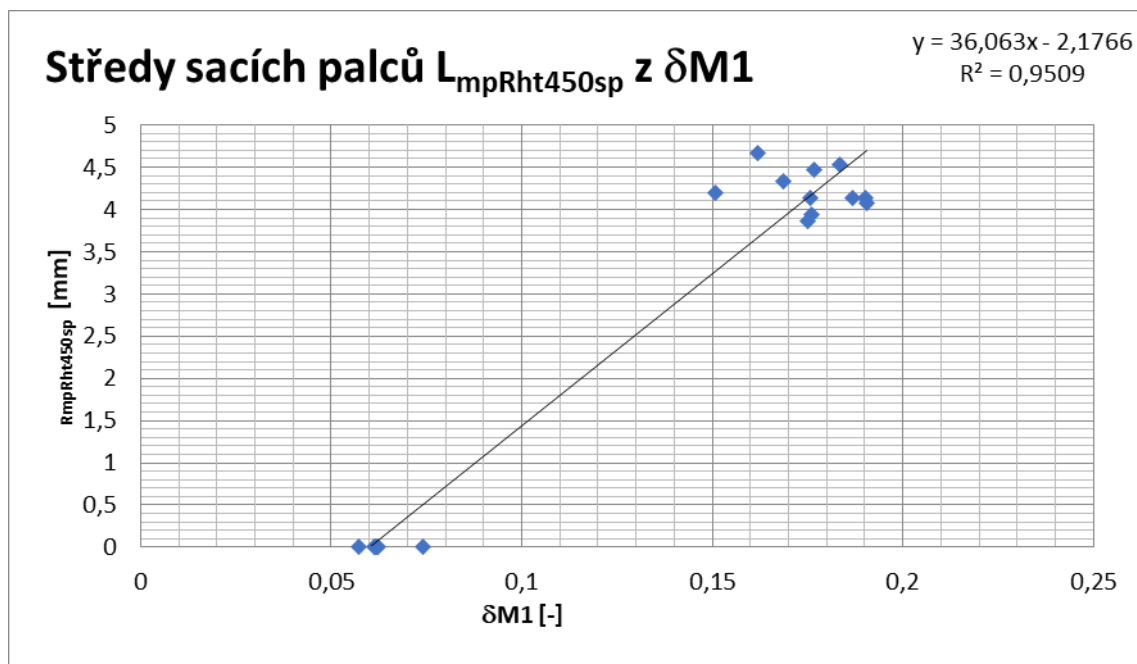
Graf 1 – Hloubka prokalení ložisek v závislosti na $\delta M1$

Závislost pro hloubku prokalení ve středu válcových ploch vaček $L_{\text{vmpRht450}}$



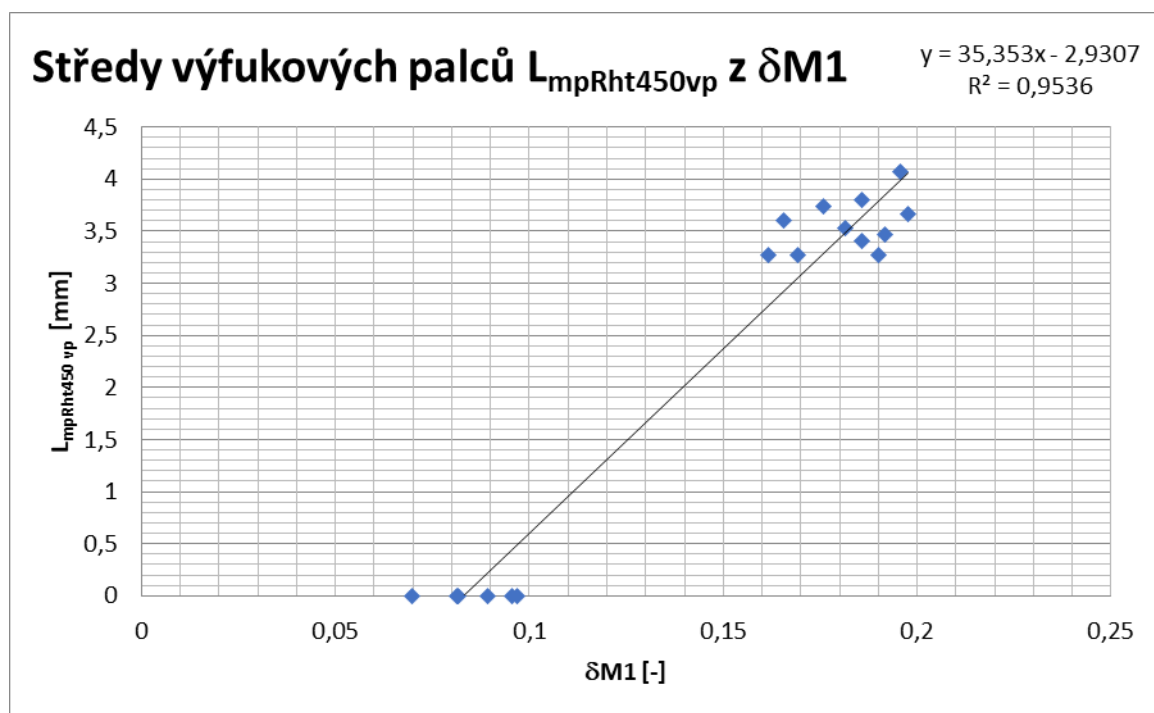
Graf 2 – Hloubka prokalení válcových ploch vaček v závislosti na $\delta M1$

Závislost pro hloubku prokalení ve středu palců sacích vaček $L_{\text{vmpRht450}}$



Graf 3 – Hloubka prokalení sacích vaček v závislosti na $\delta M1$

Závislost pro hloubku prokalení ve středu palců výfukových vaček $L_{\text{vmpRht450}}$



Graf 4 – Hloubka prokalení výfukových vaček v závislosti na $\delta M1$

4 Závěr

Získané výsledné matematické závislosti mohou firmě Tedom ušetřit nemalé peníze i čas. Aktuální náklady kontroly prokalení jednoho vačkového hřídele jsou sice 30.000 Kč (rozřezání dílu + cena samotného dílu), ale nejsou zde zahrnuty náklady na přípravu jednotlivých vzorků, manipulaci s dílem, náklady kontrolního technika, který analýzu vykonává ve své pracovní době a následné vyhodnocení. V porovnání s jinými možnostmi – externí analýza na vysoké škole za 180.000Kč, přístroje firem Förster či ATG přes milion korun – se možnost využít stávající přístroj Doména B2 přímo nabízí. Náklady i čas by se rapidně snížily.

Jedním z nejdůležitějších poznatků bylo, že kontrolovat se musí pouze povrch dříve nezmagnetovaný. V případě magnetického ovlivnění povrchu – vícekrát zmagnetované místo, kontrola po magnetické kontrole na trhlínky – nebudou naměřená data správná.

Jsou zde určitá pravidla, které je nutné dodržet nebo je vzít v úvahu:

- kalibrace/nastavení přístroje pomocí etalonu a její ověření
- první i druhé měření provést na identickém místě – se sondou nehýbat
- hrana ovlivní zbytkový magnetismus
- každá plocha má své matematické vyhodnocení
- NELZE MĚŘIT MAGNETICKY OVLIVNĚNÝ POVRCH!!!

Ideální by bylo vytvořit kontrolní návodku pro přesný postup kontroly přístrojem Doména B2.

Literatura

- [1] Wikipedie – <https://cs.wikipedia.org/>
- [2] Nauka o materiálu I., II. – Luděk Ptáček a kolektiv, CERM s.r.o.
- [3] Metoda magnetické skvrny (teze profesorské přednášky) – Doc. Ing. B. Skrbek, CSc. (ISBN 978-80-7372-428-3)
- [4] Příspěvek ke kalibraci přístrojů řady DOMENA – Doc. Ing. B. Skrbek, CSc., Pavel Lhoták, Michal Flanderka – příspěvek NDE for Safety / DEFEKTOSKOPIE 2011