

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

**PŘÍPRAVEK NA TOPOGRAFII KALENÝCH
A TVRZENÝCH VRSTEV NEDESTRUKTIVNÍMI METODAMI**

**PREPARATION FOR TOPOGRAPHY OF HARDENED
AND CURED LAYERS BY NON-DESTRUCTIVE METHODS**

KMT – 271

Bc. Ondřej Růžička

Vedoucí práce: **doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.**

Počet stran: 64
Počet tabulek: 11
Počet obrázků: 37
Počet grafů: 1
Počet příloh: 9

V Liberci 27.5.2011



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu

Studijní rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Bc. Ondřej R Ů Ž I Č K A
studijní program	N2301 Strojní inženýrství
obor	2303 T 002 Strojírenská technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Přípravek na topografii kalených a tvrzených vrstev nedestruktivními metodami

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se strukturou - kalených i jinak tvrzených vrstev, přechodových zón a podkladového materiálu a metodami jejich zkoušení.
2. Navrhněte polohovací přípravek snímačů NDT průběhu (topografii) vrstev ultrazvukovými, magnetickými a metodami vířivých proudů
3. Pro funkční vzorek přípravku stanovte postup kontroly konkrétní strojní součásti
4. Formulujte další vývoj k automatizované kontrole řízené PC.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 30 - 50 stran

- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Ptáček a kol. Nauka o materiálu II. CERM s.r.o., Brno 2002. ISBN 80-7204-348-3
- [2] Kopec. B, a kol. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. CERM akademické vydavatelství, Brno, 2008, ISBN-978-80-7204-591-4
- [3] Růžička, O. Nedestruktivní měření hloubky a tvrdosti povrchově kalených vrstev. Bakalářská práce KMT-B-138, TU v Liberci ,2008.

Vedoucí diplomové práce:

doc.Ing. Břetislav Skrbek,CSc.

Konzultant diplomové práce :

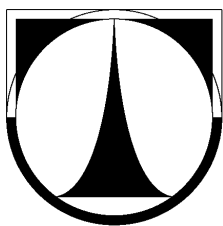
L.S.

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
vedoucí katedry

Doc.ing. Malý Miroslav,CSc.
děkan

V Liberci dne 04.10. 2010

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

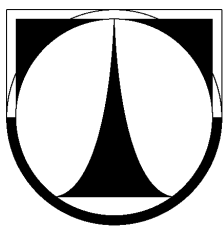
ANOTACE

OBOR:	2303 T 002 Strojírenská technologie
ZAMĚŘENÍ:	Materiálové inženýrství
AUTOR:	Bc. Ondřej Růžička
TÉMA PRÁCE:	Přípravek na topografii kalených a tvrzených vrstev nedestruktivními metodami
ČÍSLO PRÁCE:	KMT – 271
VEDOUcí PRÁCE:	doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku a možnosti využití nedestruktivního zkoušení při určování topografie zakalených vrstev strojních součástí. Pro zaručení opakované přesnosti a reprodukovatelnosti měření těmito metodami zde byl navržen a zkonstruován ruční polohovací přípravek pro upnutí a polohování měřících snímačů a přesné ustavení měřené strojní součásti. Jako charakteristická součást pro měření byla zvolena vačková hřídel rozvodu motoru TEDOM. Pro aplikaci při běžné denní kontrole ve strojírenském podniku je také součástí této práce předběžný návrh automatizovaného polohovacího přípravku řízeného přes počítač.

Klíčová slova:

nedestruktivní zkoušení, povrchové kalení, hloubka zakalení, topografie, ultrazvuk, magnetické metody, vačková hřídel, polohovací přípravek



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

ANNOTATION

SPECIALIZATION:	2303 T 002 Engineering technology
FOCUSING:	Material engineering
AUTHOR:	Bc. Ondřej Růžička
SUBJECT OF THE WORK:	Preparation for topography of hardened and cured layers by non-destructive methods
NUMBER OF THE THESIS:	KMT – 271
LEADER OF THE WORK:	doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

The work for this diploma focuses on the topic and possibility of using non-destructive testing for the determination of topography of hardened layers of engine parts. To ensure repeated accuracy and reproducibility of measurement by these methods, a manual positioning preparation was designed and constructed to fix and position the measuring equipment and to precisely fit the measured engine part into position. For this work I used a cam-shaft from engine TEDOM as a typical engine part. Applying this method for regular daily checks in an engineering company, I also included a preliminary design of the computer operated automatic positioning preparation.

Keywords:

non-destructive testing, surface hardening, depth of hardening, topography, ultrasound, magnetic methods, cam-shaft, positioning preparation

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Chtěl bych především poděkovat panu doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za odborné vedení a rady týkající se mé diplomové práce. Dále také děkuji panu Ing. Davidu Bílkovi za pomoc při měření ultrazvukovou metodou a panu Ing. Václavu Kubičkovi za rady ohledně metalografických výbrusů. Velké poděkování také patří panu Ing. Alexandru Popovovi ze společnosti STARMANS Electronics, s.r.o. za pomoc při zprovoznění ultrazvukového přístroje DIO 2000 – 1CH. Děkuji také panu Ing. Marcelu Horákovi, Ph.D. za kontrolu výpočtové zprávy automatizovaného polohovacího přípravku.

Bc. Ondřej Růžička

Obsah:

Použité zkratky a symboly	9
1. Úvod.....	11
2. Cíle práce.....	11
3. Teoretická část.....	12
3.1. Kalení	12
3.1.1. Princip a účel kalení	12
3.1.2. Kalící teploty	12
3.1.3. Struktura vznikající po kalení – Martenzitická přeměna	13
3.1.4. Struktura vznikající po kalení – Bainitická přeměna	15
3.1.5. Druhy kalení.....	16
3.1.6. Ochlazovací prostředí, druhy ochlazovacích médií	17
3.2. Povrchové kalení	18
3.2.1. Princip povrchového kalení.....	18
3.2.2. Kalící teploty povrchového kalení	19
3.2.3. Druhy povrchového kalení	19
3.3. Destruktivní metody měření hloubky zakalení	21
3.4. Nedestruktivní metody měření hloubky zakalení.....	23
3.4.1. Ultrazvuková metoda – UT	23
3.4.2. Metoda magnetického bodového pólu – MT	28
3.4.3. Metoda vířivých proudů - ET.....	30
4. Praktická část.....	32
4.1. Návrh polohovacího přípravku snímačů pro nedestruktivní topografii zakalených vrstev	32
4.1.1. Uložení měřené součásti v polohovacím přípravku	33
4.1.2. Nastavení váček váčkové hřídele do přesné měřicí polohy	34
4.1.3. Upnutí měřicí sondy v polohovacím přípravku.....	35
4.1.4. Pohyblivost měřicí sondy v polohovacím přípravku.....	36
4.1.5. Odměřování souřadnic a úhlů v polohovacím přípravku	38
4.1.6. Doplnující údaje navrhnutého polohovacího přípravku.....	38
4.2. Topografie zakalených vrstev s využitím destruktivní metody	39
4.2.1. Současný stav určování topografie zakalených vrstev na váčkové hřídeli rozvodu motoru	39

4.2.2.	Topografie zakalených vrstev destruktivní metodou u ložisek vačkové hřídele rozvodu motoru	40
4.3.	Topografie zakalených vrstev s využitím nedestruktivních metod a polohovacího přípravku	42
4.3.1.	Volba nedestruktivní metody měření	42
4.3.2.	Možnosti aplikace ultrazvukové metody při topografii zakalených vrstev vačkové hřídele rozvodu motoru.....	44
4.3.3.	Možnosti aplikace metody magnetického bodového pólu při topografii zakalených vrstev vačkové hřídele rozvodu motoru	50
4.4.	Návrh automatizovaného polohovacího přípravku pro topografii zakalených vrstev nedestruktivními metodami	54
4.4.1.	Pohyblivost automatizovaného přípravku	54
4.4.2.	Zjednodušený návrh řízení automatizovaného polohovacího přípravku	55
4.4.3.	Předběžná cenová kalkulace automatizovaného polohovacího přípravku	57
5.	Diskuze.....	58
6.	Závěr.....	60
	Použitá literatura	62
	Seznam příloh.....	64

Použité zkratky a symboly

NDT metody	-	nedestruktivní metody
M_s	-	martenzit start [$^{\circ}\text{C}$]
M_f	-	martenzit finish [$^{\circ}\text{C}$]
M_j	-	množství jehlicovitého martenzitu [%]
M_d	-	množství deskového martenzitu [%]
C	-	obsah uhlíku [%]
A_z	-	množství zbytkového austenitu [%]
h	-	hloubka prohřáté vrstvy [m]
ρ	-	specifický elektrický odpor [$\Omega\cdot\text{m}$]
f	-	frekvence [Hz]
μ	-	permeabilita [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
HRC	-	tvrdost dle Rockwella
HV	-	tvrdost dle Vickerse
HB	-	tvrdost dle Brinella
a	-	okamžitá výchylka polohy [m]
A	-	amplituda výchylky [m]
ω	-	kruhová frekvence [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
x_1	-	souřadnice polohy [m]
c	-	rychlost šíření vlny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
t	-	čas [s]
α	-	úhel dopadu podélné vlny v prostředí 1 [$^{\circ}$]
β	-	úhel příčné vlny v prostředí 2 [$^{\circ}$]
γ	-	úhel příčné vlny v prostředí 1 [$^{\circ}$]
δ	-	úhel podélné vlny v prostředí 2 [$^{\circ}$]
c_L	-	rychlost šíření podélných vln [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
c_T	-	rychlost šíření příčných vln [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
&	-	koeficient útlumu [$\text{dB}\cdot\text{mm}^{-1}$]
ΔV_s	-	změna zesílení vlivem útlumu ultrazvuku [dB]
d	-	tloušťka materiálu [mm]
TOF	-	the time of flight - doba letu [s]
UT	-	ultrazvukové zkoušení
MT	-	magnetické zkoušení

ET	-	metody zkoušení vířivými proudy
H_r	-	intenzita zbytkového magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
H_0	-	intenzita vnějšího magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
I_r	-	zbytková polarizace [T]
N	-	demagnetizační činitel [-]
s	-	hloubka průniku proudů [m]
μ_0	-	permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$]
μ_r	-	relativní permeabilita [-]
σ	-	měrná elektrická vodivost [$A^2 \cdot s^3 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-3}$]
H_p	-	magnetické pole magnetizačního proudu primární cívky [$A \cdot m^{-1}$]
H_s	-	sekundární magnetické pole vířivých proudů [$A \cdot m^{-1}$]
x, y, z	-	osy přímočarých pohybů
α_1	-	úhel naklonění sondy ke zvýraznění echa [°]
α_2	-	úhel regulace nepřesně nastavené sondy [°]
M_{etalon}	-	pevně daná hodnota magnetizace etalonu [$A \cdot m^{-1}$]
M_{etalon} změřená	-	změřená hodnota magnetizace etalonu [$A \cdot m^{-1}$]
dM	-	rozdíl hodnot první a druhé magnetizace [$A \cdot m^{-1}$]
M_1	-	magnetizace při prvním měření [$A \cdot m^{-1}$]
M_2	-	magnetizace při druhém měření [$A \cdot m^{-1}$]
M_{1kor}	-	korigovaná magnetizace při prvním měření [$A \cdot m^{-1}$]
M_{2kor}	-	korigovaná magnetizace při druhém měření [$A \cdot m^{-1}$]
h_1	-	hloubka zakalení středu ložiska [mm]
Δh	-	odchylka vypočtené hodnoty hloubky zakalení středu ložiska od skutečné hodnoty [mm]
Δh_r	-	relativní chyba výpočtu hloubky zakalení středu ložiska [%]
r	-	Pearsonův korelační koeficient [-]

1. Úvod

Na vyráběné strojní součásti jsou kladeny stále vyšší požadavky týkající se jejich maximální bezpečnosti a spolehlivosti. Ke splnění těchto požadavků je třeba strojní součásti podrobit náročnému zkoušení jejich vlastností. Toto zkoušení ale velmi často mívá destruktivní podobu, kdy je součást při zkoušení částečně poškozena, či dokonce zcela zničena. Z důvodu úspory materiálu výrobku je proto snaha nahradit běžně užívané destruktivní zkoušky strojních součástí zkouškami nedestruktivními (NDT). Zároveň je ale nesmírně obtížné správně zvolit nedestruktivní metodu zkoušení tak, aby byla funkční a byla dodržena přesnost a reprodukovatelnost měření.

2. Cíle práce

Tato diplomová práce se zabývá problematikou využití nedestruktivního zkoušení při určování topografie zakalených vrstev strojních součástí. Přestože je povrchové kalení nejefektivnější způsob zvýšení kontaktní únosnosti a meze únavy strojních součástí, je doposud nutno při kontrole správného průběhu zakalených vrstev součást rozřezat.

K vyřešení tohoto problému je zde proto snaha aplikovat nedestruktivní metody zkoušení. Jedná se především o ultrazvukové a magnetické metody. A protože je nutné dodržet požadovanou přesnost a reprodukovatelnost měření, bude také součástí této práce navrhnout a vyrobit přípravek na upevnění a polohování měřících snímačů pro tyto metody a přesné ustavení zkoušené strojní součásti. Jako zkoušená součást zde bude využita vačková hřídel rozvodu motoru TEDOM.

Pro aplikaci při běžné denní kontrole ve strojírenském podniku bude také proveden předběžný návrh automatizovaného polohovacího přípravku řízeného přes počítač.

3. Teoretická část

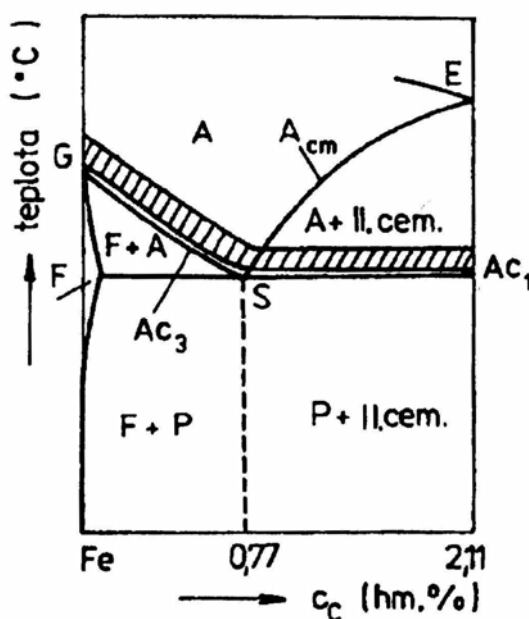
3.1. Kalení

3.1.1. Princip a účel kalení

Principem kalení je ohřev materiálu (nejčastěji oceli) těsně nad překrystalizační teploty, krátká výdrž, a poté rychlé ochlazení tak, aby bylo zabráněno rovnovážné překrystalizaci úplně nebo alespoň z části. Hlavním účelem využití tohoto tepelného zpracování je zvýšení tvrdosti materiálu, dochází však také ke snížení houževnatosti. [1]

3.1.2. Kalící teploty

Jak již bylo výše uvedeno, kalící teplota, při níž je ocel před kalením austenitizována, je volena těsně nad teplotou překrystalizace. Pásmo kalících teplot uhlíkové oceli zachycuje obr. 1. Podeutektoidní oceli mívají kalící teploty 30 – 50°C nad A_{C3} a nadeutektoidní oceli 30 – 50°C nad A_{C1} . [2]

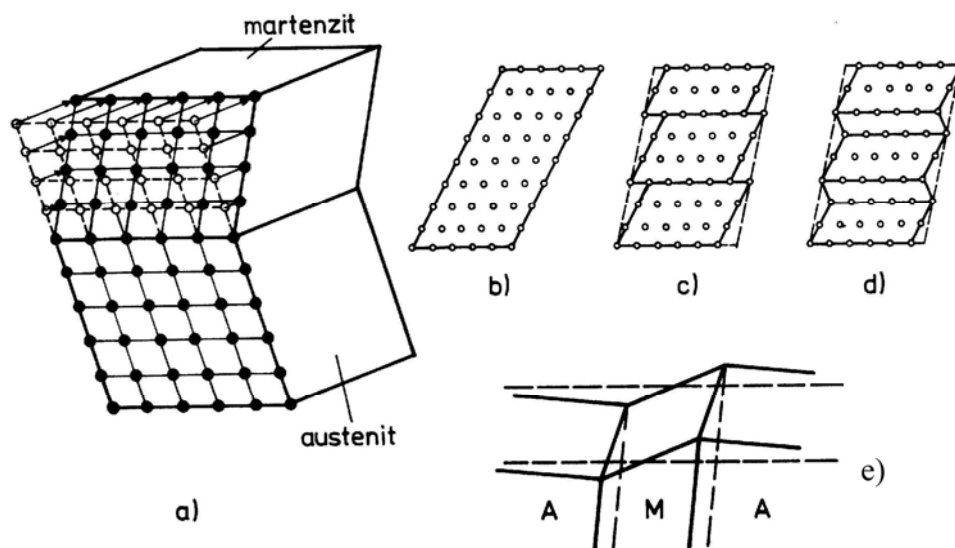


Obr. 1 – Pásmo kalících teplot v diagramu Fe–Fe₃C [3]

Zvyšováním kalící teploty nad znázorněné pásmo může dojít při austenitizaci k hrubnutí zrna austenitu a po zakalení také k hrubozrnné struktuře, jež bude mít horší výsledné mechanické vlastnosti. Proto je třeba vždy správně dodržet předepsané kalící teploty.

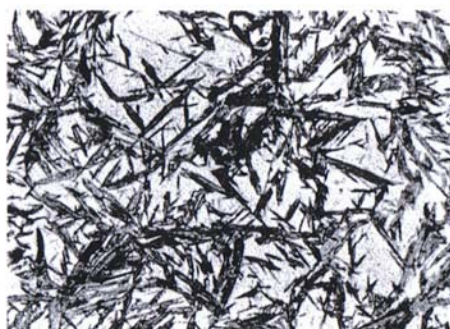
3.1.3. Struktura vznikající po kalení – Martenzitická přeměna

Pokud dojde k dostatečně rychlému ochlazení uhlíkové oceli z kalících teplot do oblasti teplot, kde dochází k potlačení difúze intersticiálních a substitučních atomů, tak začíná ve struktuře vznikat bezdifúzní přeměnou nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Tento tuhý roztok je nazván martenzit podle zakladatele moderní metalografie Martenze. Má tetragonální tělesně středěnou mřížku. Tetragonalitu mřížky ovlivňuje především obsah uhlíku v martenzitu a to tak, že s rostoucím obsahem uhlíku se tetragonalita přibližně lineárně zvětšuje. Atomy uhlíku intersticiálně umístěné v mřížce mají výrazný zpevňující účinek, a proto s rostoucím obsahem uhlíku roste i pevnost a tvrdost martenzitu. Někdy bývá také martenzitická přeměna nazývána jako stříhová přeměna, neboť svou povahou je podobná plastické deformaci (viz obr. 2).



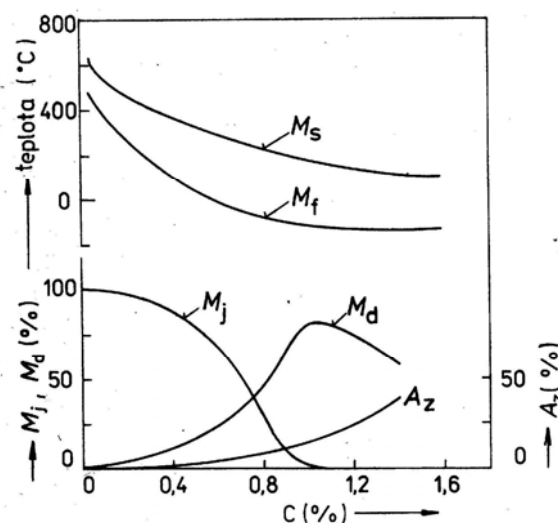
Obr. 2 – Schéma martenzitické přeměny – a,b) homogenní deformace, c) nehomogenní deformace skluzem, d) nehomogenní deformace dvojčatěním, e) deformace povrchu

Pro vlastní přeměnu je důležitá homogenní deformace, kterou je vytvořen krystal martenzitu. Napětí, které vzniká při odporu prostředí proti změně objemu, vyvolá následně druhotnou nehomogenní deformaci a dochází k dosažení konečného tvaru krystalu. Dodatečná nehomogenní plastická deformace probíhá skluzem nebo dvojčatěním. Skluzem vzniká martenzit dislokační s jehlicovitou morfologií a dvojčatěním martenzit dvojčatový s deskovitou morfologií. Prvně zmiňovaný typ martenzitu má vyšší pevnost, ale nižší houževnatost. [2]



Obr. 3 – Struktura nadeutektoidní oceli po zakalení z teploty nad A_{Cm} (zvětšeno 500x) [2]

Na obr. 3 je struktura zakalené nadeutektoidní oceli. Na této hrubozrnné struktuře je patrné, že byla zvolena velmi vysoká austenitizační teplota a došlo ke zhrubnutí austenitického zrna. Jsou zde velmi hrubé jehlice martenzitu a zbytkový austenit. Jeho množství může být od 5% do 30%. Ve struktuře je tato fáze velmi nevhodná, protože způsobuje změnu rozměrů. Pro jeho odstranění bývá často využíváno kalení se zmrazováním, kde je součást ochlazena hluboko až pod konec martenzitické přeměny M_f . [2]



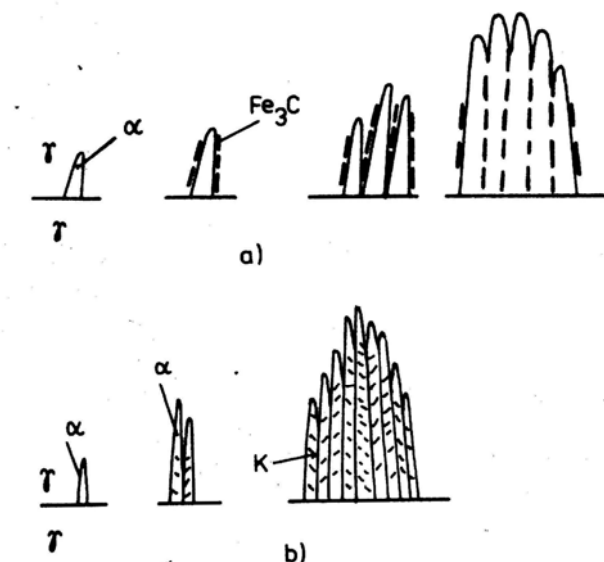
Obr. 4 – Vliv obsahu C na teploty M_s a M_f a na množství jehlicovitého martenzitu (M_j) a deskového martenzitu (M_d) [2]

Křivky na obr. 4 zachycují, jaký má vliv obsah uhlíku na polohu křivek počátku a konce martenzitické přeměny. Je zde patrný pokles teplot M_s , M_f a zvyšující se množství zbytkového austenitu A_z s rostoucím obsahem uhlíku. Dále je zde dobře vidět, jak se mění typ martenzitu v závislosti na obsahu uhlíku. S nižším obsahem uhlíku vzniká nejprve martenzit

jehlicovitý. Po dosažení procentuálního množství uhlíku okolo eutektoidního bodu začíná postupně převládat dvojčatový martenzit s deskovou morfologií.[2]

3.1.4. Struktura vznikající po kalení – Bainitická přeměna

Rozpadem přechlazené austenitické struktury za nižších teplot pod 550°C a počátkem martenzitické přeměny M_s vzniká nelamelární feriticko-karbidická směs zvaná bainit. Pojmenována byla podle Edgara Baina, jenž popsal mechanismus jeho vzniku. Při přeměně zde dochází k transformaci plošně středěné mřížky železa γ na tělesně středěnou mřížku železa α . U bainitické přeměny lze dosáhnout dvou základních druhů bainitu. Výsledná struktura je závislá na teplotě a chemickém složení austenitu. U ocelí s obsahem uhlíku nad 0,6% vyniká bainit horní a to v rozmezí teplot od 550°C do přibližně 350°C . Tvorba dolního bainitu začíná od 350°C až do M_s . Na obr. 5 je vyobrazeno schéma tvorby bainitu. [2]

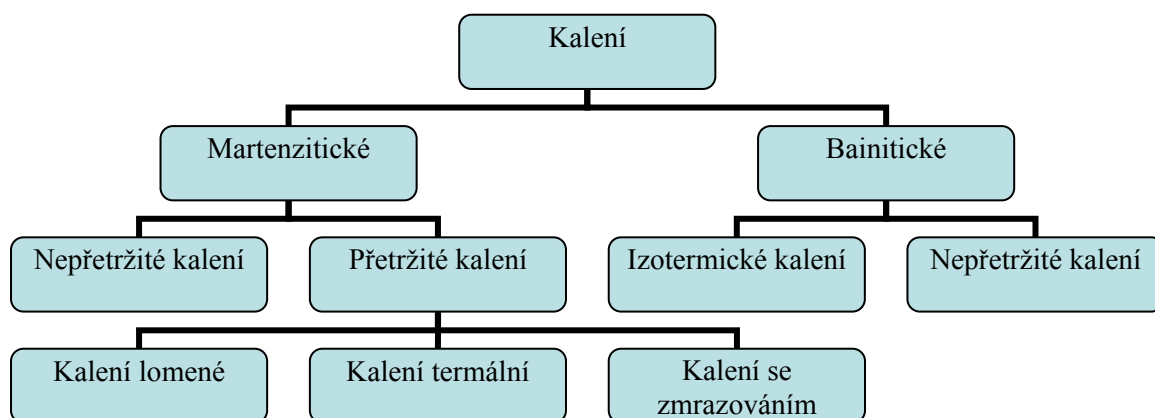


Obr. 5 – Schéma vzniku bainitu u středně uhlíkové oceli – a) vznik horního bainitu; b) vznik dolního bainitu; α - bainitický ferit; γ - austenit; K – karbid ϵ , popřípadě cementit [2]

U horního bainitu se nejprve vytvoří feritické jehlice od hranice zrna austenitu. Při růstu tohoto feritu se zvýší obsah uhlíku na mezifázovém rozhraní austenitu a feritu. Dochází zde k precipitaci cementitu. Výsledná struktura horního bainitu se jeví jako jehlicovitá. Naopak struktura dolního bainitu je tvořena deskami bainitického feritu rostoucích opět od hranic austenitických zrn. Výrazným přesycením desek dojde k precipitaci nejprve karbidu ϵ a později cementitu. [2]

3.1.5. Druhy kalení

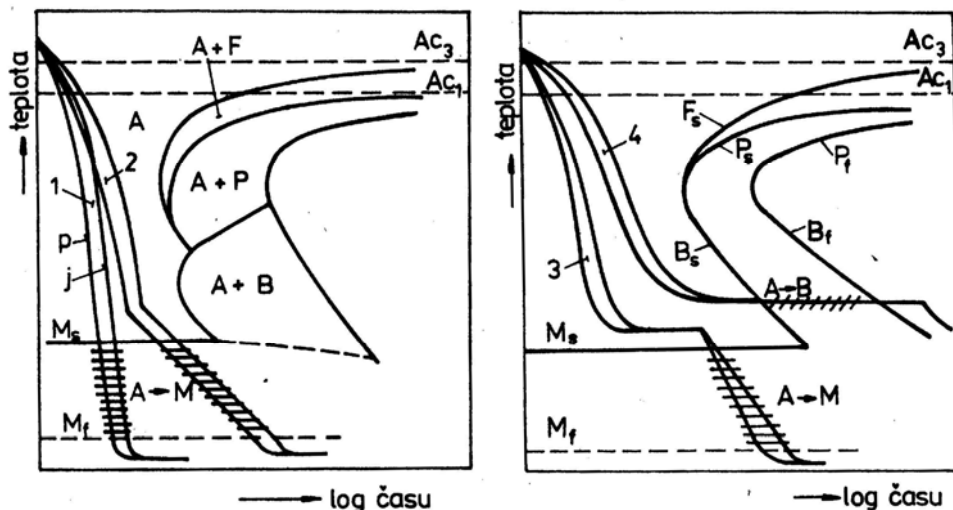
Správná volba druhu kalení velmi výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti kaleného předmětu. Martenzit je charakteristický svou vysokou tvrdostí a nízkou houževnatostí. Naopak bainit má nižší tvrdost než martenzit, ale ponechává si alespoň částečnou houževnatost oproti martenzitu. Právě proto můžeme kalení rozdělit dle druhu vzniklé struktury na kalení martenzitické a bainitické (viz obr. 6). První jmenované již v dnešní době výrazně převládá. [3]



Obr. 6 – Druhy kalení

Martenzitické kalení nepřetržité, jinak také nazývané kalení základní nebo kalení do studené lázně, je nejjednodušším způsobem, jak ve výsledné struktuře dosáhnout zastoupení martenzitu. Velikou nevýhodou tohoto způsobu kalení je velké vnitřní pnutí s případným vznikem trhlin nebo deformací kalené součásti. Proto byly vyvinuty jiné způsoby, které se tyto nedostatky snaží alespoň částečně eliminovat.

Cílem martenzitického přetržitého kalení je snaha snížit vnitřní napětí. První druh přetržitého kalení je lomené kalení, které využívá změny intenzity ochlazování při přechodu přes oblast počátku martenzitické přeměny. Přetržité termální kalení využívá izotermickou výdrž nad M_s k vyrovnání teplot jádra a povrchu kalené součásti. Nesmí však dojít k překročení počátku bainitické přeměny. Výsledkem je martenzitická struktura s nižším vnitřním napětím. Posledním způsobem přetržitého kalení je kalení se zmrazováním, kde prudkým snížením teploty až do hodnot pod konec martenzitické přeměny dojde ke snížení obsahu zbytkového austenitu. [4]



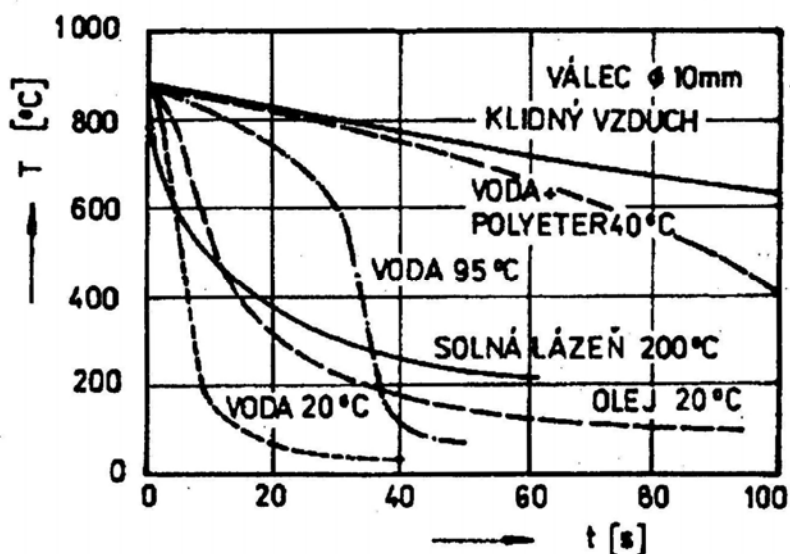
Obr. 7 – Způsoby kalení – 1) Martenzitické nepřetržité kalení; 2) Lomené kalení; 3) Termální kalení; 4) Izotermické kalení; p – povrch součásti; j – jádro součásti [2]

Jako nejběžnější způsob bainitického kalení je používáno kalení izotermické. Opět je zde využita izotermická výdrž nad teplotou M_s , ale až do ukončení přeměny austenitu na bainit. [4]

3.1.6. Ochlazovací prostředí, druhy ochlazovacích médií

Také kalící prostředí velmi výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti kalené součásti. Při ochlazování nejprve dochází k vytvoření plynového polštáře. Intenzita ochlazování velmi výrazně klesne. Po přechodu do další oblasti tzv. bublinového varu dochází k nejintenzivnějšímu odvodu tepla. Poslední etapou ochlazování je vedení v kapalině, kde opět dochází k poklesu odvodu tepla. Tato nerovnoměrná intenzita ochlazování je velmi problematická, proto je dnes kladen velký důraz na volbu kalícího média.

Velmi zásadním faktorem volby správného kalícího média se proto stává kritická rychlost ochlazování. Pro uhlíkové oceli bývá tato rychlost velmi vysoká, proto jsou zde využívána média s vysokou intenzitou ochlazování. Typickým příkladem je voda nebo vodní roztoky. Je to velmi levné medium, ekologicky přijatelné, nicméně voda sama nemá dobré kalící charakteristiky. [2]



Obr. 8 – Ochlazovací křivky ocelového válce Ø10mm pro různá kalicí media [3]

Dle obr. 8 je patrné, jaká je ochlazovací účinnost jednotlivých prostředí. Do vody je možné přidat různé přísady pro změnu intenzity ochlazování. Příkladem je kyselina sírová nebo různé druhy solí. Těmito postupy lze již částečně regulovat ochlazovací proces.

Oleje patří také mezi kalicí média s rychlostí ochlazování až čtyřikrát menší v perlitické oblasti. Při přechodu do oblasti tvorby martenzitu je tato rychlost dokonce až desetkrát menší. Proto pro součásti s minimálním vnitřním pnutím po zakalení je možno využít olej jako kalicí medium. Nevýhodou je možnost vznícení nebo špatná ekologická stránka.

S výrazným rozvojem polymerů se i tyto materiály začínají využívat ve formě roztoků s vodou jako kalicí média. Přináší možnosti velmi pružných kalících charakteristik a dalšího snížení vnitřních napětí.

Vzduch je nejmírnější ochlazovací prostředí, jehož účinek lze zvyšovat prouděním nebo případně kombinací s vodou, kdy vzniká tzv. vodní mlha. [3]

3.2. Povrchové kalení

3.2.1. Princip povrchového kalení

Jak již název napovídá, tento způsob tepelného zpracování je principiálně založen na zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy součásti a zároveň zachování houževnatosti jádra. Velmi rychlým ohřevem kalené součásti se dosáhne toho, že se nestihne prohřát jádro a dojde k zakalení pouze povrchu. Pokud je požadována tenká zakalená vrstva, využívá se rychlejší ohřev. Současně ale nesmí dojít ke spálení povrchu. Když je naopak vyžadována vrstva větší

tloušťky, je využit ohřev pomalejší, nicméně opět dostatečně rychlý na to, aby se neprohřálo jádro. [2]

3.2.2. Kalicí teploty povrchového kalení

Kalicí teploty při povrchovém kalení musí být vyšší než u běžného kalení a to běžně až o 200°C. Důvodem je právě rychlejší ohřev na tyto teploty. Takto prudkým nárůstem teplot dochází i ke vzrůstu teploty přeměny perlitu na austenit. S rostoucí rychlostí ohřevu roste i rychlost nukleace zárodků. Výsledná struktura je pak jemnozrnnější než u běžného kalení s nárůstem tvrdosti od 1 do 3 HRC. [2]

3.2.3. Druhy povrchového kalení

Rozeznáváme tři základní druhy povrchového kalení. Podle způsobu ohřevu na austenitizační teplotu je možno je rozdělit na:

- Kalení indukční
- Kalení plamenem
- Kalení energetickými svazky [5]

Indukční kalení využívá k ohřevu indukované proudy vznikající na induktoru. Induktorem procházející střídavý proud indukuje v kaleném předmětu magnetické pole a vznikají Foucaultovy vířivé proudy. Intenzita magnetického pole a hustota těchto proudů je nejvyšší na povrchu předmětu a Joulovým teplem je povrch ohříván. [2]

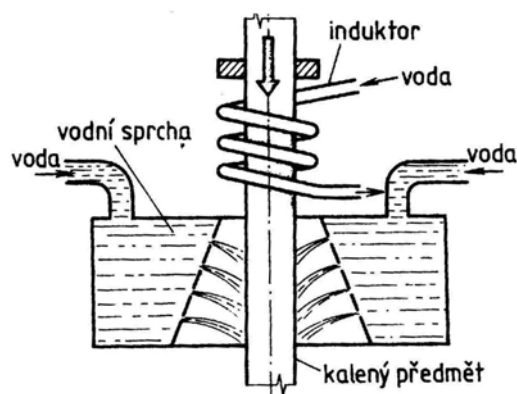
Pro hloubku prohřáté vrstvy platí vztah (1):

$$h = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}} \quad (1)$$

kde h [m] je hloubka prohřáté vrstvy, ρ [$\Omega \cdot m$] je specifický elektrický odpor, f [Hz] je frekvence střídavého proudu a μ [$H \cdot m^{-1}$] je permeabilita. [5]

Co se týče induktoru, tak to je spirálovitě vinutý vodič vyrobený nejčastěji z mědi. Tento vodič bývá dutý a je zevnitř chlazen protékající vodou. [2]

Schéma indukčního kalení rotačních součástí je na obr. 9. Jedná se o průběžný způsob kalení, kdy je povrch kalené tyče ohříván induktorem a poté prudce ochlazen vodní sprchou. Z obrázku je patrná snadná automatizovatelnost, nicméně tento způsob povrchového kalení vyžaduje vysoké pořizovací náklady, a proto se hodí spíše pro sériovou, či hromadnou výrobu. [6]

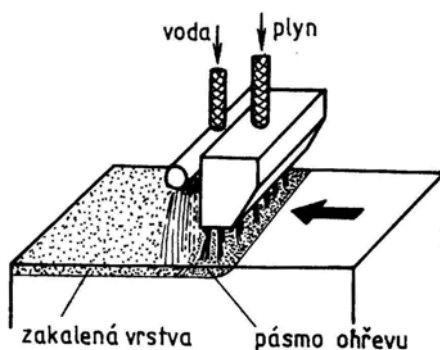


Obr. 9 – Schéma indukčního kalení rotačních součástí [6]

Druhým způsobem povrchového kalení je kalení plamenem. Povrchová vrstva kalené součásti je ohřívána teplem vznikajícím při hoření plynu. Nejčastěji se využívá směs kyslíku a acetylenu. Součástí speciálně uzpůsobeného hořáku může být i ochlazovací zařízení (sprcha), jenž ochladí kalený předmět po ohřátí povrchu. [2]

Kalení plamenem může být postupné nebo přerušované. U přerušovaného kalení dojde nejprve k ohřátí povrchu a po následném vypnutí hořáku je spuštěno ochlazovací zařízení.

U postupného kalení (obr. 10) ohřev a ochlazení kontinuálně za sebou navazují. [6]



Obr. 10 – Postupné kalení plamenem rovinných ploch [6]

Třetí a nejmodernější způsob povrchového kalení je kalení energetickými svazky. Jako zdroj ohřevu zde může být využit například laser. Laserové kalení využívá tento optický zdroj koncentrovaného světla k ohřátí povrchu. Výkon ohřevu je zde až dvacetkrát vyšší než u kalení plamenem. Ochlazovací zařízení zde není třeba, neboť tímto velmi rychlým ohřevem dojde k samozakalení povrchu. Výhodou tohoto způsobu je povrch bez okujení a snadná automatizovatelnost. Nevýhodou je velmi malá plocha ohřevu. Tu je ale možno zvětšit příčným skenováním paprsku. Také pořizovací cena je vysoká a lze dosáhnout jen menších hloubek zakalení.

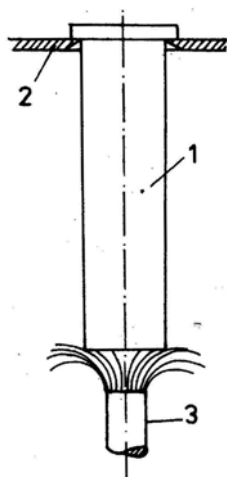
Dalšími možnými zdroji ohřevu u kalení energetickými svazky je elektronový paprsek nebo plazma. [5]

3.3. Destruktivní metody měření hloubky zakalení

Prvním, nenormalizovaným a spíše dílenským způsobem měření hloubky zakalení je metoda, kdy u rotačních povrchově kalených součástí je proveden řez v ose hřídele. Poté je plocha řezu broušena, leštěna a leptána. Dojde ke zviditelnění kalených a přechodových vrstev. Po přiložení měřidla na měřené místo v řezu lze orientačně odečíst hloubku zakalené vrstvy. Tento způsob měření hloubky zakalení bude využit v praktické části této práce při ověřování platnosti současně vyžívané destruktivní metody na vačkové hřídeli rozvodu motoru TEDOM.

Přesné hodnocení zakalených vrstev strojních součástí se ale řídí dle normy ČSN ISO 15787, jenž nahrazuje starší normu ČSN 01 3146.

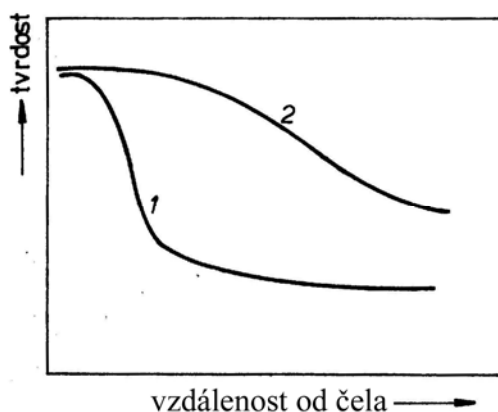
Jominiho čelní zkouška prokalitelnosti může také v některých případech poskytnout alespoň základní náhled na to, jak se bude daná ocel chovat při povrchovém kalení. Výsledkem této zkoušky je hodnota prokalitelnosti. Prokalitelnost je možno definovat jako schopnost oceli dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem tvrdost, která odpovídá kalitelnosti dané oceli při 50% zastoupení martenzitu ve struktuře. Prokalitelnost je závislá především na tvaru diagramu anizotropického rozpadu austenitu. Posouvají-li se křivky počátku bainitické nebo perlitické přeměny více doprava, tedy přeměny začínají déle, je možno dosáhnout větších hloubek zakalení. [6]



Obr. 11 – Jominiho zkouška – 1) Zkušební těleso; 2) Držák; 3) Přívod chladící vody [2]

Princip Jominiho zkoušky je zachycen na obr. 11. Zkušebním tělesem je standardní ocelový válec s osazením. Rozměry válce jsou normalizovány dle ČSN 42 0447 – Zkouška prokalitelnosti oceli. Po ohřátí na kalící teploty je zkušební těleso upnuto za osazení do držáku a je otevřen přívod chladící vody. Tryskající kapalina dopadá na čelo vzorku a ochlazuje ho. Po ukončení ochlazovacího procesu je vzorek vyňat z držáku a na válcovém povrchu vzorku jsou vybroušeny dvě protilehlé plošky hloubky 0,4mm. Na nich je nyní od čela vzorku postupně měřena tvrdost HV po celé délce tělesa. [2]

Výsledkem měření je tzv. křivka prokalitelnosti (obr.12), což je závislost tvrdosti HV, popřípadě HRC, na vzdálenosti od čela zkušebního tělesa. [2]



Obr. 12 – Křivka prokalitelnosti – 1) Uhlíková ocel; 2) Legovaná ocel [2]

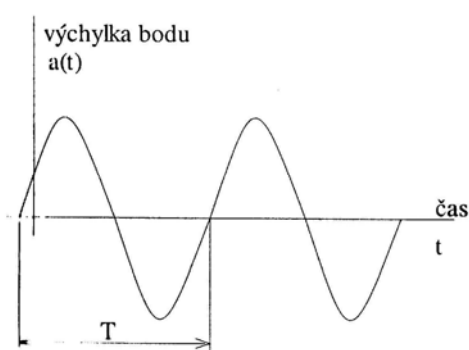
Pokud známe tvrdost martenzitické struktury pro daný obsah uhlíku v oceli, pak je možno určit prokalitelnost tak, že v místě s tvrdostí odpovídající 50% martenzitu odečteme vzdálenost od čela. [6]

3.4. Nedestruktivní metody měření hloubky zakalení

Běžné destruktivní metody měření hloubky zakalení jsou principiálně velmi jednoduché a přesné, ale přesto velmi neekonomické, neboť dojde k trvalému poškození měřené součásti. Také je tento způsob měření velmi časově náročný. Proto je v současné době kladen čím dál tím větší důraz na využití metod nedestruktivních. K nedestruktivním metodám, které by bylo možno využít pro měření hloubky zakalených vrstev patří metoda ultrazvuková, metoda vířivých proudů a metoda magnetického bodového pólu. Úspěšnost zapojení jednotlivých nedestruktivních metod při kontrole ve strojírenském podniku závisí na mnoha faktorech. Především se jedná o strukturu materiálu přechodové zóny povrchově kalené strojní součásti. Dalším předpokladem úspěšného nasazení je také například vhodný tvar plochy, na kterém se měření realizuje. V následující kapitole budou proto představeny výše uvedené nedestruktivní metody a popsány jejich možnosti.

3.4.1. Ultrazvuková metoda – UT

Ultrazvuk je možné popsat jako mechanický, periodicky se opakující kmitavý pohyb částic prostředí okolo rovnovážné polohy s frekvencí vyšší než 20000 Hz. [7]



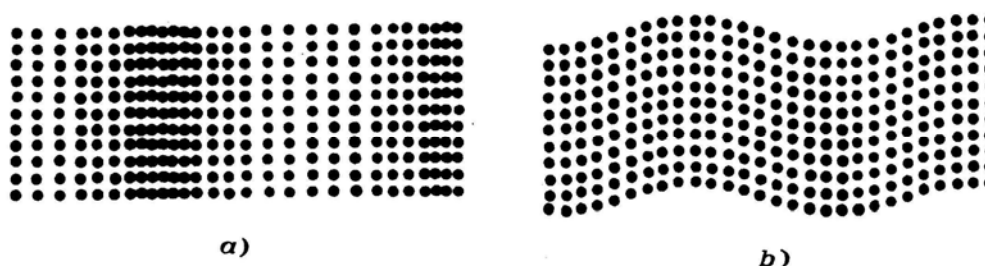
Obr. 13 – Časový průběh výchylky jedné částice – T [s] – perioda [8]

Matematicky vyjadřuje harmonický pohyb vlnová rovnice rovinné vlny, kdy pro okamžitou výchylku částice z rovnovážné polohy platí vztah (2)

$$a(t) = A \cdot \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x_1}{c} \right) \quad (2)$$

kde a [m] je výchylka z rovnovážné polohy, A [m] je amplituda výchylky, ω [rad·s⁻¹] je kruhová frekvence, x_1 [m] je souřadnice polohy, c [m·s⁻¹] je rychlost šíření vlny a t [s] je čas. [8]

Částice prostředí, v němž se šíří vlnění, mohou kmitat různými způsoby. Pro nedestruktivní ultrazvukovou diagnostiku je nejčastěji využíváno vlnění příčné nebo podélné. Podélné vlnění je charakteristické kmitáním částic prostředí přímočaře ve směru šíření vlny. Dochází střídavě ke zhušťování a zředňování částic prostředí. Naopak příčné vlnění charakterizuje kmitání částic kolmo na směr šíření vlnění. Tyto oba způsoby šíření zachycuje obr. 14. [7]



Obr. 14 – Druhy vlnění – a) Podélné vlnění, b) Příčné vlnění [7]

Dalším důležitým pojmem je rychlost šíření ultrazvukových vln c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Dle druhu šíření vlnění je možno určit rychlost šíření vln v příčném směru c_T [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a podélném směru c_L [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Velmi rozdílných hodnot nabývá tato veličina v tuhých látkách a kapalinách. Mezi nejčastější prostředí, kterými při defektoskopických měření prochází ultrazvukové vlny, patří při imerzním měření voda a při průchodu zkoumanou součástí také ocel. [7]

Přehled hodnot těchto rychlostí zachycuje tab. 1.

Tab. 1 – Hodnoty rychlostí šíření ultrazvukových vln [8]

Prostředí	Rychlost šíření vln c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	
	podélných c_L	příčných c_T
Ocel feritická	5920	3250
Ocel austenitická	5200 - 5800	3000 - 3150
Voda	1483	-

Jak je patrné z výše uvedené tabulky, vodou se šíří pouze podélné vlnění. To je způsobeno tím, že až na malé výjimky při velké viskozitě nekladou kapaliny žádný odpor vůči smykovému namáhání. [7]

Pokud prochází rovinná vlna prostředím, tak dochází k poklesu její energie. Příčinami tohoto poklesu jsou:

- rozptyl na mikroskopických rozhraních, jakými jsou například zrna struktury v oceli
- absorpce či pohlcování energie vlnění vnitřním třením kmitajících částic.

[7]

Pro měření hloubky zakalení je tedy nejdůležitější rozptyl ultrazvukových vln na zrnech přechodové zóny povrchově kalené součásti. Tento rozptyl způsobí útlum, jenž je vyjádřen dle vztahu (3):

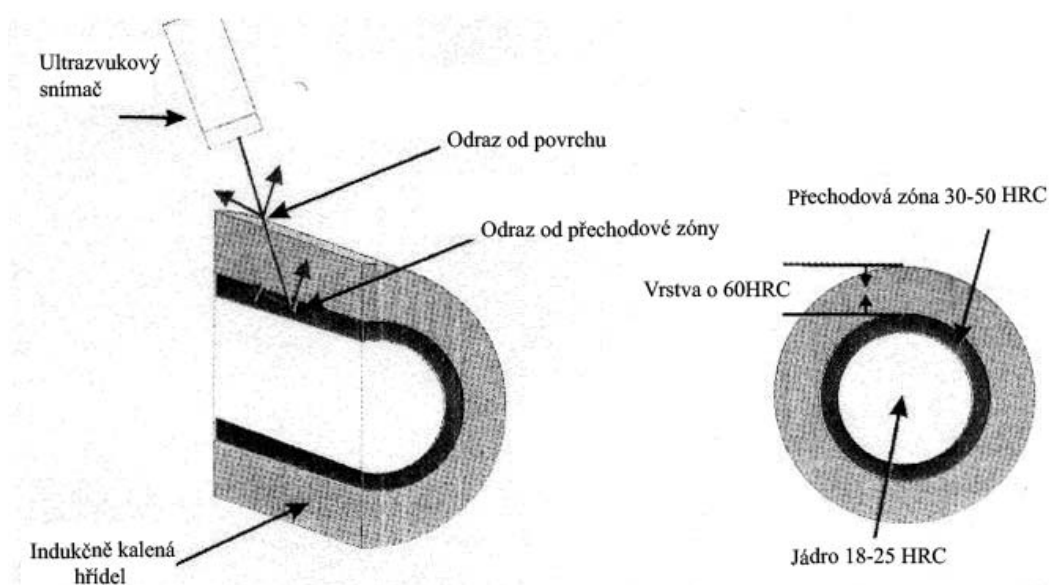
$$\alpha = \frac{\Delta V_s}{2 \cdot d} \quad (3)$$

kde α [$\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1}$] je koeficient útlumu, ΔV_s [dB] je změna zesílení vlivem útlumu ultrazvuku a d [mm] je tloušťka materiálu.

Útlum ultrazvukových vln procházejících ocelí se zvětšuje tím více, čím více se vlnová délka blíží velikosti zrna oceli.

[8]

V nedestruktivním měření hloubky zakalených vrstev je vhodné využít metodu impulsovou odrazovou, neboť přináší nejvíce dostupných informací o zkoumaném předmětu. Princip metody zachycuje obr. 15.

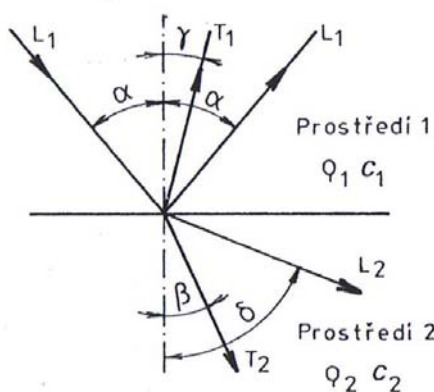


Obr. 15 – Impulsová odrazová metoda – princip měření hloubky zakalení

Při této metodě je mimo jiné aplikován i náklon měřící sondy o úhel $\alpha_l = (17 - 20)^\circ$ od kolmice vůči ose hřídele (viz obr. 15), jenž částečně eliminuje velmi vysoké rušivé vstupní echo od povrchu měřené součásti. Tímto náklonem by také mělo být dosaženo prvního kritického úhlu dopadu podélné ultrazvukové vlny, kdy do zkoumaného povrchu vstupuje pouze vlnění příčné, jenž se dobře odráží od hranic zrn. Toto vlnění má mít dle předchozích výzkumů ([10]) frekvenci vyšší než 10MHz. Důvodem je snaha vyvolat ultrazvukovou vlnu s velikostí podobnou velikosti zrna v přechodové zóně. Tímto by mělo být dosaženo rozptylu vln na hranicích zrn přechodové zóny zakalené vrstvy. Naklopení sondy způsobí šikmý dopad ultrazvukových vln na povrch součásti (na rozhraní dvou prostředí). Tento jev se řídí Snellovým zákonem (4):

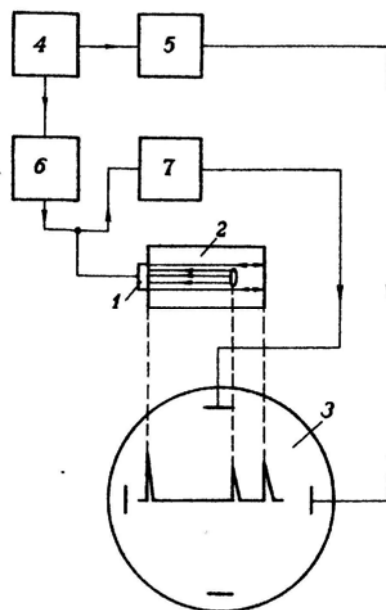
$$\frac{\sin \alpha}{c_{L1}} = \frac{\sin \beta}{c_{T2}} = \frac{\sin \gamma}{c_{T1}} = \frac{\sin \delta}{c_{L2}} \quad (4)$$

kde $\alpha [^\circ]$ je úhel dopadu podélné vlny v prostředí 1, $\beta [^\circ]$ je úhel příčné vlny v prostředí 2, $\gamma [^\circ]$ je úhel příčné vlny v prostředí 1, $\delta [^\circ]$ je úhel podélné vlny v prostředí 2, c_{L1} a $c_{L2} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ jsou rychlosti podélných vln v prostředí 1 a 2, c_{T1} a $c_{T2} [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ jsou rychlosti příčných vln v prostředí 1 a 2. [21]



Obrázek č. 16 – Šikmý dopad podélné vlny na rozhraní dvou prostředí – T – příčná vlna,
L – podélná vlna [21]

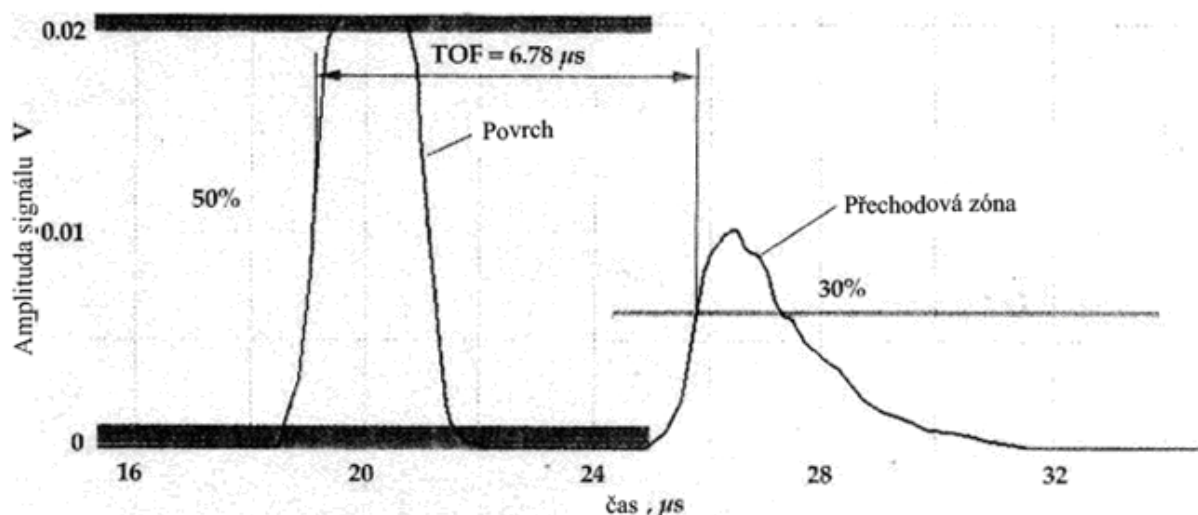
Úhel α_l vyšší než 20° není pro toto měření vhodný, protože při dalším zvětšování tohoto úhlu vymizí příčné vlnění z prostředí 2 (ze zakalené vrstvy) a je dosaženo druhého kritického úhlu. Zvyšuje-li se dále úhel dopadu, dojde ke vzniku povrchové vlny v prostředí 2. Jedná se o dosažení třetího kritického úhlu. Po překročení tohoto úhlu již veškerá energie zůstává v prostředí 1. [21]



Obr. 17 – Schéma zařízení pro impulsovou metodu – 1) sonda; 2) prostředí; 3) obrazovka; 4) synchronizátor; 5) zdroj časové základny; 6) generátor; 7) zesilovač [7]

Schéma zařízení pro impulsovou metodu je na obr. 17. Z ultrazvukové sondy jsou vysílány krátké impulzy, jež se po odrazu vrací zpět a jsou zachyceny na obrazovce. Přístroj se dále skládá ze synchronizátoru, který spouští obvody pro vytvoření a zobrazení impulzů. Tyto obvody obsahují zdroj časové základny a generátor. Zesilovač zachycené impulzy zesílí. [7]

Principiálně je ultrazvuková metoda měření hloubky zakalení založena na vzniku rozptylu ultrazvukových vln v přechodové zóně. Za předpokladu dobré akustické vazby mezi sondou a zkoumaným materiálem jsou ultrazvukové vlny vyslány ze sondy do povrchu zkoumaného zakaleného dílu. Již na povrchu materiálu dojde k rozptylu ultrazvukových vln. Sondou zachycený zpětný rozptyl vln se projeví jako první echo na obrazovce ultrazvukového přístroje (viz obr. 18). Vlny prošlé do zakalené vrstvy putují touto vrstvou až do přechodové zóny. Poté, co tyto vlny dorazí na rozhraní zakalené vrstvy a přechodové zóny je nutné, aby toto vlnění bylo také rozptýleno na přechodové zóně a bylo na přístroji zachyceno druhé echo. Nyní je třeba zjistit časový okamžik mezi zaznamenáním prvního a druhého echa. Tento časový okamžik se nazývá doba letu a je značena jako *TOF* [s] z anglického slovního spojení *the time of flight*. Protože je rychlost šíření ultrazvukových vln v daném materiálu známa, je poté možno určit hloubku zakalení jako vzdálenost mezi echy. Na obr. 18 je vidět výsledek měření na povrchově kalené hřídeli. [9]



Obr. 18 – Záznam průběhu signálu na obrazovce ultrazvukového přístroje [10]

Z výše uvedeného principu měření je tedy patrné, že zde bude možno měřit hloubku zakalení jen u materiálů, u kterých dochází k rozptylu ultrazvukového vlnění v přechodové zóně. Jedná se o materiály s větší velikostí hranic zrn v přechodové zóně oproti zakalené vrstvě. Důležitá je zde také heterogenita materiálu v této přechodové zóně. Z těchto podmínek jednoznačně vyplývá, že ultrazvuková metoda bude vhodnější spíše pro oceli s přechodovou zónou obsahující perliticko-feritická zrna. Samostatná feritická struktura zde není žádoucí, neboť nezpůsobuje dostatečný rozptyl. [10]

3.4.2. Metoda magnetického bodového pólu – MT

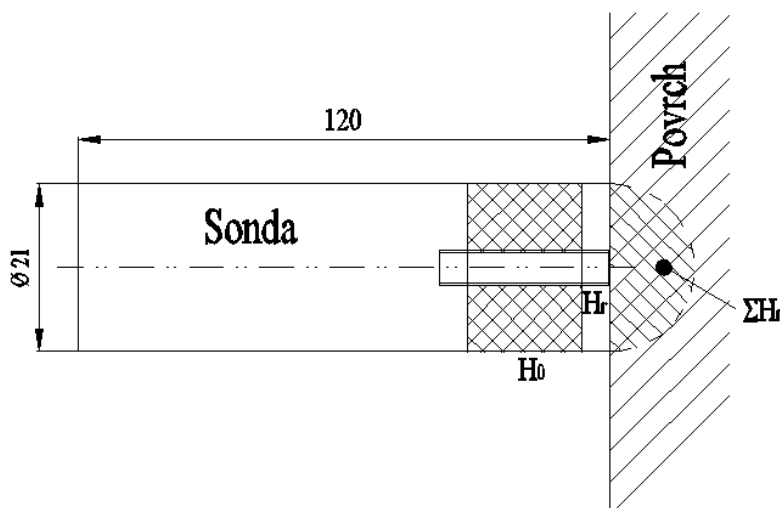
Metoda magnetického bodového pólu je principiálně založena na měření intenzity vzniklého magnetického pole těsně po předchozím zmagnetizování feromagnetického materiálu. Tato intenzita je dána vztahem (5)

$$H_r = H_o - \frac{N \cdot I_r}{\mu} \quad (5)$$

kde H_r [$A \cdot m^{-1}$] je intenzita zbytkového magnetického pole, H_o [$A \cdot m^{-1}$] je intenzita vnějšího magnetického pole, I_r [T] je zbytková polarizace, μ [$H \cdot m^{-1}$] je permeabilita prostředí a N [-] je demagnetizační činitel. [11]

Intenzita zbytkového magnetického pole závisí především na množství a disperzi perlitu či martenzitu ve struktuře.

Měřicí sonda (obr. 19) se skládá z magnetizační cívky pro vznik dostatečně velkého magnetického pole s vhodným průběhem. Další částí sondy je Hallův snímač intenzity magnetického pole. [11]



Obr. 19 – Schéma přiložené magnetizační sondy [11]

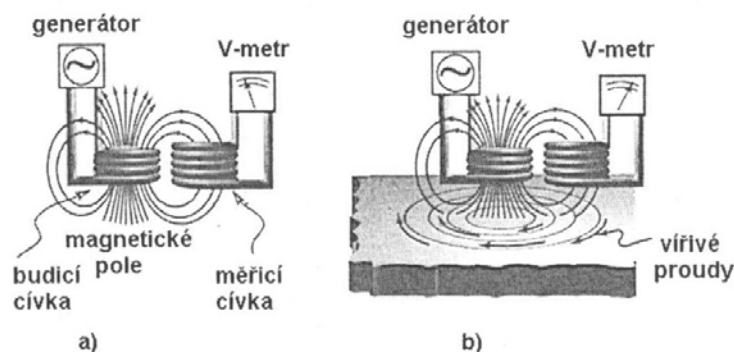
Měření metodou magnetického bodového pólu začíná přiložením magnetizační sondy k povrchu zkoušeného materiálu. Cívka sondy je napájena opačně polarizovaným vybíjením kondenzátorů (přístroj DOMENA B3) nebo trojúhelníkovými impulzy s opačnou polaritou (DOMENA PROMAG). Hallův snímač změří hodnotu intenzity magnetického pole po předposledním impulzu, který je kladný. Po vyslání posledního (záporného) impulzu dojde ke změně této intenzity. Přístroj vypíše na displeji absolutní součet těchto impulzů. Opačná polarita se využívá k odstranění nepříznivého vlivu rušivých magnetických polí. Výše zmíněný princip měření metodou magnetického bodového pólu využívá přístroj DOMENA, jenž bude využit v praktické části této práce. [12]

Základním omezením této metody pro měření hloubky zakalení je podmínka, že musí být výrazně rozdílná hodnota magnetizace zakalené vrstvy a jádra. Jako nevhodná se jeví kombinace martenzitické struktury v zakalené vrstvě s perlitickou strukturou v jádře, neboť obě tyto struktury vykazují podobné hodnoty magnetizace. Teoretická použitelnost této metody pro měření hloubek zakalení je také dána maximální hloubkou průniků magnetizace do materiálu. Z předchozích výzkumů přístroje DOMENA je tato maximální možná hloubka přibližně 10mm [18]. Tato měřicí metoda lze nejlépe aplikovat na jemně obrobené, popřípadě broušené plochy. Nicméně je možné měřit i na hrubších površích, pokud jsou podobné

u všech vzorků. Důležité také je, aby nebyl povrch dříve ovlivněn jiným silným magnetickým polem. [19]

3.4.3. Metoda vířivých proudů - ET

Poslední zde zmíněnou nedestruktivní metodou měření hloubky zakalení je metoda vířivých proudů. Princip metody (obr. 20) je založen na působení střídavého magnetického pole na zkoušený materiál. Magnetické pole vzniká pomocí budicí cívky, jenž je napájena střídavým proudem. Ve zkoušeném předmětu se indukují vířivé proudy, které svým magnetickým účinkem působí zpětně na původní budicí magnetické pole. Obě tyto magnetické pole se vektorově skládají ve výsledné pole, které bude především záviset na elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě zkoušeného materiálu. V měřicím vinutí snímací cívky dochází k indukci napětí, jenž je právě ovlivněno magnetickými a elektrickými parametry kontrolovaného materiálu a také frekvencí budicího proudu. S rostoucí frekvencí proudu roste i velikost vířivých proudů. Výše zmíněné magnetické a elektrické parametry se tedy mění dle stavu struktury zkoušeného materiálu. [8]



Obr. 20 – Princip metody vířivých proudů [8]

Pro průnik proudů do hloubky s ve zkoušeném materiálu lze napsat vztah (6):

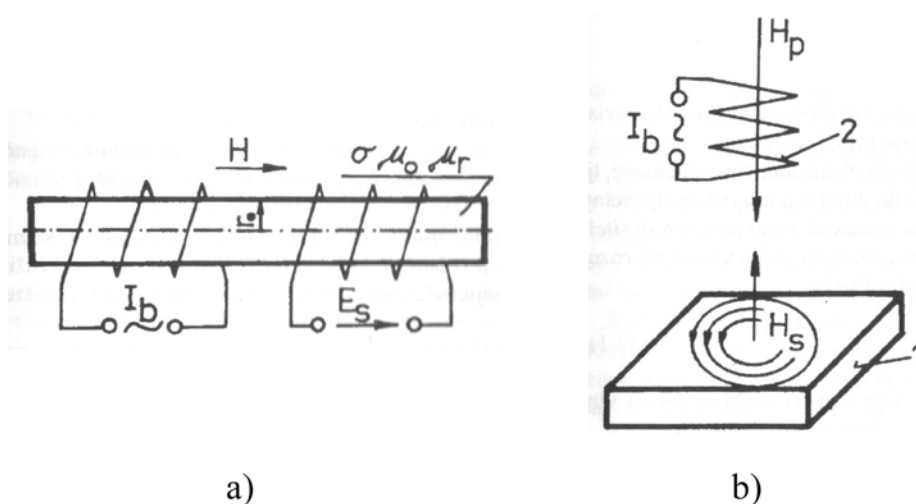
$$s = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (6)$$

kde s [m] je hloubka průniku proudů, f [Hz] je frekvence střídavého proudu, μ_o [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$] je permeabilita vakua, μ_r [-] je relativní permeabilita a σ [$\text{A}^2 \cdot \text{s}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$] je měrná elektrická vodivost. [8]

Dle uspořádání snímacích cívek vůči povrchu zkoušeného materiálu lze metody rozdělit na:

- metodu s průchozí cívkou (obr. 21a)
- metodu s příložnou cívkou (obr. 21b)

[13]



Obr. 21 - Uspořádání snímacích cívek – a) metoda s průchozí cívkou, b) metoda s příložnou cívkou [13]

Metoda s průchozí cívkou je charakteristická tím, že zkoušený materiál prochází cívkou, která má dvě vinutí. Jedno vinutí je magnetizační a druhé je snímací. Dle konstrukce sondy je patrné, že tato metoda se hodí pro zkoušení tyčových materiálů. [13]

U metody s příložnou cívkou je budící cívka přikládána radiálně k povrchu zkoušeného materiálu. Vznikající magnetické pole vířivých proudů zpětně ovlivní vlastnosti příložné cívky. Tato změna se projeví změnou impedance. H_p je magnetické pole magnetizačního proudu na primární (budící) cívce a H_s je sekundární magnetické pole vířivých proudů. [13]

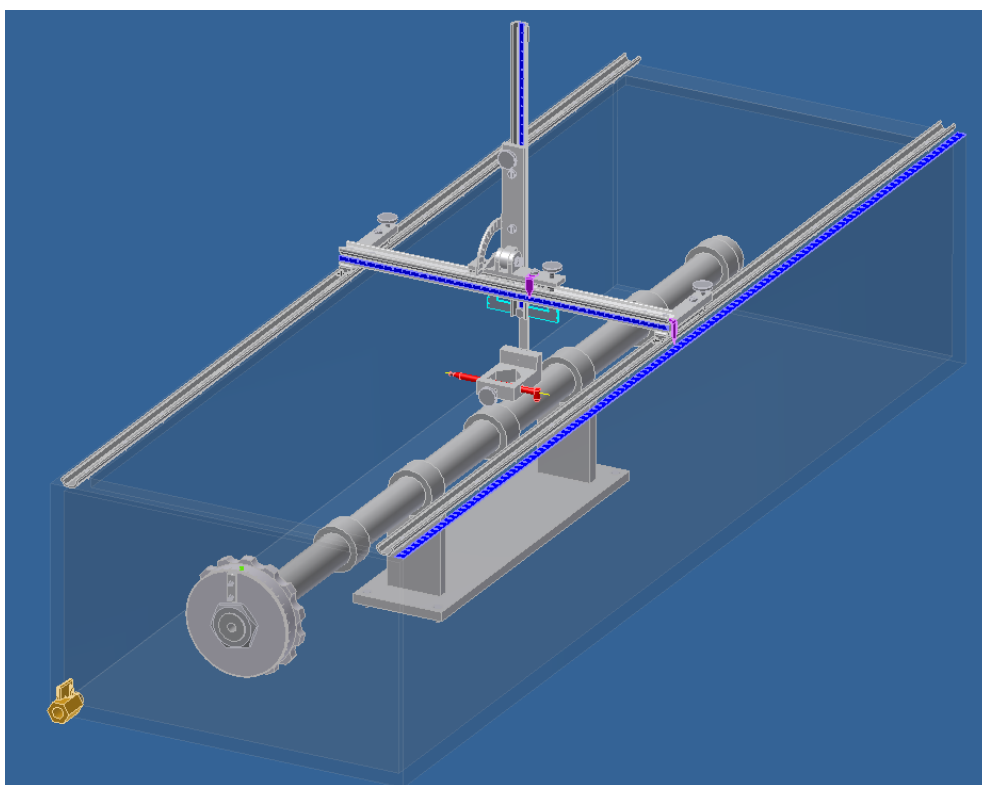
Pro měření hloubek zakalení strojních součástí rotačních tvarů se nejčastěji užívají přístroje s průchozí cívkou. Typickým příkladem této konstrukce jsou přístroje MAGNATEST, EDDYLINER či MELVIS. Omezení metody vířivých proudů spočívá v možnosti průniku proudů do hloubky dle vztahu (6). [19]

4. Praktická část

V následující kapitole bude představen vytvořený polohovací přípravek pro upevnění a polohování snímačů pro určení topografie zakalených vrstev. Důvodem tvorby tohoto přípravku byla nutnost dodržet požadovanou přesnost a reprodukovatelnost při nastavování měřících snímačů vůči povrchu zkoušené strojní součásti.

4.1. Návrh polohovacího přípravku snímačů pro nedestruktivní topografii zakalených vrstev

Jak již bylo výše uvedeno, pro dosažení požadované přesnosti a reprodukovatelnosti měření je třeba vytvořit přípravek (obr. 22), jenž bude sloužit k přesnému uchycení a nastavení polohy měřící sondy. Je třeba, aby tento přípravek byl dostatečně přesný, vysoce tuhý a zároveň výrobně jednoduchý, cenově dostupný a alespoň částečně univerzální.



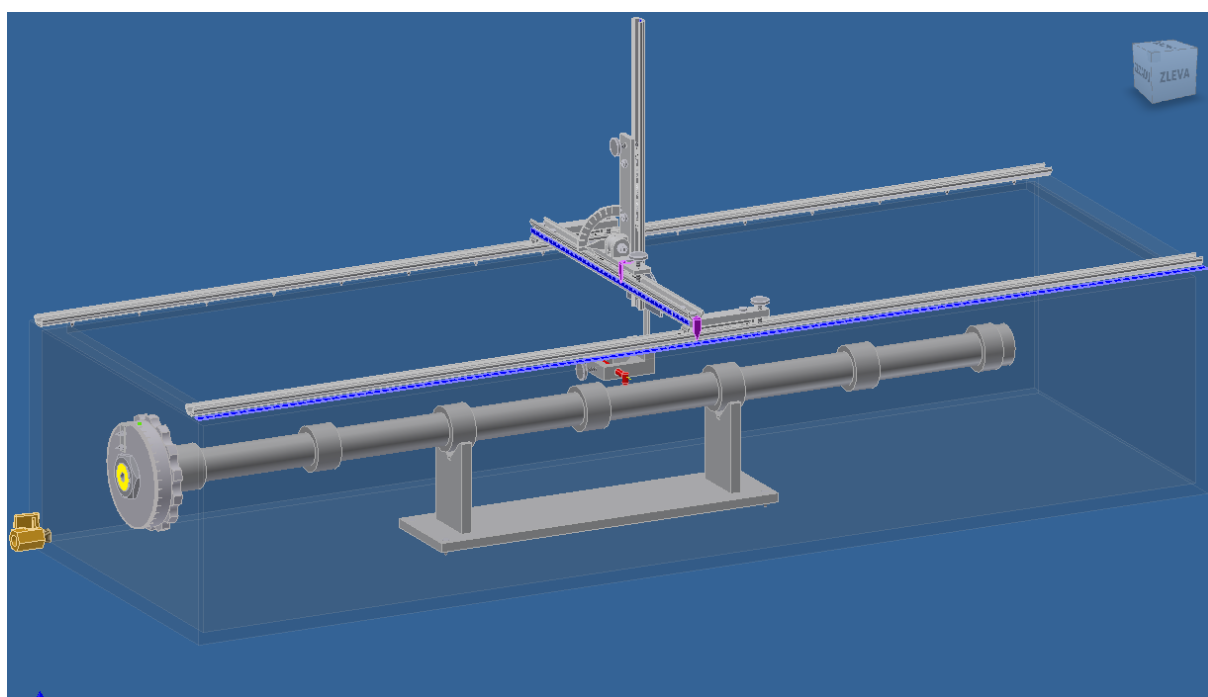
Obr. 22 – Polohovací přípravek včetně měřené součásti a ultrazvukové měřící sondy
Panametrics V260-RM 15MHz – Sonda znázorněna červeně

K docílení dobré akustické vazby mezi rovinným čelem sondy a rotačním povrchem zkoušené vačkové hřídele rozvodu motoru je také nutné využít u ultrazvukové metody měření v imerzním prostředí. Jako nejjednodušší a nejlevnější imerze je zde využita voda. Použití

vody přináší ale také svá negativa v podobě možné koroze zařízení. Při konstrukci byly proto využity součásti korozně odolné. Spojovací prvky jsou opatřené povrchovou vrstvou zinku, duralové díly jsou ochráněny bezbarvým eloxováním a použitá lineární vedení TEX20-CEX20 (viz Příloha 1) jsou z korozivzdorných ocelí. V této kapitole bude postupně představeno a probráno celé zkonstruované polohovací zařízení.

4.1.1. Uložení měřené součásti v polohovacím přípravku

Tento polohovací přípravek byl přednostně konstruován na měření hloubky zakalení vačkových hřídelí rozvodu motoru. Uložení tohoto hřídele v přípravku zachycuje obr. 23.

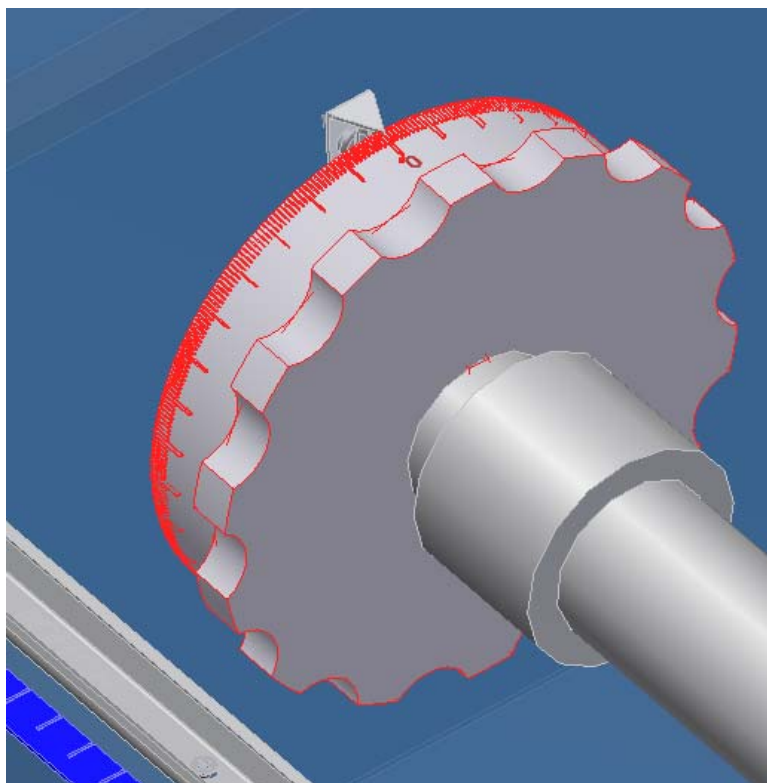


Obr. 23 – Uložení vačkové hřídele v přípravku – hřídel kreslena zjednodušeně

Hřídel je uložena do dvou prizmatických držáků připevněných na základní desku a na dno měřicí nádrže. Pro přesně danou polohu této hřídele v nádrži jsou prizmatické držáky umístěny tak, že jako stykové plochy s hřídelí jsou využity dvě ložiska hřídele. Jedná se o třetí a páté ložisko zleva na obr. 23. Další důležitou podmínkou je přesná poloha hřídele v axiálním směru. Ta je zajištěna doražením čela hřídele na stěnu nádrže (viz obr. 23 – světle žlutou barvou). Jak vyplývá z tohoto textu, univerzálnost tohoto přípravku je tedy částečně omezena. Nicméně je možné toto měřicí zařízení využít i pro další typy měřených vzorků. Rotační součásti délky od 310mm lze umístit do prizmatických držáků a drobnější díly je možno položit mezi tyto prizmatické držáky na základní desku.

4.1.2. Nastavení vaček vačkové hřídele do přesné měřicí polohy

Vačky jsou na vačkové hřídeli pootočený z důvodu správného časování otevírání ventilů motoru. Při měření každé vačky vyplývá tedy nutnost natočit tuto vačku do svislé polohy vůči měřicí sondě. Obr. 24 zachycuje zvolený způsob řešení tohoto problému.



Obr. 24 – Ovládací kolo nasazené na vačkové hřídeli

Na konci každého vačkového hřídele rozvodu motoru TEDOM je vyrobena drážka pro úsečové pero. Od této drážky vychází dle výrobního výkresu časování vaček při otáčení hřídele.

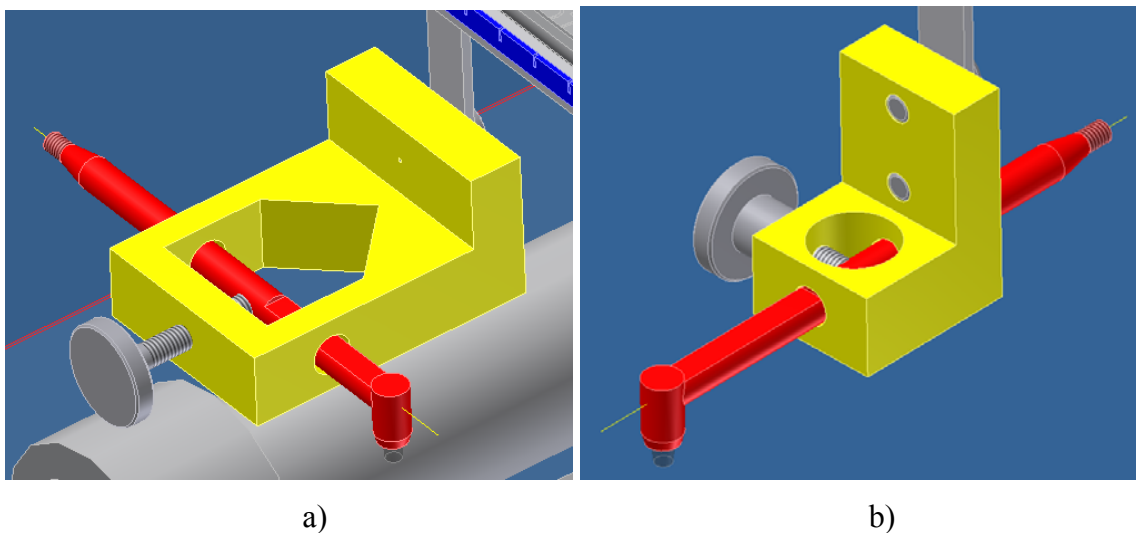
Principem nastavení vačky do svislé polohy proti měřicí sondě je tedy nasazení speciálního ovládacího kola s nábojem pro úsečové pero a s obvodovou úhlovou stupnicí s polohou 0° nad drážkou pro pero. Vlastní nastavování vaček poté spočívá v pootočení hřídele o úhel dané vačky od 0° na obvodové stupnici.

4.1.3. Upnutí měřicí sondy v polohovacím přípravku

Tvarů a rozměrů měřících sond využívaných při měření ultrazvukovými, magnetickými a vířivoproudými metodami je mnoho. Velmi často ale bývají tyto sondy rotačního tvaru s osou rotace ve vertikálním směru. Pro měření hloubky zakalení ultrazvukem zde bude ale také využívána sonda tužkového tvaru v horizontálním směru s vertikálně umístěným měřícím segmentem (viz Příloha 6). Proto bylo nutno navrhnout držák sondy tak, aby zde byla opět dodržena jistá univerzálnost zařízení. Obr. 25 znázorňuje dva vytvořené držáky sondy s již upnutou sondou na ultrazvukové měření hloubky zakalení. Tato sonda je zasunuta do dvou protilehlých otvorů a ručně dotažena šroubem.

U univerzálního držáku (obr. 25a) je vyrobena prizmatická drážka, do které lze utahovacím šroubem připevnit svislé rotační sondy až do průměru 30mm.

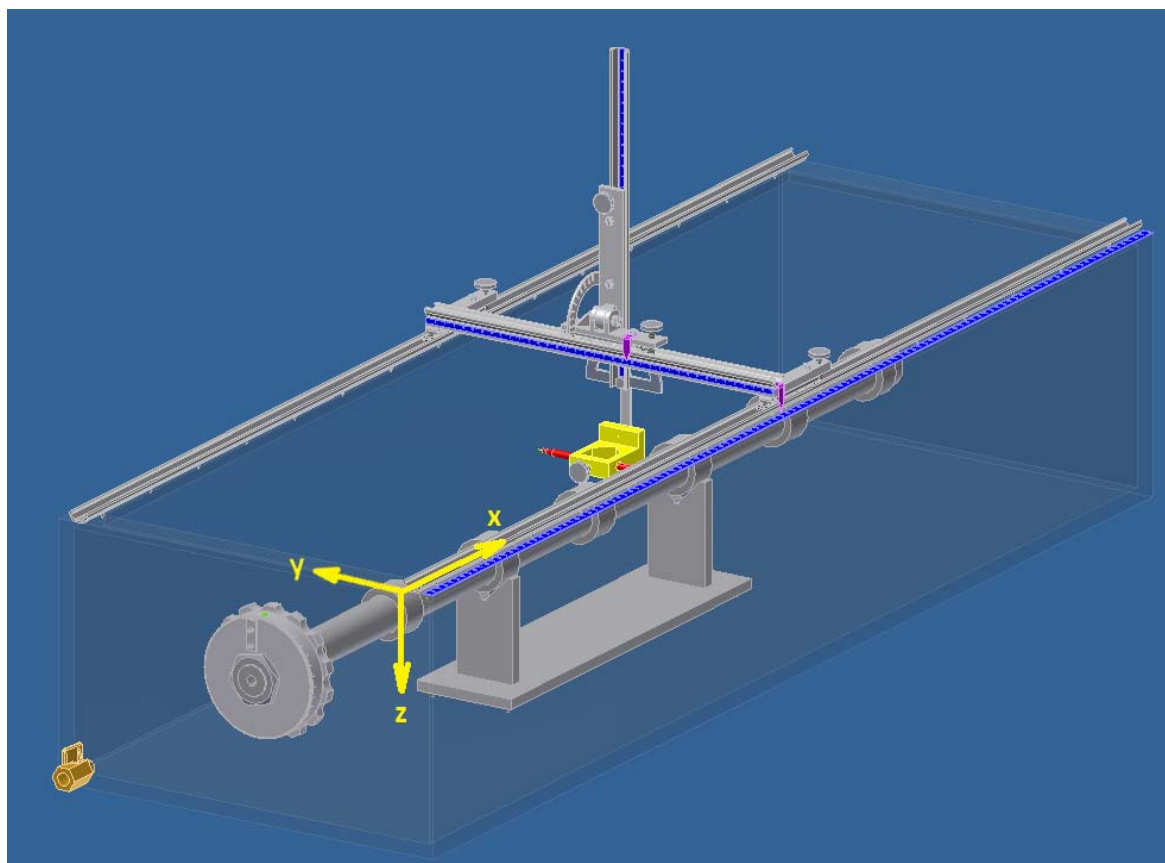
Na obr. 25b je speciální držák sondy, který byl vytvořen pouze pro ultrazvukové sondy na měření hloubky zakalení. Jedná se o sondu Panametrics V260-RM 15MHz (viz Příloha 6) a o imerzní sondu 10MHz o průměru 15mm.



Obr. 25 – Držáky sond s upnutou ultrazvukovou sondou Panametrics V260-RM 15MHz:
a) Univerzální držák sond s prizmatickou drážkou pro upnutí vertikální sondy; b) Speciální držák sond pro měření hloubky zakalených vrstev sondou Panametrics V260-RM 15MHz, popřípadě svislou imerzní sondou 10MHz o $\varnothing 15\text{mm}$

4.1.4. Pohyblivost měřicí sondy v polohovacím přípravku

Sonda upnutá v držáku vyžaduje pro vlastní měření výrazné množství pohybů. Pro dosah sondy po celé nádrži s imerzí je zde nutné zabezpečit přímočaré pohyby do tří vzájemně na sebe kolmých směrů. Na obr. 26 jsou znázorněny tyto základní přímočaré pohyby zařízení.



Obr. 26 – Základní přímočaré pohyby polohovacího přípravku

Rozsahy ve směrech jednotlivých os jsou následující:

Rozsah v ose $x = (0 - 1100)\text{mm}$

Rozsah v ose $y = (0 - 250)\text{mm}$

Rozsah v ose $z = (0 - 250)\text{mm}$.

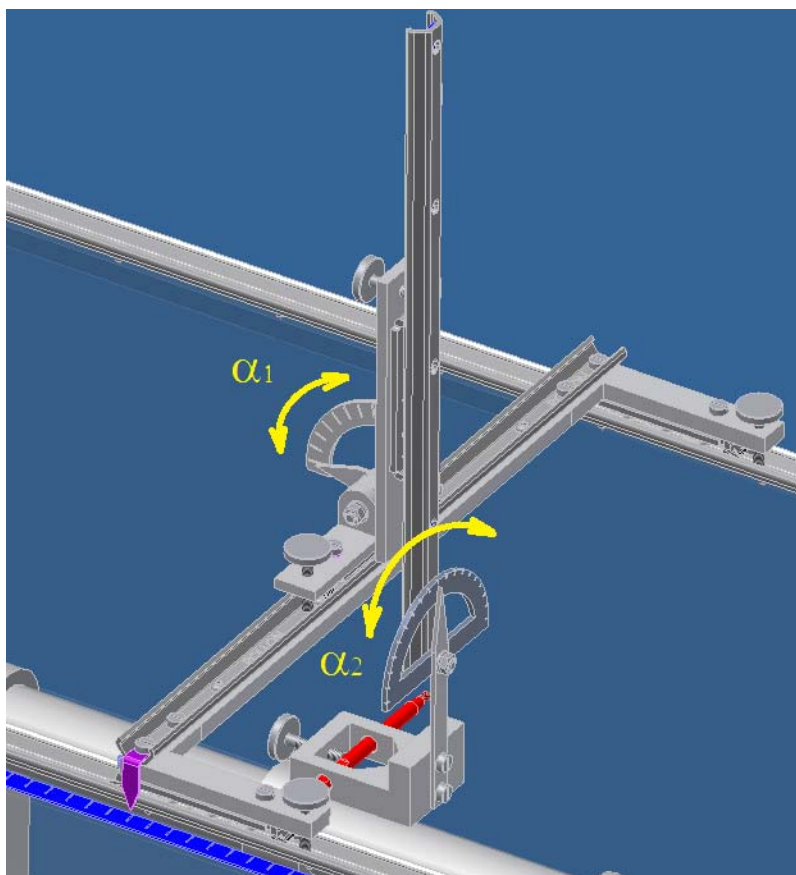
Pro využití zařízení k měření hloubky zakalených vrstev pomocí ultrazvuku je také nutné upnutou sondu naklápět, neboť dojde ke zvýraznění echa od přechodové vrstvy. Úhel naklonění sondy α_1 bývá okolo 20° . [10]

Dále je zde nutná také úhlová regulace nepřesně nastavené sondy vůči povrchu hřídele (úhel α_2). Z těchto dvou výše uvedených faktorů vyplývá potřeba dvou rotací. Na obr. 27 je znázorněno zvolené řešení realizace těchto dvou rotací.

Rozsahy rotačních pohybů:

$$\alpha_1 = (0 - 65)^\circ$$

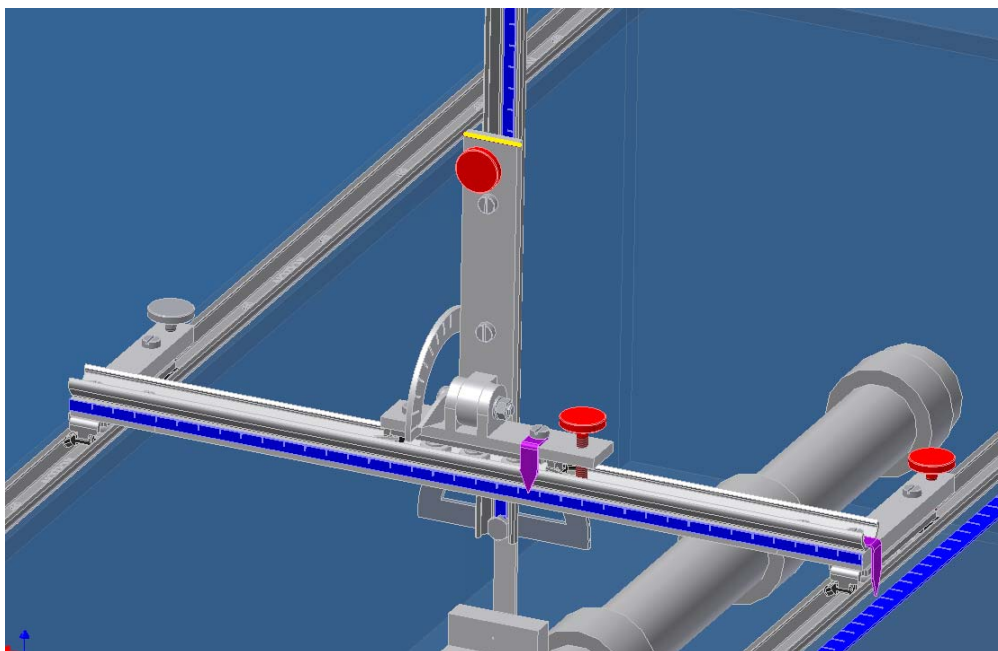
$$\alpha_2 = (0 - 180)^\circ$$



Obr. 27 – Rotační pohyby polohovacího přípravku - α_1 - úhel naklonění sondy ke zvýraznění echa; α_2 - úhel regulace nepřesně nastavené sondy

4.1.5. Odměřování souřadnic a úhlů v polohovacím přípravku

Pro určení přesné polohy sondy v polohovacím přípravku je tento přípravek opatřen délkovými stupnicemi do směrů os x , y , z (na obr. 28 znázorněny tmavě modrou barvou). Velikost nastavených úhlů α_1 , α_2 je možno odměřit na úhlových stupnicích (obr. 27).



Obr. 28 – Odměřovací systém přípravku – fialově – odměřovací ručičky osy x a osy y ; modře – délková měřidla; červeně – aretační šrouby; žlutě - odměřovací hrana osy z

Vlastní odměřování by mělo probíhat následovně:

Po nastavení sondy vůči povrchu součásti se nejprve zabrání pohybu sondy ve všech třech osách pomocí aretačních šroubů (obr. 28 – červeně). Poté se odměří poloha sondy na délkových měřidlech (obr. 28 – modře). Místa odečítání ukazují ručičky (obr. 28 – fialově) pro osy x a y . Hodnota na ose z se určí pohledem kolmo na hranu naklápěcího zařízení (obr. 28 – žlutě). Nastavení úhlů α_1 , α_2 se odečte na úhlových stupnicích (obr. 27).

4.1.6. Doplnující údaje navrhnutého polohovacího přípravku

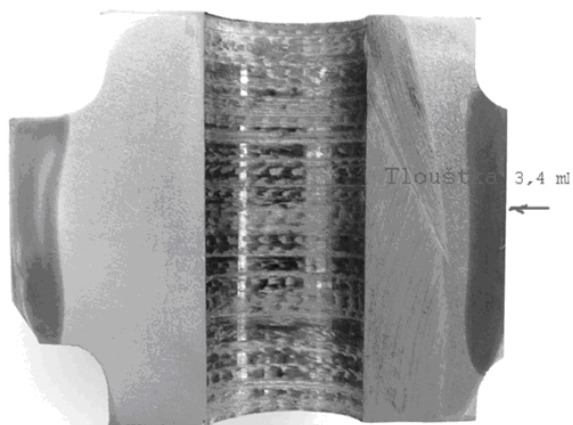
Zkonstruovaný polohovací přípravek byl přednostně navržen na topografii zakalených vrstev vačkové hřídele rozvodu motoru. Nicméně je do velké míry použitelný i pro další druhy součástí (viz kap. 4.1.1.). Je zcela korozivzdorný, čímž je zaručena jeho stálost a použitelnost po dlouhou dobu. Jedná se však o ručně ovládané zařízení. Pro častější využití a zavedení do provozu větších podniků bude vyžadovat alespoň částečnou automatizaci měření. Cena vyrobeného polohovacího přípravku činila 16 117Kč bez DPH.

4.2. Topografie zakalených vrstev s využitím destruktivní metody

V následujících kapitolách bude vysvětlena a ověřena běžně využívaná destruktivní metodika zjišťování průběhu hloubky zakalené vrstvy zadané strojní součásti - vačkové hřídele rozvodu motoru TEDOM.

4.2.1. Současný stav určování topografie zakalených vrstev na vačkové hřídeli rozvodu motoru

Vačková hřídel rozvodu motoru (viz Příloha 9 – výkres č. 1152 010) je povrchově zakalena. Materiál součásti je 12 051.1 s maximální tvrdostí 210HB. Hloubka zakalení je dána předpisem na výrobním výkresu v rozmezí od 1 do 4 mm. Tvrdost této vrstvy má být 57 až 62 HRC. Vlastní proces kalení této hřídele je složen z indukčního ohřevu a poté ochlazení vodní sprchou. Z důvodu velmi složitého tvaru hřídele je třeba nastavit tzv. kalící šablonu. V principu se jedná o přesné umístění ohřívacích induktorů a vodních sprch tak, aby ochlazením došlo k vytvoření rovnoměrného a stejně hlubokého zakalení na vačkách a ložiscích vačkové hřídele. Nerovnoměrná hloubka zakalené vrstvy není vhodná z důvodu možného vzniku přechodové vrstvy v místě vrubu či jiného koncentrátoru napětí. Mohlo by zde dojít k porušení celistvosti celé vačkové hřídele. Dalším extrémním stavem by mohlo být to, že by se část vačky či ložiska nezakalila vůbec. Součást by zde měla velmi výrazně nižší mechanické vlastnosti. Proto je zde topografie zakalených vrstev důležitá. V závodě TEDOM a.s. – divize Motory je využívána běžná destruktivní metoda zjišťování hloubky zakalení. Principem se jedná se o rozřezání celé vačkové hřídele na jednotlivé části (12 vaček a 7 ložisek). Poté se u vaček provede řez v ose symetrie a jednotlivé řezy se brousí a poté naleptají (viz obr. 29).

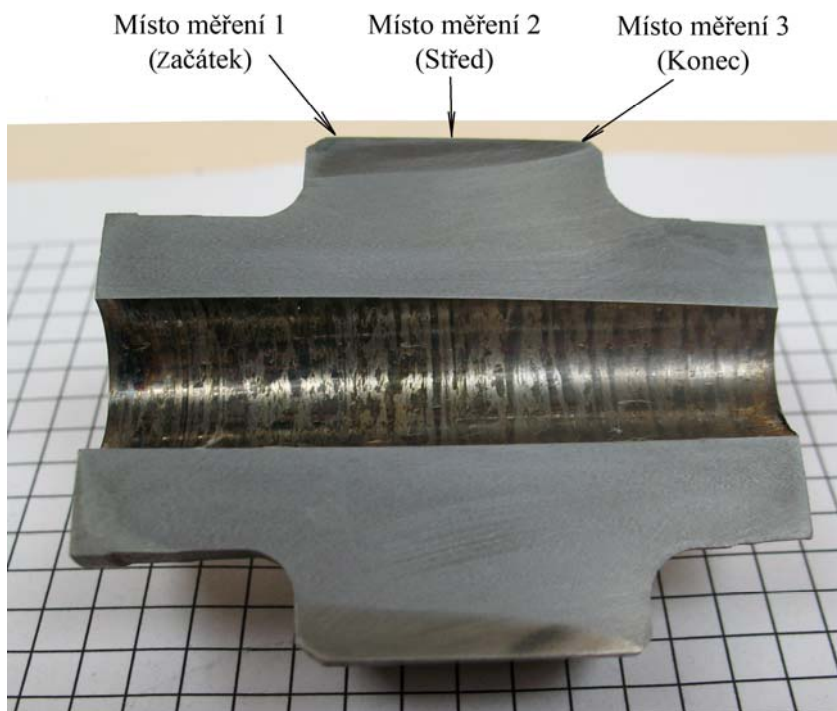


Obr. 29 – Řez vačkou se zviditelněnou vrstvou [12]

Tímto způsobem se zviditelní zakalená vrstva a je patrné, zda je průběh zakalení vyhovující nebo ne. Řezy ložisek v ose symetrie se ale již neprovádí. Měří se zde tvrdost povrchu ložiska ve středu a na obou stranách 1mm od kraje ložiska. Pokud tvrdost ložiska 1mm od kraje klesne pod 450HV, je to znamení, že je kalící šablona nevhodně posunuta a povrch v tomto místě není zakalen do požadované hloubky. [17]

4.2.2. Topografie zakalených vrstev destruktivní metodou u ložisek vačkové hřídele rozvodu motoru

V předchozí kapitole bylo uvedeno, že se řezy ložisky neprovádí. Nicméně pro ověření tvrzení, že v místě, kde klesne tvrdost pod 450HV, není dostatečně zakalená vrstva, byly přesto provedeny tyto řezy a zviditelněna zakalená vrstva. Na ukázkou je zde přiložen řez ložiskem se zviditelněnou zakalenou vrstvou (obr. 30). Je patrné, že hloubka zakalené vrstvy není rozložena rovnoměrně a na boku je menší než 1mm. Jedná se tedy o nepříznivý případ průběhu zakalení.



Obr. 30 – Řez ložiskem č. 14 s nepříznivým průběhem zakalené vrstvy

Na ložiscích byla zjištěna tvrdost povrchu uprostřed a ve vzdálenosti 1mm od obou krajů. Na řezech ložisky byly poté také na těchto místech určeny hloubky zakalení. Výsledky měření zachycuje tab. 2. Pro měření byl využit Vickersův tvrdoměr a zjištěné hodnoty byly pro lepší představu přepočteny na tvrdost dle Rockwella HRC pomocí převodní tabulky. [14]

Tab. 2 – Naměřené hloubky zakalení a tvrdosti ložisek

Ložisko	Místo měření	Hloubka zakalení ložiska [mm]	Místo měření	Tvrdost HV30	Tvrdost HRC
1	Začátek	1,1	Začátek	446	44,2
	Střed	3,8	Střed	530	49,8
	Konec	4,2	Konec	583	52,8
2	Začátek	4,5	Začátek	586	53
	Střed	3,5	Střed	594	53,4
	Konec	2,0	Konec	579	52,7
3	Začátek	4,0	Začátek	568	52,1
	Střed	4,1	Střed	590	53,2
	Konec	5,5	Konec	666	56,6
4	Začátek	4,2	Začátek	575	52,3
	Střed	3,5	Střed	586	53
	Konec	3,0	Konec	561	51,6
5	Začátek	4,5	Začátek	543	50,7
	Střed	3,8	Střed	610	54,1
	Konec	1,5	Konec	476	46,4
6	Začátek	3,5	Začátek	568	52,1
	Střed	3,5	Střed	622	54,7
	Konec	4,9	Konec	598	53,6
7	Začátek	1,2	Začátek	450	44,6
	Střed	3,6	Střed	543	50,7
	Konec	4,8	Konec	530	49,8
8	Začátek	2,5	Začátek	606	54
	Střed	3,1	Střed	568	52,1
	Konec	3,9	Konec	517	49,2
9	Začátek	3,0	Začátek	583	52,8
	Střed	3,9	Střed	608	54
	Konec	5,0	Konec	547	50,9
10	Začátek	3,1	Začátek	517	49,2
	Střed	3,0	Střed	557	51,6
	Konec	4,9	Konec	511	48,9
11	Začátek	4,1	Začátek	527	49,7
	Střed	4,0	Střed	571	52,2
	Konec	4,5	Konec	508	48,7
12	Začátek	3,0	Začátek	561	51,6
	Střed	4,0	Střed	583	52,8
	Konec	5,0	Konec	618	54,6
13	Začátek	5,0	Začátek	568	52,1
	Střed	3,1	Střed	586	53
	Konec	5,0	Konec	575	52,3
14	Začátek	4,7	Začátek	644	55,6
	Střed	3,5	Střed	608	54
	Konec	0,6	Konec	420	42,4

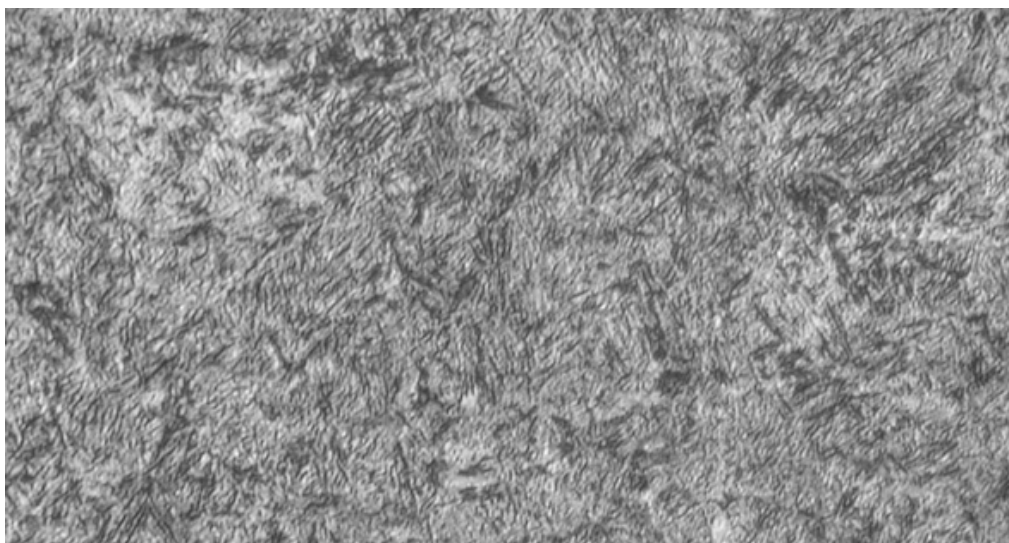
Z tab. 2 je patrné, že výše uvedená podmínka o poklesu tvrdosti v místě měření při nedostatečně zakaleném povrchu, je platná a poskytuje informace o tom, jestli je povrch zakalen až ke kraji ložiska. Důkazem je například měření na ložisku č.14, kde při hloubce zakalení 0,6mm je tvrdost 420HV. Přestože je tato metodika měření funkční, není možné určit hloubku zakalení bez rozřezání ložisek. Toto měření je také velmi časově náročné. K vyřešení těchto problémů budou v následující kapitole využity nedestruktivní metody měření (NDT).

4.3. Topografie zakalených vrstev s využitím nedestruktivních metod a polohovacího přípravku

4.3.1. Volba nedestruktivní metody měření

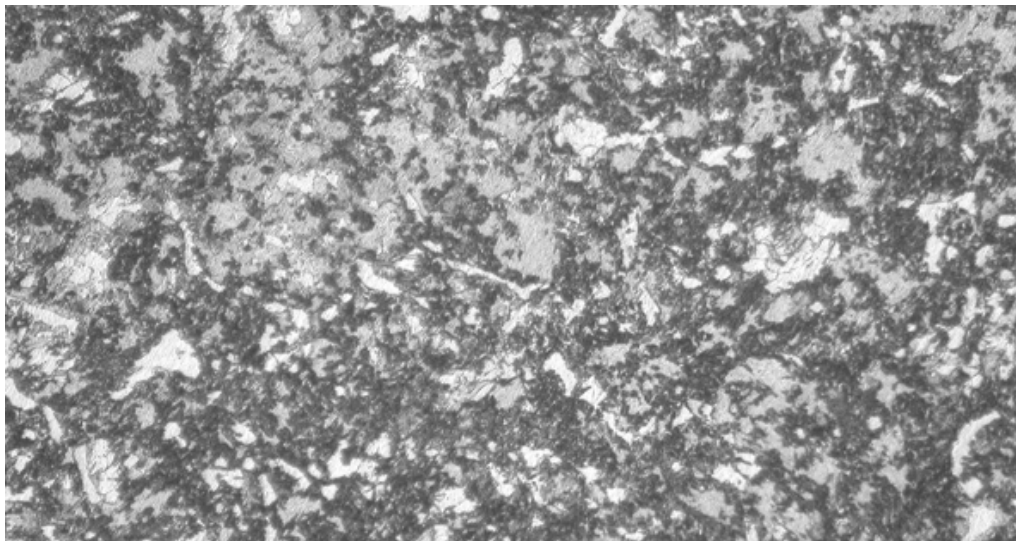
Pro určení topografie zakalených vrstev vačkové hřídele rozvodu motoru TEDOM je třeba vhodně zvolit nedestruktivní metodu měření. Je zde třeba vycházet z rozboru struktury materiálu. Jak již bylo v kapitole 3.4.1. uvedeno, ultrazvuková metoda měření zakalených vrstev vyžaduje zrna perliticko-feritické struktury v přechodové vrstvě. Důvodem je vznik rozptylu ultrazvukových vln na těchto zrnech a případně vznik echa od přechodové zóny. Naopak metoda magnetického bodového pólu se jeví jako nevhodná pro martenzitickou strukturu v zakalené vrstvě a perlitickou strukturu v přechodové zóně a jádře. Vhodnější je pro tuto metodu kombinace struktur martenzit – sorbit.

Proto byl pro správnou volbu NDT metody měření na vačkové hřídeli proveden metalografický rozbor. Struktura zakalené vrstvy je zachycena na obr. 31. Je zde patrná martenzitická a místy i bainitická struktura.



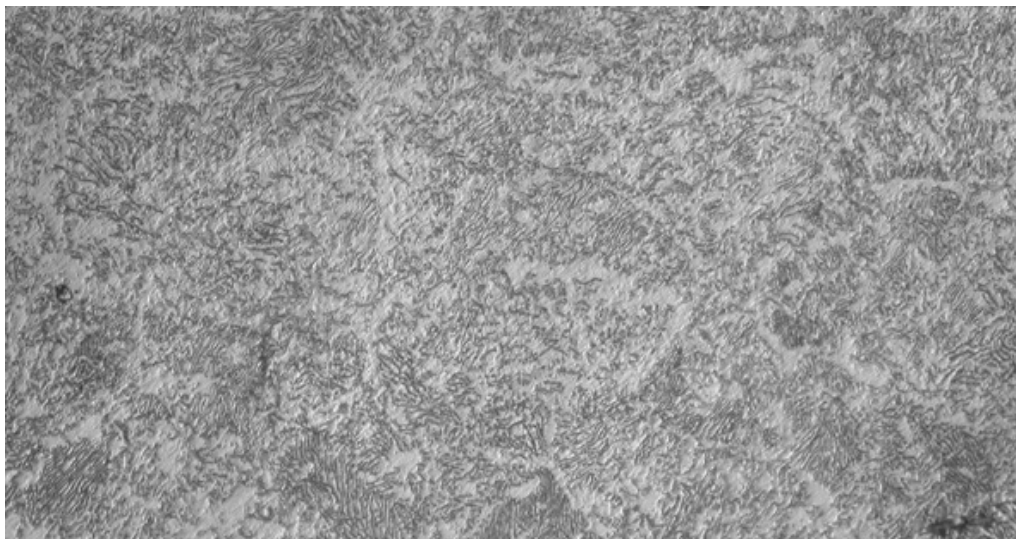
Obr. 31 – Snímek zakalené vrstvy vačkové hřídele (zvětšeno 500x) [12]

Dalším zajímavým místem je přechodová zóna (obr. 32). Zde již martenzit mizí a začíná se zde objevovat přechlazený perlit s feritem.



Obr. 32 – Snímek přechodové zóny vačkové hřídele (zvětšeno 500x) [12]

Obr. 33 zachycuje strukturu v jádře součásti, kde je částečně sferoidisovaný lamelární perlit.



Obr. 33 – Snímek jádra vačkové hřídele (zvětšeno 500x) [12]

Z výsledků metalografického rozboru struktury tedy vyplývá, že jako nevhodné se jeví použití magnetických zkoušek, neboť byl zjištěn velký obsah perlitu v přechodové zóně a v jádře vačkové hřídele. Následující výzkum bude tedy přednostně směřovat k aplikaci ultrazvukové metody měření, pro kterou byly naopak podmínky strukturního složení splněny.

4.3.2. Možnosti aplikace ultrazvukové metody při topografii zakalených vrstev vačkové hřídele rozvodu motoru

Při tomto měření byly využity ultrazvukové přístroje DIO 562 - 2CH a DIO 2000 - 1CH (viz příloha 5). Z dostupných informací ([9], [10]) je při měření třeba dodržet níže uvedené podmínky. Je nutno použít měřicí sondu s frekvencí 10MHz, nebo vyšší. Důvodem je snaha vyvolat ultrazvukovou vlnu, která je svou velikostí podobná velikosti zrna v přechodové zóně. To by mělo napomoci vytvořit rozptyl vln na přechodové zóně. Dále je nutno tuto sondu naklonit o úhel $\alpha_I = (17 - 20)^\circ$ od kolmice vůči ose hřídele (viz obr. 15). Tímto náklonem by mělo být dosaženo prvního kritického úhlu dopadu podélné ultrazvukové vlny, kdy do zkoumaného povrchu vstupuje pouze vlnění příčné. Z předchozích výzkumů (viz [12]) byla také zjištěna potřeba imerzního prostředí k docílení dobrého spojení sondy a povrchu vačkové hřídele. Při snaze aplikovat ultrazvukovou metodu na určení topografie zakalených vrstev byly využity řezy ložisek z kapitoly 4.2.2.. Je zde známá hloubka zakalení, proto bude při měření snazší nalézt echo od přechodové zóny.

Pro měření jsou dostupné tyto sondy:

- imerzní sonda s frekvencí 10MHz a $\varnothing$ 15mm (dále jen sonda č.1)
- sonda Panametrics V260-RM o frekvenci 15MHz, imerzně použitelná v rozsahu výšky fokusační předsádky o $\varnothing$ 3mm (dále jen sonda č.2)

Postup měření:

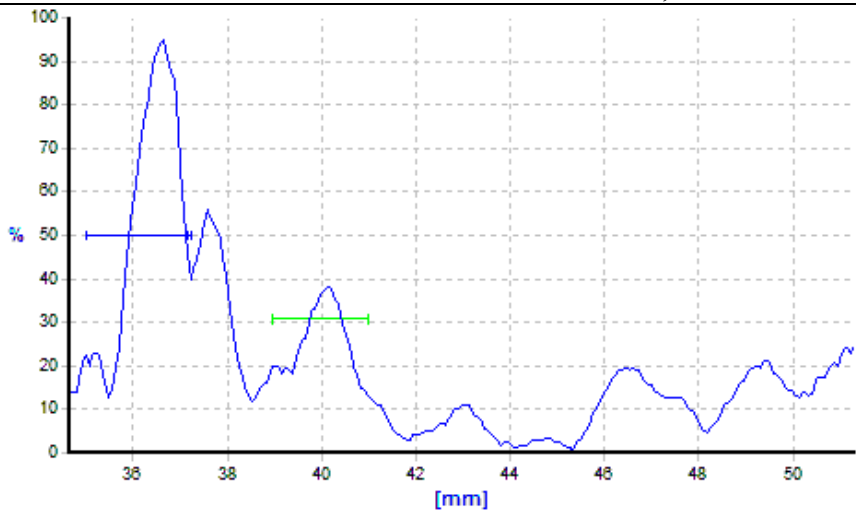
Nejprve se umístil měřený řez ložiska na dno nádrže přípravku. Poté se upnula sonda do držáku a naklonila se o úhel α_I . Dále bylo třeba napustit imerzní kapalinu (vodu) až nad povrch ložiska. Pro sondu č. 1 je vhodná výška hladiny nad povrch hřídele přibližně 10mm. U sondy č. 2 je tato výška zhruba 3mm. Držákem se sondou se poté najede nad měřený povrch do výšky 2 až 5mm. Tato výška rozhoduje o umístění echa od povrchu na záznamu (A-scanu). Nyní je třeba posuvy do všech tří směrů zaaretovat pomocí aretačních šroubů. V další fázi měření je již měřicí postup zcela závislý na vzhledu A-scanu. Je třeba echo dostatečně zvětšit (zvýšit zesílení) a nastavit na vhodné místo na vodorovné ose A-scanu. Dále je možné využít dostupných možností daného přístroje jako je například použití filtrů, popřípadě přímo nastavit úhel sondy na přístroji. Tímto způsobem by mělo dojít ke zviditelnění echa od přechodové zóny. Vzdálenost ech od povrchu a od přechodové zóny se odměří pomocí měřících bran. Pro měření vzdálenosti ech se dle dostupných zdrojů ([10]) dá

využít způsob měření bok-bok. První brána je v 50% velikosti echa od povrchu a druhá brána v 30% velikosti echa od přechodové zóny. [10]

Měření přístrojem DIO 562 – 2CH:

Tab. 3 a 4 zachycují výsledky měření s využitím obou dostupných sond na přístroji DIO 562 – 2CH.

Tab. 3 - DIO 562 - Měření č. 1 - Ložisko č. 1 - měřen střed s hloubkou zakalení 3,8mm

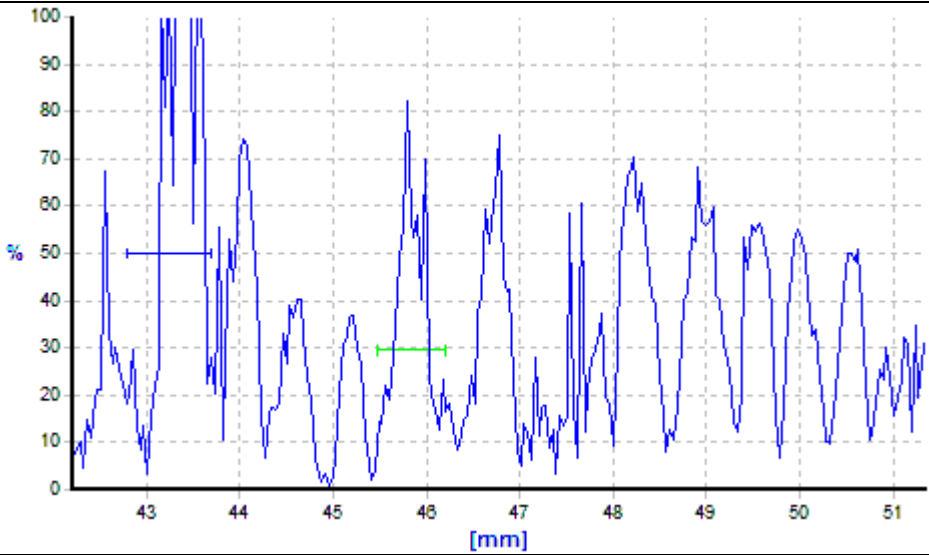
Použitý přístroj:	DIO 562 – 2CH
Použitá sonda:	10MHz, imerzní sonda Ø15mm
Nastavení přístroje a přípravku	Nastaven úhel naklonění sondy $\alpha_1 = 17^\circ$ na přípravku i na přístroji, použit filtr 4MHz, zesílení 39dB
Měřicí vzorek:	Ložisko č. 1 – střed – hloubka zakalení 3,8mm
A-scan:	
Výsledky:	Echo od povrchu hřídele na ~ 36,5mm, jediné stabilní echo zřejmě od přechodové zóny na ~ 40mm, měřicími bránami naměřena vzdálenost ech 3,5mm (způsob měření bok - bok)
Problémy při měření:	Veliký šum na pozadí – neustále se pohybující rušivá echa. Na A-scanu jsou to všechna echa od 42mm dále.

V tab. 3 je zobrazen záznam z měření zakalené vrstvy hloubky 3,8mm na středu ložiska č. 1. Toto měření provázal velký šum na pozadí. Neustále docházelo k překrývání možného echa od přechodové zóny rušivými echy. Není tedy možné říci, zda-li se skutečně jedná o platné echo od přechodové zóny, či o jiný ruch. Ani případná změna úhlu α_1 nepřinesla zvýraznění tohoto echa, přestože byl tento úhel postupně po jednom stupni nastavován

v měřicím rozsahu od 0° do 30°. Při velikosti úhlu nad 30° již nebylo možno nalézt ani echo od povrchu součásti. Použitá sonda také neumožňuje měření zakalené vrstvy v krajních polohách ložiska. Důvodem je velký průměr sondy. Proto v dalším měření na tomto ložisku bude využita sonda s vyšší frekvencí a menším průměrem.

Tab. 4 zachycuje měření na stejném ložisku s využitím sondy Panametrics V260-RM o frekvenci 15MHz a průměru předsádky 3mm.

Tab. 4 - DIO 562 – Měření č. 2 - Ložisko č. 1 – měřen střed s hloubkou zakalení 3,8mm

Použitý přístroj:	DIO 562 – 2CH
Použitá sonda:	Panametrics V260-RM o frekvenci 15MHz
Nastavení přístroje a přípravku	Nastaven úhel naklonění sondy $\alpha_1 = 17^\circ$ na přípravku i na přístroji, zesílení 65dB
Měřicí vzorek:	Ložisko č. 1 – střed – hloubka zakalení 3,8mm
A-scan:	
Výsledky:	Echo od povrchu hřídele na ~ 43,5mm, z důvodu obrovského ruchu od předsádky sondy není možné nalézt echo od přechodové zóny
Problémy při měření:	Veliký šum na pozadí – neustále se pohybující rušivá echa.

Sondou Panametrics V260-RM o frekvenci 15MHz nebylo možné nalézt echo od přechodové zóny. Je zde velký ruch způsobený fokusační předsádkou sondy. Po odejmutí předsádky tento ruch sice zmizí, nicméně není možné bez této předsádky měřit v imerzním prostředí. Stejně nepříznivých výsledků s touto sondou bylo dosaženo i na krajích ložiska.

Nyní bylo postupně prováděno měření s využitím přístroje DIO 562 – 2CH a obou dostupných sond i na dalších ložiscích (ložisko č. 2 až ložisko č. 14). Tyto měření ale

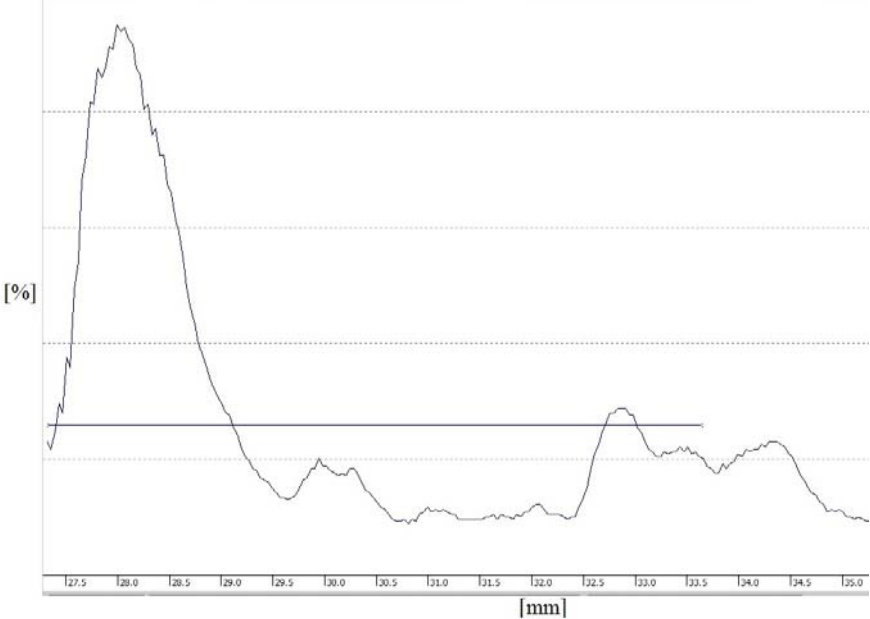
nepřinesly žádné nové poznatky. Stále docházelo k výraznému šumu, jenž překrýval možná echa od přechodové zóny.

K vyřešení předchozích neúspěchů měření byla snaha nahradit starší ultrazvuk DIO 562 – 2CH ultrazvukem novějším. Jako novější ultrazvuk zde byl použit přístroj DIO 2000 – 1CH od společnosti STARMANS electronics, s.r.o., jenž lze propojit přímo s počítačem.

Měření přístrojem DIO 2000 – 1CH:

Při následujících měřeních byla využita pouze imerzní sonda s frekvencí 10MHz a $\varnothing$ 15mm. Druhá sonda Panametrics V260-RM o frekvenci 15MHz nebyla s tímto přístrojem zcela kompatibilní. Téměř každou minutu docházelo k výpadkům datového toku mezi počítačem a přístrojem. Co se týče parametrů měření, tak opět byl použit náklon sondy $\alpha_1 = 17^\circ$ ke zvýraznění možného echa od přechodové zóny. Tab. 5 , 6 a 7 zachycují nejzajímavější záznamy z měření.

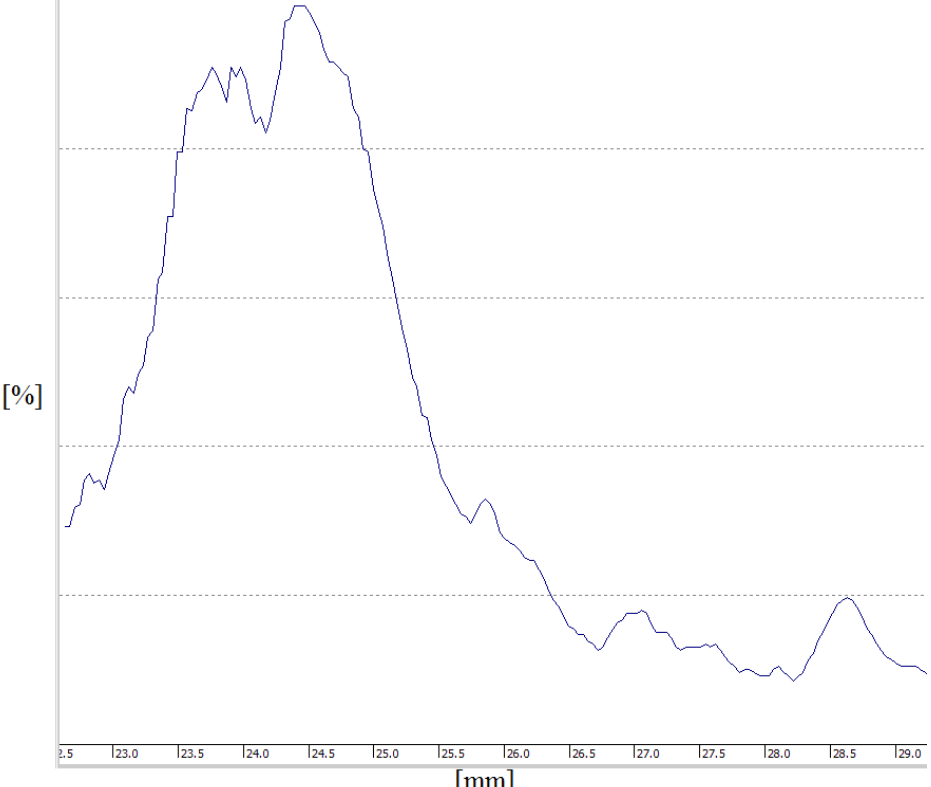
Tab. 5 - DIO 2000 – Měření č. 1 - Ložisko č. 11 – měřen střed s hloubkou zakalení 4,0mm

Použitý přístroj:	DIO 2000 – 1CH
Použitá sonda:	10MHz, imerzní sonda $\varnothing$ 15mm
Nastavení přístroje a přípravku	Nastaven úhel naklonění sondy $\alpha_1 = 17^\circ$ na přípravku, zesílení 62,3dB
Měřicí vzorek:	Ložisko č. 11 – střed – hloubka zakalení 4,0mm
A-scan:	
Výsledky:	Echo od povrchu hřídele na ~ 28mm, možné echo od přechodové zóny na ~ 32,5mm, vzdálenost ech ~ 4,5mm
Problémy při měření:	Opět velký šum za pozadí, jenž často překrýval možné nalezené echo od přechodové zóny

V tab. 5 jsou patrné výsledky měření pro hloubku zakalení 4,0mm středu ložiska č.11. A-scan vykazuje možné echo od přechodové zóny ve vzdálenosti 4,5mm od povrchového echa. Tento výsledek ale opět nelze vzít za správný, neboť zde byla opět přítomna velmi výrazná rušivá echa, jenž často zakrývala možné nalezené echo od přechodové zóny.

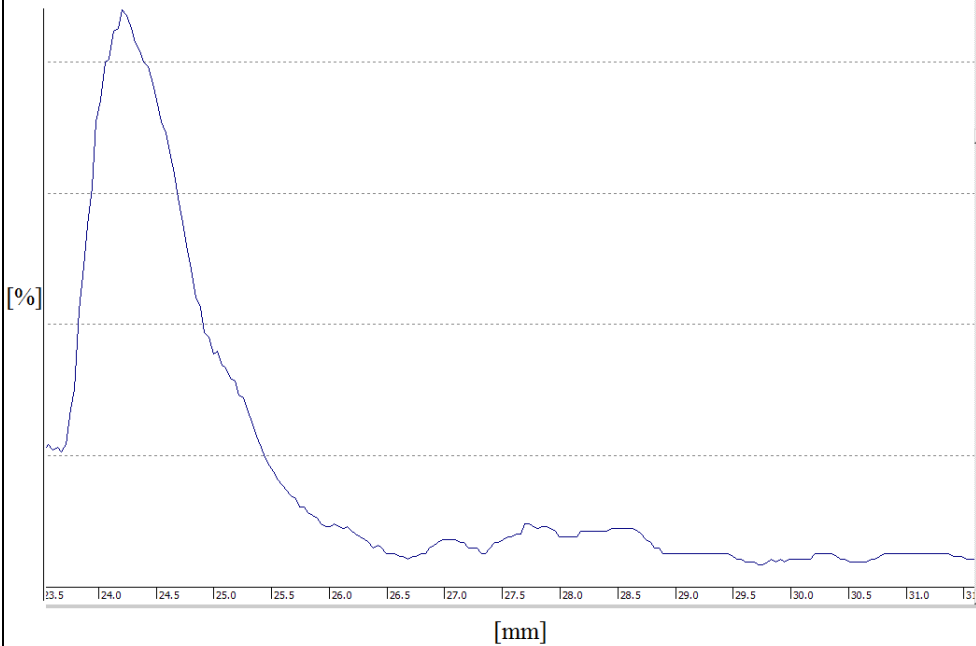
Při tomto měření byla použita velmi užitečná funkce dostupná v měřicím softwaru přístroje DIO 2000. Jedná se o vytvoření tzv. obálky, kdy dojde k vyhlazení křivky záznamu a tím k lepšímu zviditelnění možných ech.

Tab. 6 - DIO 2000 – Měření č. 2 - Ložisko č. 12 – měřen střed s hloubkou zakalení 4,0mm

Použitý přístroj:	DIO 2000 – 1CH
Použitá sonda:	10MHz, imerzní sonda Ø15mm
Nastavení přístroje a přípravku	Nastaven úhel naklonění sondy $\alpha_1 = 17^\circ$ na přípravku, zesílení 54,5dB
Měřicí vzorek:	Ložisko č. 12 – střed – hloubka zakalení 4,0mm
A-scan:	
Výsledky:	Echo od povrchu hřídele na ~ 24,5mm, možné echo od přechodové zóny na ~ 28,5mm, vzdálenost ech ~ 4,0mm
Problémy při měření:	Šum na pozadí překrývající možné echo od přechodové zóny

Dle výsledků měření z výše uvedené tabulky odpovídá vzdálenost ech hloubce zakalení. Nicméně i při tomto měření zde byla opět přítomna rušivá echa.

Tab. 7 - DIO 2000 – Měření č. 3 - Ložisko č. 1 – měřen střed s hloubkou zakalení 3,8mm

Použitý přístroj:	DIO 2000 – 1CH
Použitá sonda:	10MHz, imerzní sonda Ø15mm
Nastavení přístroje a přípravku	Nastaven úhel naklonění sondy $\alpha_1 = 17^\circ$ na přípravku, zesílení 56,7dB
Měřící vzorek:	Ložisko č. 1 – střed – hloubka zakalení 3,8mm
A-scan:	
Výsledky:	Echo od povrchu hřídele na ~ 24,5mm, echo od přechodové zóny nenalezeno
Problémy při měření:	Šum na pozadí překrývající možné echo od přechodové zóny

Z tab. 7 je dle záznamu patrné, že zde nelze nalézt echo od přechodové zóny. Toto měření bylo prováděno na středu ložiska č. 1. Velmi podobných výsledků bylo dosaženo i na zbývajících ložiscích. Jak již bylo také výše uvedeno, lze použitou sondou měřit jen střed ložiska.

Ze všech výše uvedených výsledků měření na přístrojích DIO 562 – 2CH a DIO 2000 – 1CH a s použitím obou dostupných sond je patrné, že metodiku určování topografie zakalených vrstev na vačkové hřídeli rozvodu motoru je nutno podrobit dalšímu vývoji.

Pro další vývoj této metody se bude třeba zaměřit na odstranění rušivých ech, která provázela všechna měření. Tento problém by mohl být řešitelný aplikací analogově-digitálního převodníku signálu. Některé zdroje ([20]) uvádějí použití 100MHz převodníku. Po převedení signálu do digitální podoby je tento signál podroben procesu odfiltrování šumu pomocí

tzv. Wienerova filtru. Tento filtr je sice přednostně využíván na odstranění šumu z fotografií, nicméně lze ho dle [20] aplikovat i na digitálně převedený ultrazvukový záznam. Softwarová aplikace Wienerova filtru je možná například použitím počítačového programu Matlab. [20] Dalším možným řešením pro nalezení echa od přechodové vrstvy je využití sondy s ještě vyšší frekvencí, než je 10MHz. Pro co nejvyšší rozptyl ultrazvukových vln na přechodové zóně by bylo vhodné využít imerzní sondu s frekvencí až 25MHz. S takto vysokou frekvencí sondy je ale spojen další problém. Bude nutné sehnat i ultrazvukový přístroj z frekvenčním rozsahem přijímače až do 25MHz, nebo i výše. Oba zde použité přístroje mají tento rozsah pouze do 20MHz (viz Příloha 5). Také je zde nutné zvolit sondu menšího průměru ($\varnothing$ 5mm nebo méně), aby bylo možno měřit i krajní polohy ložisek a vaček.

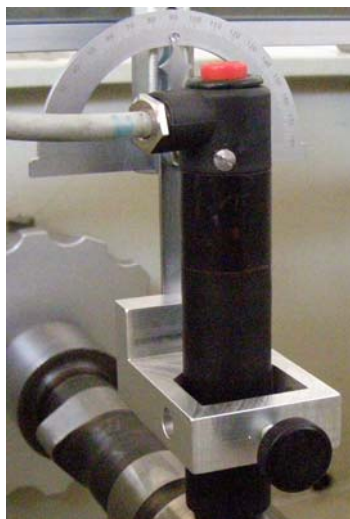
4.3.3. Možnosti aplikace metody magnetického bodového pólu při topografii zakalených vrstev vačkové hřídele rozvodu motoru

V této kapitole byl proveden výzkum použitelnosti metody magnetického bodového pólu na vačkové hřídeli. Pro měření se využil přístroj DOMENA-gHr. Přestože se tato metoda dle strukturního složení součásti jeví jako nevhodná (viz kap. 4.3.1.), při předchozích výzkumech se zjistil neobvykle vysoký rozdíl hodnot magnetizace dM při prvním měření M_1 a při druhém M_2 na vačkové hřídeli povrchově kalené oproti hřídeli nekalené. Dle poznatku z publikace [22] je totiž pro rozlišení martenzitu a perlitu možno využít právě rozdíl dM . Proto zde bude zkoumána možná funkční závislost mezi rozdílem dM a hloubkou zakalení. Pro měření se zde využily řezy ložisek z kap. 4.2.2., neboť je zde známá hodnota hloubky zakalení. Také bylo provedeno několik měření na ložiscích bez povrchově zakalené vrstvy.

Vlastní měření probíhalo následujícím způsobem:

Po zapnutí přístroje DOMENA-gHr byla nastavena velikost magnetizace 4 a po přiložení sondy na etalon změřena hodnota magnetizace etalonu. Tento etalon má danou hodnotu magnetizace $M_{etalon} = 200A \cdot m^{-1}$. Protože přístroj na displeji ukázal odlišnou hodnotu, bylo třeba v režimu kalibrace určit korekční konstantu pro přepočítání na správnou hodnotu. Po této kalibraci již přístroj vykázal hodnotu blíže $200A \cdot m^{-1}$. Kalibrace se ještě několikrát zopakovala, než bylo dosaženo přesné hodnoty $200A \cdot m^{-1}$. Poté se sonda $\varnothing$ 21mm a délky 120mm upnula do prizmatického držáku sondy polohovacího přípravku (viz obr. 34). Na základní desku v prázdné nádrži polohovacího přípravku se položilo rozříznuté ložisko řezem dolů a sondou se pomocí polohovacího přípravku najelo přímo k měřenému ložisku.

Přístroj se přepnul do režimu měření a byly zaznamenány hodnoty M_1 a M_2 a určen rozdíl dM . Tento postup byl zopakován i pro další ložiska. Kalibrace byla prováděna po čtyřech až pěti měřeních. Tab. 8 zachycuje výsledky měření.



Obr. 34 – Měřicí sonda upnuta do prizmatického držáku polohovacího přípravku

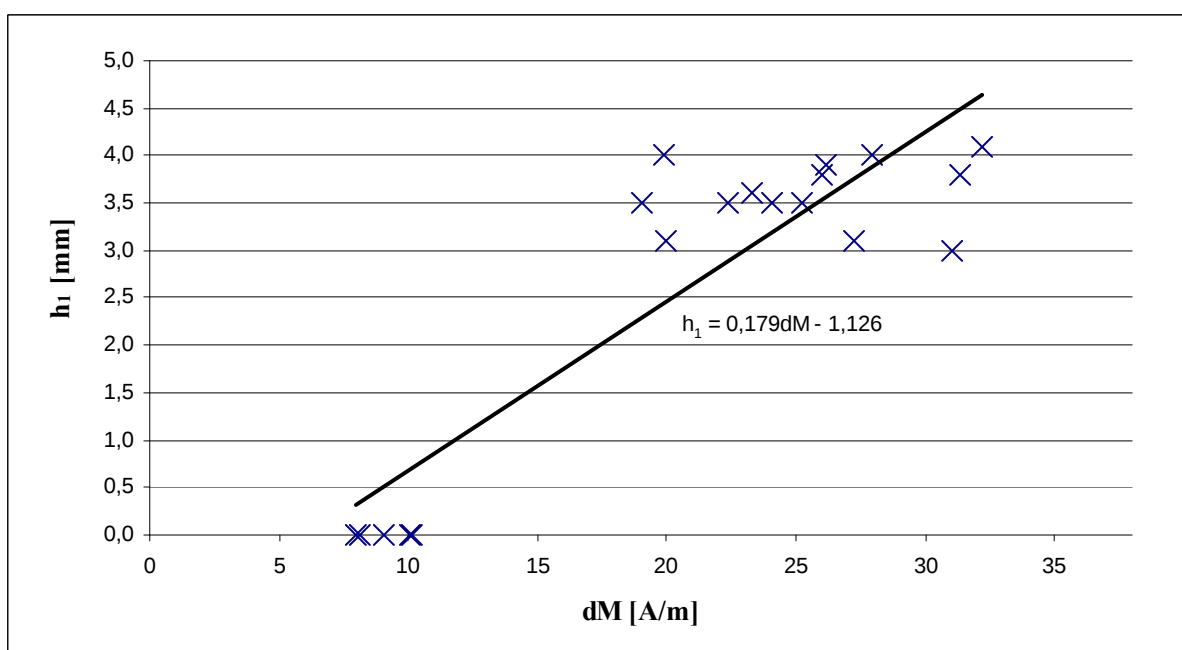
Tab. 8 – Tabulka výsledků měření přístrojem DOMENA-gHr a příslušné hloubky zakalení středu ložiska (tučně jsou označeny naměřené hodnoty magnetizace etalonu)

Stav	Ložisko	Magnetizace [A/m]			Magnetizace po korekci [A/m]			Kalibr $M_{\text{etalon}} = 200$ [A/m]	Hloubka zakalení středu [mm]
		M_1	M_2	dM	$M_{1\text{kor}}$	$M_{2\text{kor}}$	dM	$M_{\text{etalon}} \text{ změřená [A/m]}$	
Povrchově kaleno	1	139	113	26	139,00	113,00	26,00	200	3,8
	2	137	113	24	137,41	113,34	24,07	199,4	3,5
	3	149	117	32	149,90	117,71	32,19	198,8	4,1
	4	145	120	25	146,32	121,09	25,23	198,2	3,5
	5	144	113	31	145,75	114,37	31,38	197,6	3,8
	6	137	115	22	139,09	116,75	22,34	197	3,5
	7	147	124	23	148,74	125,46	23,27	197,67	3,6
	8	145	118	27	146,22	118,99	27,23	198,33	3,1
	9	138	112	26	138,69	112,56	26,13	199,00	3,9
	10	149	118	31	149,25	118,20	31,05	199,67	3,0
	11	154	126	28	153,74	125,79	27,95	200,33	4,0
	12	136	116	20	135,32	115,42	19,90	201	4,0
	13	152	132	20	151,62	131,67	19,95	200,5	3,1
	14	140	121	19	140,00	121,00	19,00	200	3,5
Žiháno	15	146	138	8	146,00	138,00	8,00	200	0
	16	157	147	10	157,59	147,55	10,04	199,25	0
	17	145	136	9	146,10	137,03	9,07	198,5	0
	18	157	147	10	158,79	148,67	10,11	197,75	0
	19	158	150	8	160,41	152,28	8,12	197	0

U naměřených hodnot bylo třeba provést korekci k zachování zaručené přesnosti měření. Magnetizaci po korekci $M_{1,2kor}$ je možné určit dle vztahu (7):

$$M_{1,2kor} = \frac{M_{etalon}}{M_{etalon} změřená} \cdot M_{1,2} \quad (7)$$

kde $M_{etalon} = 200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ je pevně daná magnetizace etalonu, $M_{etalon} změřená [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$ je naměřená hodnota magnetizace na etalonu a $M_{1,2} [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$ jsou magnetizace prvního a druhého měření.



Obr. 35 – Závislost hloubky zakalení středu ložiska h_1 [mm] na rozdílu magnetizací $dM [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$

Po zkonstruování grafu závislosti hloubky zakalení středu ložiska h_1 [mm] na rozdílu hodnot magnetizace $dM [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$ (viz obr. 35) byla pomocí lineární regrese v programu Microsoft Excel vytvořena funkční závislost (8) ve tvaru:

$$h_1 = 0,179dM - 1,126 [\text{mm}]. \quad (8)$$

Pearsonův korelační koeficient pro danou lineární regresi vychází $r = 0,8929$ (určeno v aplikaci Microsoft Excel).

Dosažením rozdílů dM do vzorce (8) dostáváme vypočtenou hloubku zakalení. Porovnání těchto výsledků se skutečnou hloubkou zakalení středu ložiska zachycuje tab. 9.

Tab. 9 – Porovnání skutečné a vypočtené hloubky zakalení středu ložiska

Stav	Ložisko	$h_{1skutečná}$ [mm]	$h_{1vypočtená}$ [mm]	$\Delta h = h_{1skutečná} - h_{1vypočtená}$ [mm]	Relativní chyba Δh_r [%]
Povrchově kaleno	1	3,8	3,53	0,27	7,16
	2	3,5	3,18	0,32	9,06
	3	4,1	4,64	-0,54	13,09
	4	3,5	3,39	0,11	3,15
	5	3,8	4,49	-0,69	18,17
	6	3,5	2,87	0,63	17,94
	7	3,6	3,04	0,56	15,57
	8	3,1	3,75	-0,65	20,89
	9	3,9	3,55	0,35	8,94
	10	3,0	4,43	-1,43	47,74
	11	4,0	3,88	0,12	3,06
	12	4,0	2,44	1,56	39,10
	13	3,1	2,45	0,65	21,13
	14	3,5	2,28	1,23	35,00
Žháno	15	0	0,31	-0,31	-
	16	0	0,67	-0,67	-
	17	0	0,50	-0,50	-
	18	0	0,68	-0,68	-
	19	0	0,33	-0,33	-

Relativní chyba výpočtu byla určena jako

$$\Delta h_r = \left| \frac{\Delta h}{h_{1skutečná}} \right| \cdot 100 \quad [\%]. \quad (9)$$

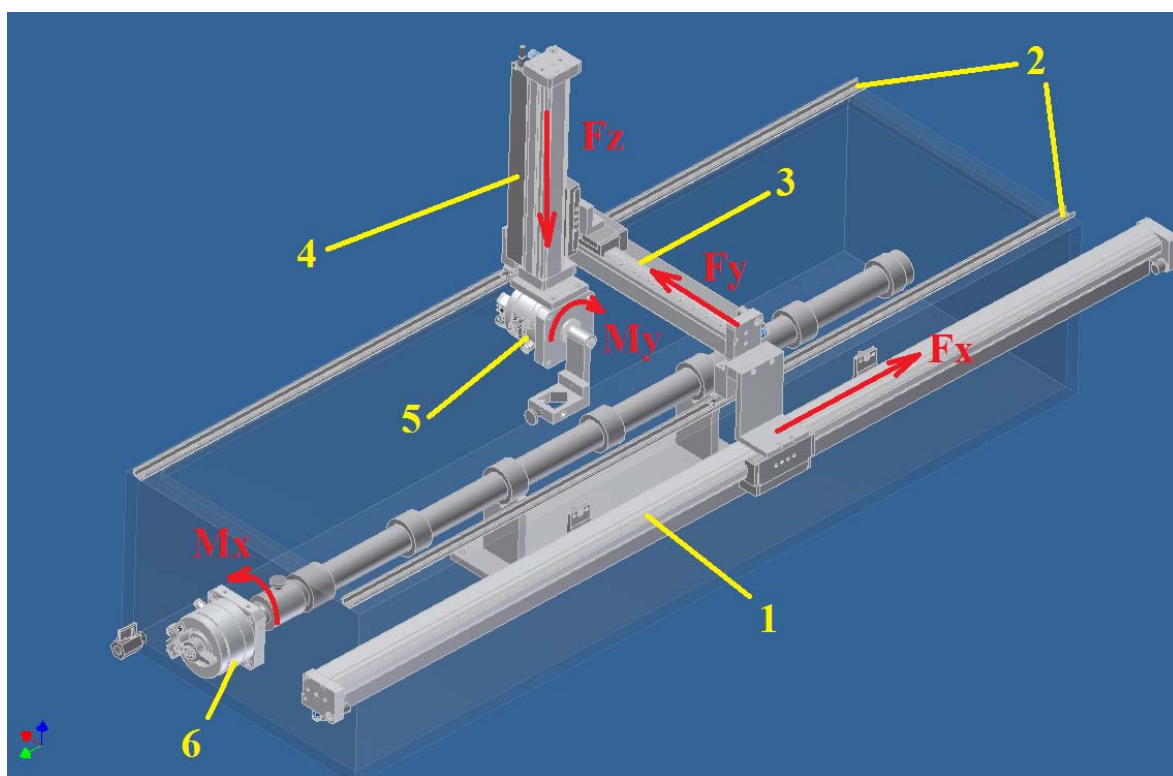
Z určených relativních chyb výpočtu v tab. 9 je patrné, že přesnost vytvořeného regresního vztahu (8) je zcela nedostatečná. Dochází zde k odchýlkám od přesné hodnoty hloubky zakalení středu ložiska v řádech až desítek procent. Pro možné zpřesnění by bylo vhodné ještě naměřit rozdíl dM na vzorcích se zakalenou vrstvou hloubky od 1 do 2mm, neboť vzorky těchto hloubek nebyly při měření k dispozici. Problematicky se také jeví velký průměr měřící sondy, neboť je možno měřit jen střed ložiska. Pro další vývoj této metody je tedy nutné použít sondu menšího průměru.

4.4. Návrh automatizovaného polohovacího přípravku pro topografii zakalených vrstev nedestruktivními metodami

Automatizace polohovacího přípravku z kapitoly 4.1. je pro využití ve výrobních podnicích nutná. Dosáhne se především zvýšení produktivity práce daného měřicího zařízení a zjednodušení práce s přípravkem.

4.4.1. Pohyblivost automatizovaného přípravku

Pro úspěšně provedenou automatizaci polohovacího přípravku je nejprve nutné určit potřebnou pohyblivost přípravku. Opět jsou nutné přímočaré pohyby do tří vzájemně na sebe kolmých směrů x , y , z . Dále je třeba měřicí sondu natočit o úhel α_l (viz kap. 4.1.4.). Posledním nutným pohybem je pootočení vačkové hřídele kolem osy pro správné nastavení vačky (kap. 4.1.2.). Je tedy třeba tří přímočarých a dvou rotačních pohonů. Pro vlastní konstrukci byly využity pneumatické pohony s odměřováním od firmy FESTO. Navrhnuté automatizované polohovací zařízení (viz Příloha 9) zachycuje obr. 36.



Obr. 36 – Návrh automatizovaného zařízení včetně silových účinků v polohovacím přípravku (popis pozic obr. 36 je na následující stránce)

Popis k obr. 36:

- 1... přímočarý pohon FESTO DGCI-18-1250-KF (viz Příloha 2)
- 2... lineární vedení ROLLON TEX20-1200-CEX20-2RS (viz Příloha 1)
- 3... přímočarý pohon FESTO DGCI-18-225-KF
- 4... přímočarý pohon FESTO DGCI-18-160-KF
- 5... kyvný pohon FESTO DSMI-25-270-A-B (viz Příloha 3)
- 6... kyvný pohon FESTO DSMI-25-270-A-B

Z ručně ovládaného polohovacího přípravku bude využita nádrž (viz Příloha 9 - výkres FS-KMT-002), dvě lineární vedení ROLLON TEX20-1200-CEX20-2RS (viz Příloha 1) a také držák sondy (viz Příloha 9 - výkres FS-KMT-008). Aby bylo možné s jistotou říci, že navrhnuté zařízení bude funkční, bylo provedeno početní řešení silových účinků v polohovacím zařízení. Výsledky byly porovnány s maximálními možnými hodnotami dle katalogových listů daných pohonů. Celá výpočtová zpráva se nachází v Příloze 4.

4.4.2. Zjednodušený návrh řízení automatizovaného polohovacího přípravku

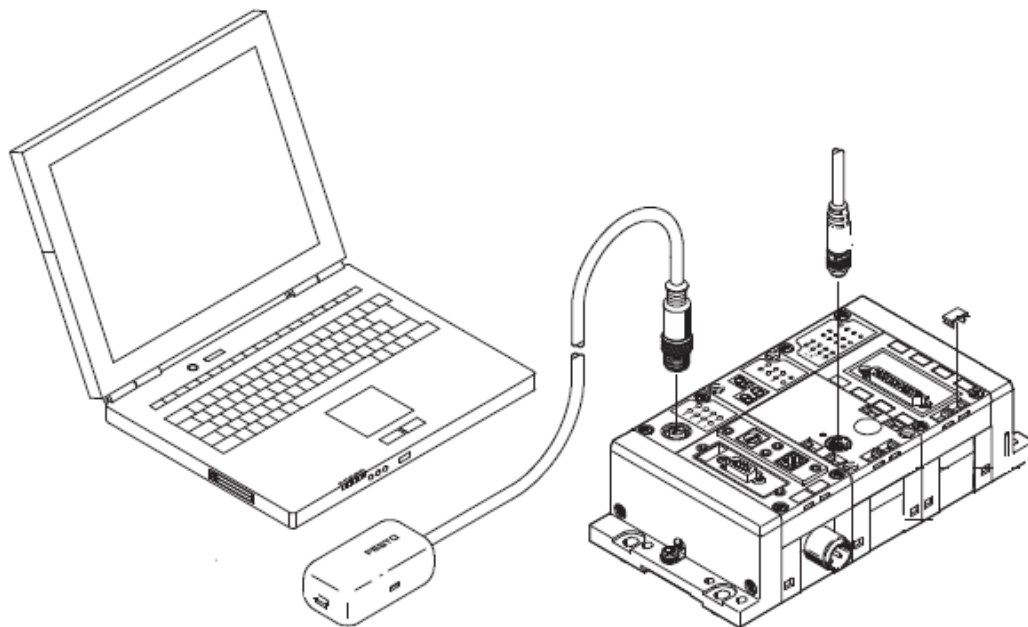
V této kapitole bude proveden zjednodušený návrh řízení automatizovaného polohovacího zařízení. Dle katalogu přímočarých a kyvných pohonů FESTO je k řízení os nutná konfigurace prvků dle tab. 10.

Tab. 10 – Tabulka potřebných komponentů pro řízení pohonů DGCI a DSMI

(■ – potřebný komponent) [15]

[3]		Linear drive DGCI	Swivel module DSMI
[1]	Axis controller CPX-CMAX	■	■
[2]	Proportional directional control valve VPWP	■	■
[4]	Sensor interface CASM-S-D2-R3	-	■
[5]	Sensor interface CASM-S-D3-R7	-	-
[6]	Connecting cable KVI-CP-3-...	■	■
[7]	Connecting cable NEBC-P1W4-...	-	■
[8]	Connecting cable NEBC-A1W3-...	-	-

Po sestavení a propojení komponentů dle tab. 10 je možno spojit systém ovládání os s počítačem (viz obr. 37).



Obr. 37 – Propojení systému řízení os s počítačem (notebookem) [15]

Výše uvedený zjednodušený návrh řízení automatizovaného polohovacího přípravku je možno považovat za základní krok pro úspěšnou automatizaci tohoto přípravku.

Po vlastním vyrobení přípravku je třeba provést zpřesněný návrh řízení zahrnující nastavení ovládacího softwarového vybavení, s nimž bude při měření možné ovládat jednotlivé pohony. Součástí tohoto návrhu bude například vytyčení kolizních prostorů upnuté sondy s okolním prostředím. Přestože byly při výpočtu voleny rychlosti a zrychlení přímočarých i rotačních pohybů s ohledem na možnosti daných pohonů, je po uvedení zařízení do provozu nutné vhodně zvolit velikost řídicího tlaku v systému tak, aby při pohybu nedocházelo k rázům, chvění, či dokonce nevhodným pohybům vedoucím k poškození měřicí sondy či přípravku samotného.

4.4.3. Předběžná cenová kalkulace automatizovaného polohovacího přípravku

Pro navržené automatizované polohovací zařízení je v tab. 11 uvedena předběžná cenová kalkulace. Protože se jedná o přestavbu ručního polohovacího zařízení (obr. 22) na zařízení automatizované (obr. 36), nejsou již v této kalkulaci započteny díly využitě z ručního polohovacího přípravku.

Tab. 11 – Předběžná cenová kalkulace automatizovaného polohovacího zařízení

Komponent:	Množství [ks]:	Cena bez DPH [Kč/ks]	Cena celkem bez DPH [Kč]
FESTO DGCI-18-1250-KF	1	30 896,07	30 896,07
FESTO DGCI-18-225-KF	1	22 224,62	22 224,62
FESTO DGCI-18-160-KF	1	21 667,93	21 667,93
FESTO DSMI-25-270-A-B	2	10 206,62	20 413,24
Ovladač osy CPX-CMAX-C1-1	5	9 801,48	49 007,40
Proporcionální průtokový ventil VPWP-4-L-5-10-E	5	10 448,57	52 242,85
Rozhraní pro odměřování CASM-S-D2-R3	2	4 643,80	9 287,60
Propojovací vedení KVI-CP-3-GS-GD-2	5	882,61	4 413,05
Propojovací vedení NEBC-P1W4-K-0.3-N-M12G5	2	884,98	1 769,96
Adaptéry pohonů	6	300,00	1 800,00
Náboj	1	600,00	600,00
Spojovací materiál	1	300,00	300,00
Celkem bez DPH [Kč]			214 622,72

5. Diskuze

Tato diplomová práce se zabývala možnostmi využití nedestruktivních metod při určování topografie zakalených vrstev. Ultrazvuková metoda a metoda magnetického bodového pólu byly podrobeny výzkumu možné použitelnosti na zvolenou strojní součást, vačkovou hřídel rozvodu motoru TEDOM.

Před vlastním měřením pomocí nedestruktivních metod na vačkové hřídeli rozvodu motoru se ale nejprve ověřila platnost současně využívané destruktivní metody měření. Dle dosažených výsledků je podmínka o poklesu tvrdosti pod 450HV při nedostatečně zakaleném povrchu platná. Důkazem je například měření na ložisku č.14, kde při hloubce zakalení 0,6mm je tvrdost 420HV. Metodika měření je tedy dle provedeného výzkumu zcela správná, nicméně je také velmi časově náročná. Při měření dochází ke zničení vačkové hřídele, tudíž i k finančním ztrátám při výrobě. Proto je tedy třeba nahradit tuto destruktivní metodu metodou nedestruktivní.

Při snaze aplikovat ultrazvukovou metodu určování topografie zakalených vrstev na vačkovou hřídel se provádělo měření na celkem čtrnácti řezech ložisky se známou topografií zakalených vrstev. U přístroje DIO 562 – 2CH a imerzní sondy 10MHz byl zaznamenán možný úspěch měření pouze na jednom ložisku (viz tab. 3), při kterém přístroj vykazoval možné echo od přechodové zóny. Na zbývajících ložiscích nebyl přístroj schopen toto echo najít. Všechna měření provázal ale silný šum na pozadí. Také velký průměr sondy umožňoval měřit pouze střed ložiska. Druhá dostupná sonda Panametrics V260-RM 15MHz se během měření ukázala jako zcela nevhodná. Důvodem byl silný ruch od předsádky sondy. Modernější přístroj DIO 2000 – 1CH zaznamenal možný úspěch při měření pouze na dvou ložiscích (tab. 5 a 6). Opět se zde objevilo možné echo od přechodové zóny, nicméně z důvodu přítomnosti rušivých ech není možné prohlásit měření za platná.

Po shrnutí dosažených výsledků měření z obou přístrojů je pro další vývoj této metody nutné využít imerzní sondu s frekvencí vyšší než 10MHz a s menším průměrem (pod Ø5mm). Pro co největší rozptyl ultrazvukových vln od přechodové zóny je vhodné využít sondu frekvence až 25MHz. Pro takto vysokou frekvenci sondy je ale třeba při měření využít ultrazvukový přístroj s frekvenčním rozsahem přijímače až do 25MHz. Dostupný přístroj DIO 2000 – 1CH má tento rozsah pouze do 20MHz, proto pro dané měření již nebude vhodný. Problém

s šumem a rušivými echy během měření by mohl být odstranitelný aplikací 100MHz analogově-digitálního převodníku signálu a dále také použitím Wienerova filtru.

Protože se ultrazvuková metoda měření jeví jako velmi perspektivní, rád bych pokračoval v jejím vývoji i v doktorském studiu na Katedře materiálu Technické univerzity v Liberci. Pro úspěšné dokončení by bylo také vhodné využít možnosti projektu Technologické agentury České republiky, případně projektu Fondu rozvoje vysokých škol.

Výzkumu použitelnosti metody měření na vačkové hřídeli byla podrobena i metoda magnetického bodového pólu. Byla určena funkční závislost mezi hloubkou zakalení h_1 a rozdílem dM magnetizace prvního a druhého měření ve tvaru $h_1 = 0,179dM - 1,126[mm]$.

Přesnost vytvořeného vztahu je ale zcela nedostatečná, neboť zde dochází k odchylkám od přesné hodnoty hloubky zakalení v řádech až desítek procent. Pro možné zpřesnění měření je vhodné ještě určit rozdíl dM na vzorcích se zakalenou vrstvou hloubky od 1 do 2mm, neboť vzorky těchto hloubek nebyly při měření k dispozici. Problematicky se také jeví velký průměr měřicí sondy, neboť je možno měřit jen střed ložiska. Pro další vývoj této metody je tedy nutné použít sondu menšího průměru.

Pro všechna předešlá nedestruktivní měření se využil polohovací přípravek k přesnému nastavení a polohování měřících snímačů vůči měřené součásti, jenž měl za úkol zajistit opakovatelnou přesnost a reprodukovatelnost měření. Cena přípravku činila 16 117 Kč bez DPH. Během provedených měření s využitím nedestruktivních metod byl přípravek shledán jako zcela funkční a pro laboratorní měření dostačující. Pro možnou každodenní aplikaci polohovacího přípravku ve výrobním podniku se provedl předběžný návrh automatizace tohoto polohovacího přípravku řízeného přes počítač. Předběžná cenová kalkulace tohoto automatizovaného polohovacího přípravku činí 214 622,72 Kč bez DPH.

6. Závěr

Dle zadání diplomové práce bylo provedeno následující:

1. V teoretické části práce byla probrána a vysvětlena struktura kalených vrstev, přechodových zón a podkladového materiálu a představeny nejpoužívanější způsoby tvorby zakalených vrstev. Také zde byla provedena rešerše destruktivních a nedestruktivních metod pro určování topografie zakalených vrstev a stanoveny podmínky jejich možného využití.
2. K dosažení opakovatelné přesnosti a reprodukovatelnosti měření byl navrhnut a zkonstruován polohovací přípravek pro upnutí a polohování měřících snímačů nedestruktivních metod pro určování topografie zakalených vrstev.
3. Pro vytvořený polohovací přípravek byl stanoven postup kontroly zadané strojní součásti – vačkové hřídele rozvodu motoru TEDOM. S využitím polohovacího přípravku se provedl na této součásti výzkum použitelnosti vybraných nedestruktivních metod.
4. Pro možnou každodenní aplikaci ve strojírenském podniku byl proveden předběžný návrh automatizovaného polohovacího přípravku řízeného přes počítač.

Provedenými měřeními byly dosaženy následující poznatky:

1. Při měření nedestruktivními metodami se zkonstruovaný polohovací přípravek ukázal jako plně funkční a pro laboratorní zkoušení zcela dostačující. Je v něm možno přesně upnout a polohovat měřící snímače těchto metod vůči zkoumané strojní součásti - vačkové hřídeli rozvodu motoru TEDOM.
2. Běžně užívaná destruktivní metoda určování topografie zakalených vrstev na vačkové hřídeli rozvodu motoru TEDOM je dle provedeného výzkumu zcela funkční, nicméně je také velmi časově náročná.
3. Dle metalografického rozboru struktury vačkové hřídele rozvodu motoru TEDOM je pro topografii zakalených vrstev vhodné využít ultrazvukovou metodu měření.

4. Ultrazvukovou metodu určování topografie zakalených vrstev na vačkové hřídeli rozvodu motoru TEDOM nebylo možné prozatím aplikovat. Pro další vývoj je nutno použít sondu o frekvenci až 25MHz a průměru menším než 5mm. Také bude třeba opatřit ultrazvukový přístroj s frekvenčním rozsahem přijímače až do 25MHz. Pro odstranění silného ruchu provázejícího měření je doporučeno pokusit se aplikovat analogově-digitální převodník signálu a dále také použít Wienerův filtr.
5. Při měření topografie zakalených vrstev metodou magnetického bodového pólu na vačkové hřídeli rozvodu motoru TEDOM byla určena funkční závislost mezi hloubkou zakalení h_1 a rozdílem dM magnetizace prvního a druhého měření ve tvaru:

$$h_1 = 0,179dM - 1,126[mm].$$

Přesnost tohoto vztahu je ale zcela nedostatečná, neboť dochází k odchýlkám od přesné hodnoty hloubky zakalení v řádech až desítek procent. Pro zpřesnění je nutné určit rozdíl dM na vzorcích se zakalenou vrstvou hloubky od 1 do 2mm, neboť vzorky těchto hloubek nebyly při měření k dispozici. Pro měření je také nutné použít sondu malého průměru, neboť dostupná sonda byla schopná měřit pouze uprostřed ložiska.

Použitá literatura

- [1] Korecký, J.: *Kalení oceli*. Vydavatelství ROH Praha 1951.
- [2] Pluhař, J. a kol.: *Nauka o materiálech*. SNTL/ALFA Praha 1989.
- [3] Ptáček, L. a kol.: *Nauka o materiálu II.*. CERM s.r.o. Brno 1999.
- [4] Jech, J.: *Tepelné zpracování oceli – Metalografická příručka*. STNL Praha 1977.
- [5] Daďourek, K.: *Přednášky předmětu Teorie tepelného zpracování – Presentace PDF*. Liberec 2009.
- [6] Hluchý, Modráček, Paňák: *Strojírenská technologie 1 - 2.díl - Metalografie a tepelné zpracování*. Nakladatelství Scientia Praha 1999.
- [7] Obraz, J.: *Ultrazvuk v měřicí technice*. STNL Praha 1976.
- [8] Kopec, B. a kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. CERM, s.r.o. Brno 2008
- [9] Rivenez, Lambert, Flambard, Martinez: *Mesurer par ultrasons Les profondeurs de trempe*. TRAITEMENT TERMIQUE 275 – 94.
- [10] Butera, Breneman: *Ultrasonic measurement of case depth*. Sonix Inc. Springfield, Va. June 2000.
- [11] Andršová, Z.: *Teplotní stabilita měření magnetickým bodovým polem*. Bakalářská práce KMT. V 54/06 Sb, TU v Liberci 2006.
- [12] Růžička, O.: *Nedestruktivní měření hloubky a tvrdosti povrchově kalených vrstev*. Bakalářská práce KMT-B-138, TU v Liberci 2008.
- [13] Ptáček, L. a kol.: *Nauka o materiálu I.*. CERM s.r.o. Brno 2001.
- [14] Pleskot a kol.: *Příručka pro měření tvrdosti*. Výzkumný a vývojový závod Praha VIII. Praha
- [15] Festo, s.r.o.: *Online katalog výrobků – Dokumentace k produktu Axis controllers CPX-CMAX*. Dostupné na WWW: <http://www.festo.cz>.
- [16] Kříž, R a kol.: *Stavba a provoz strojů I – Části strojů*. SNTL Praha 1977.
- [17] Skrbek, B.: *Materiálový rozbor vačkové hřídele z 7. – 9.10.2009, 12. vačka, 7. ložisko*. Středisko AJ221N – řízení jakosti – TEDOM a.s. – divize Motory. Jablonec nad Nisou 2009.
- [18] Šedo, I.: *Vliv demagnetizačního činitele na hodnotu M remanentního magnetického pole stěny feromagnetika*. Bakalářská práce KMT-B-092, TU v Liberci 2003.
- [19] Skrbek, B.: *Nové metody měření silných kalených vrstev*. Konference Defektoskopia 2003. Tatranská Štrba 2003. ISBN 80-968724-3-5

- [20] Honarvar, Zeighami: *Application of signal processing techniques to case depth measurements by ultrasonic method*. 17th World Conference on Non-destructive Testing. 25 – 28 Oct 2008. Shanghai. China
- [21] Věchet, Kesi, Špika, Eder: *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. s. 145 – 149. SNTL Praha 1989.
- [22] Skrbek, B.: *Rozlišení struktur opakovanou magnetizací*. Mezinárodní konference DEFECTOSKOPIE 08. Brno 4.-6.11. 08. [Sborník]. s. 203-206, ISBN 978-80-214-3759-3.

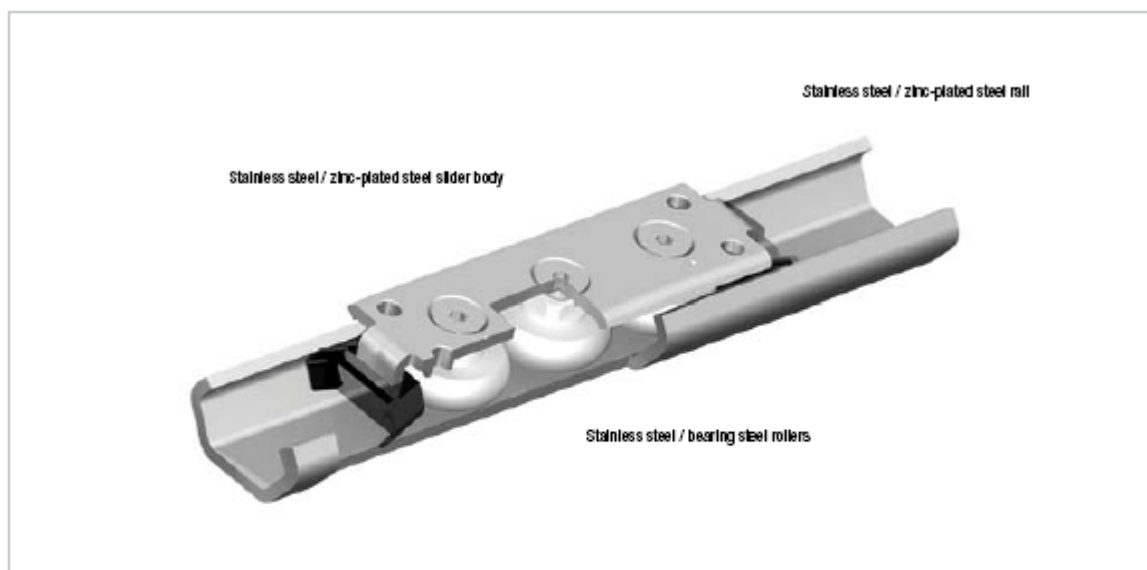
Seznam příloh:

- Příloha 1 - Lineární vedení TEX20-CEX20-2RS
- Příloha 2 - Přímočarý pohon s odměřováním DGCI-18-KF
- Příloha 3 - Kyvný pohon s odměřováním DSMI-25-270-A-B
- Příloha 4 - Výpočtová zpráva automatizovaného polohovacího přípravku
- Příloha 5 - Ultrazvukové přístroje DIO 562 - 2CH a DIO 2000 – 1CH
- Příloha 6 - Ultrazvuková sonda Panametrics V260-RM 15MHz a imerzní ultrazvuková sonda s frekvencí 10MHz a $\varnothing$ 15mm
- Příloha 7 - DOMENA – gHr – fotografie z měření
- Příloha 8 - Ultrazvukové měření - fotografie
- Příloha 9 - Výkresová dokumentace ručního a automatizovaného polohovacího přípravku – Kompletní dokumentace umístěna ve formátu PDF (Adobe Reader) a DWG (Autodesk AutoCAD) na přiloženém datovém nosiči - disku CD.

Příloha 1:

Lineární vedení TEX20-CEX20-2RS

Katalogový list:



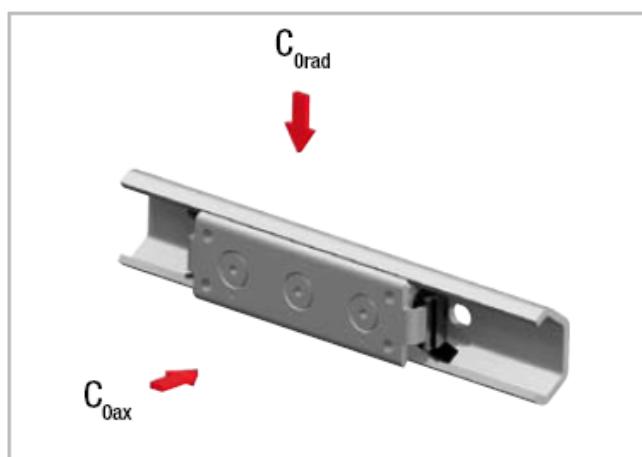
Performance characteristics:

- Available sizes: 20, 30, 45
- Max. slider operating speeds in the linear bearing rails:
1.5 m/s (59 in/s) (depending on application)
- Max. telescoping speed: 0.8 m/s (31.5 in/s)
(depending on application)
- Max. acceleration: 2 m/s² (78 in/s²)
(depending on application)
- Max. traverse: 3,060 mm (120 in)
(depending on size)
- Max. radial load capacity: 1,740 N (per slider)
- Temperature range for
stainless steel rails: -30 °C to +100 °C (-22 °F to +212 °F),
or steel rails: -30 °C to +120 °C (-22 °F to +248 °F)
- Available rail lengths from 160 mm to 3,120 mm (6.3 in to 122 in)
in 80-mm increments (3.15 in)
- Rollers lubricated for life
- Roller seal/shield:
CEX... Sliders => 2RS (splashproof seal),
CES... Sliders => 2Z (dust cover seal)
- Material: Stainless steel rails TEX... / UEX... 1.4404 (AISI 316L),
Steel rails TES... / UES... zinc-plated ISO 2081
- Material rollers: Stainless steel 1.4110 (AISI 440)

Remarks:

- The sliders are equipped with rollers that are in alternating contact with both sides of the raceway. Markings on the body around the outer roller pins indicate the correct arrangement of the rollers to the external load.
Important: Both outside rollers carry the radial load.
- By a simple adjustment of the eccentric roller, the slider has clearance or is set with the desired pre-stress on the rails.
- Sliders of Version 1 (with compact body) come standard with plastic wipers for cleaning the raceways.
- Wipers for sliders of Versions 2 and 3 on request.
- We do not recommend combining (stringing together) the rails.
- Recommended fixing screws according to ISO 7380 with low head height or TORX® screws on request.

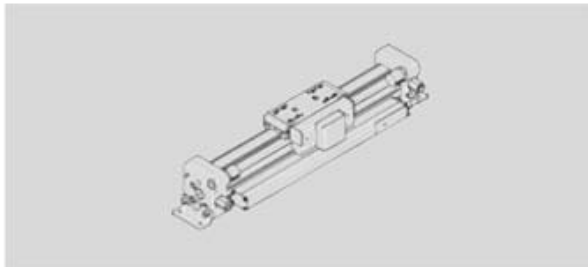
Maximální přípustné silové zatížení:



Configuration	C_{0rad} [N]	C_{0ax} [N]
TEX-20 – CEX20	300	170
TEX-30 – CEX30	800	400
TEX-45 – CEX45	1600	860
TES-20 – CES20	326	185
TES-30 – CES30	870	435
TES-45 – CES45	1740	935

Příloha 2:

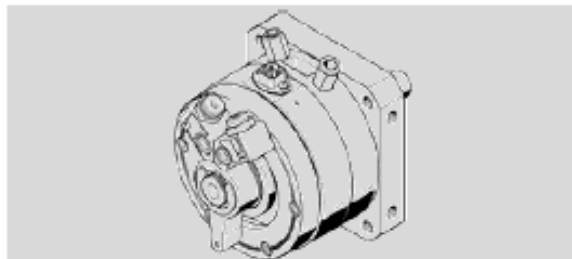
Přímočarý pohon s odměřováním DGCI-18-KF – Katalogový list:



parametr	hodnoty
zdvih	100 - 2,000 mm
průměr pístu	18 mm
tlumení	tlumič nárazu, tvrdá charakteristika tlumič nárazu, měkká charakteristika
montážní poloha	libovol.
vedení	kuličková oběžná pouzdra
snímání polohy	s vestavěným odměřováním
varianty	chráněné kuličkové oběžné vedení přídavné saně, standardně vlevo přídavné saně, standardně vpravo
provozní tlak	2 - 8 bar
provozní režim	dvojčinný
provozní médium	filtrovaný nemazaný stlačený vzduch, jemnost filtrace 5 µm
značka CE (viz prohlášení o shodě)	podle směrnice EU-EMC
třída odolnosti korozi KBK	1 2
okolní teplota	-10 - 60 °C
povolení	C-Tick
teoretická síla při 6 barech, zpětný chod	153 N
teoretická síla při 6 barech, dopředný chod	153 N
alternativní připojení	viz výkres výrobku
typ upevnění	příslušenstvím
připojení pneumatiky	M5
upozornění k materiálu	prostě mědi a PTFE
informace o materiálu víka	hliník legovaný pro tvárění
informace o materiálu těsnění	NBR TPE-U(PU)

Příloha 3:

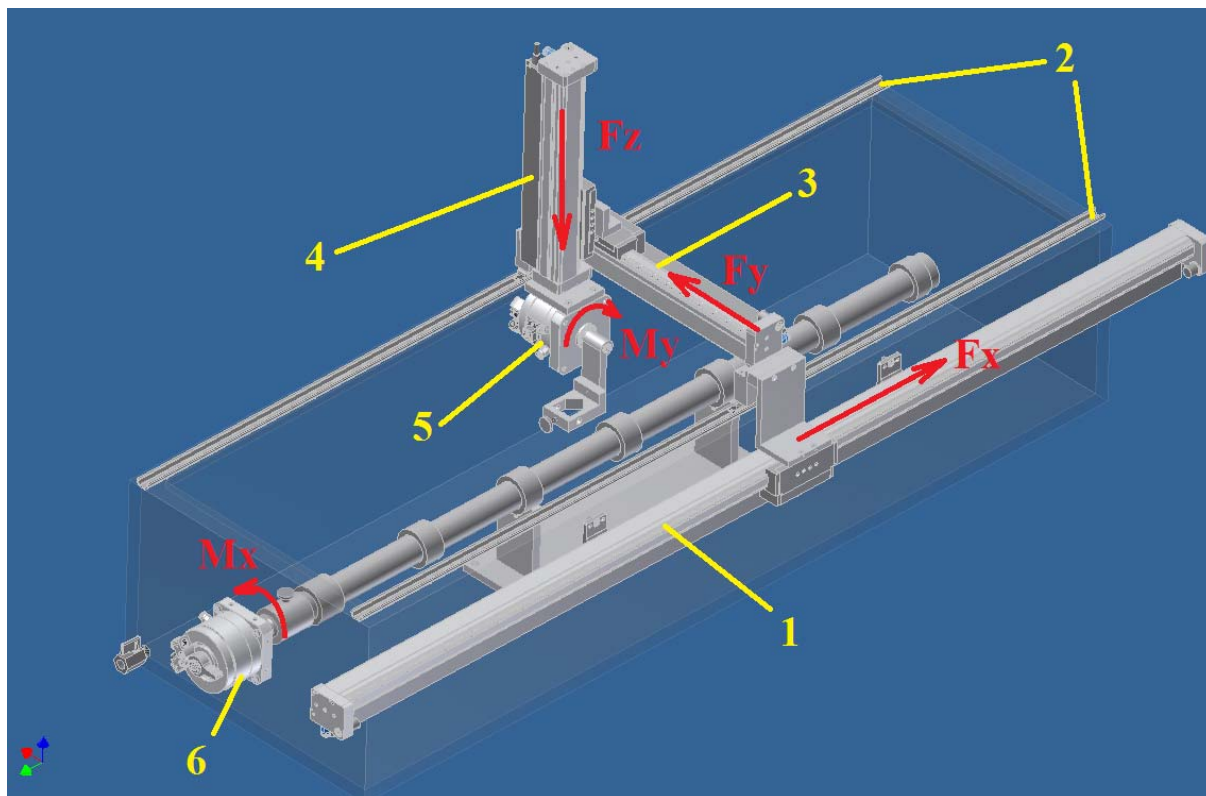
Kyvný pohon s odměřováním DSMI-25-270-A-B – Katalogový list



parametr	hodnoty
rozsah nastavení úhlu kyvu	0 - 270 deg
omezení zdvihu v koncových polohách	5 °
nejmenší zdvih pro polohování	5° při polohování 15° se systémem Soft Stop
průměr pístu	25 mm
úhel kyvu	272 deg
tlumení	P: pružné tlumicí kroužky/desky na obou stranách
montážní poloha, polohování	libovol.
montážní poloha, Soft Stop	vodorovn.
princip odměřování	analog.
konstrukce	hřídel pohonu v kuličkových ložiskách kyvné křídlo
snímání polohy	pro čidla s integrovaným odměřováním úhlu
provozní tlak pro polohování/soft Stop	4 - 8 bar
max. frekvence kyvu při 6 barech	2 Hz
max. rychlost pojezdu	2,000 deg/s
min. rychlost pojezdu	50 deg/s
typický čas polohování krátkého zdvihu, vodorovně	0,15/0,25 s
typický čas polohování krátkého zdvihu, svisle	0,35/0,60 s
odpor připojení	5 kOhm
doporučený proud smyčky	< 1 µA
provozní režim	dvójčinný
max. provozní napětí DC	42 v
max. krátkodobý proud smyčky	10 mA
max. příkon	4 mA
jmenovité provozní napětí DC	10 v
tolerance zakončovacího odporu	20 %
přípustné výkyvy napětí	< 1 %
provozní médium	filtrovaný nemazaný stlačený vzduch, jemnost filtrace 5 µm
značka CE (viz prohlášení o shodě)	podle směrnice EU-EMC
trvalá odolnost nárazu dle DIN/IEC 68 díl 2-82	zkoušeno v souladu se stupněm 1
třída odolnosti korozi KBK	0
stupeň krytí	IP65 dle IEC 60529
odolnost vibracím dle DIN/IEC 68 část 2-6	zkoušeno v souladu se stupněm 1
okolní teplota	-10 - 60 °C
energie nárazu v koncových polohách	0.05 Nm
krouticí moment při 6 barech	5 Nm
max. osová síla	50 N
max. moment setrvačnosti, vodorovně	0.03 kgm ²
max. moment setrvačnosti, svisle	0.03 kgm ²
max. radiální síla	120 N
min. moment setrvačnosti, vodorovně	0.0015 kgm ²

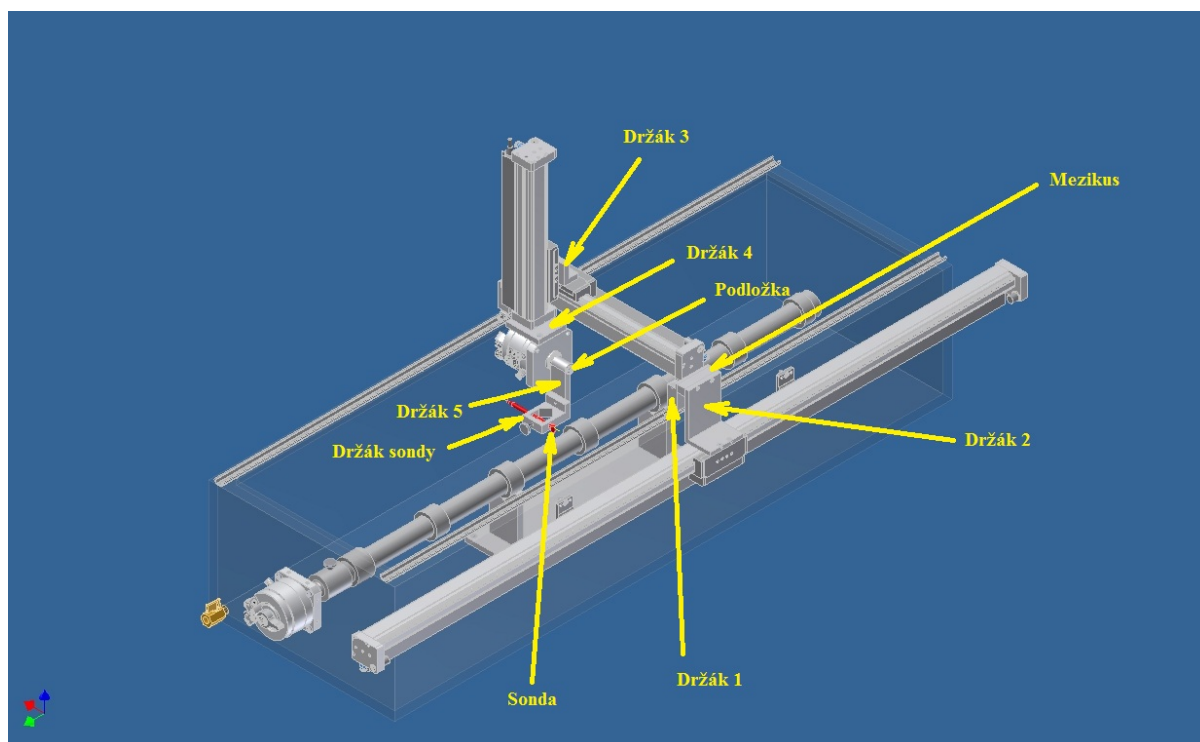
Příloha 4:

Výpočtová zpráva automatizovaného polohovacího přípravku:



Obr. 4A – Automatizovaný polohovací přípravek – Popis pohonů a silové účinky

- 1... přímočarý pohon FESTO DGC1-18-1250-KF
- 2... lineární vedení ROLLON TEX20-1200-CEX20-2RS
- 3... přímočarý pohon FESTO DGC1-18-225-KF
- 4... přímočarý pohon FESTO DGC1-18-160-KF
- 5... kyvný pohon FESTO DSMI-25-270-A-B
- 6... kyvný pohon FESTO DSMI-25-270-A-B



Obr. 4B – Automatizovaný polohovací přípravek – Popis spojovacích adaptérů

Tab. A - Tabulka hmotností dílů polohovacího přípravku:

Díl (viz. výrobní výkresy)	Označení	Hmotnost [kg]
Vozík pohonu FESTO DGCI-18	m_1	0,360
Vozík pohonu CEX20-TEX20	m_2	0,100
Pohon FESTO DGCI-18-225-KF	m_3	2,055
Pohon FESTO DGCI-18-160-KF	m_4	1,808
Pohon FESTO DSMI-25-270-A-B	m_5	1,060
Držák 1	m_6	0,180
Držák 2	m_7	0,230
Držák 3	m_8	0,084
Držák 4	m_9	0,120
Držák 5	m_{10}	0,090
Mezikus	m_{11}	0,050
Držák sondy	m_{12}	0,120
Sonda	m_{13}	0,200
Podložka	m_{14}	0,001
Vedení pohonu FESTO DGCI-18-160-KF	m_{15}	1,448

a) Výpočet sil a momentů působících na pohony 1, 3, 4 a 5 polohovacího přípravku

Pro vlastní výpočet sil a momentů je třeba nejprve určit hmotnosti pohybujících se dílů přípravku ve směrech os x,y,z:

Osa x:

$$\sum m_x = m_1 + 2 \cdot m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + 2 \cdot m_6 + m_7 + m_8 + m_9 + m_{10} + m_{11} + m_{12} + m_{13} + m_{14}$$

$$\sum m_x = 0,36 + 2 \cdot 0,1 + 2,055 + 1,808 + 1,06 + 2 \cdot 0,18 + 0,23 + 0,084 + 0,12 + 0,09 + \\ + 0,05 + 0,12 + 0,2 + 0,001$$

$$\sum m_x = 6,738kg \doteq 6,8kg$$

Osa y:

$$\sum m_y = m_1 + m_4 + m_5 + m_8 + m_9 + m_{10} + m_{12} + m_{13} + m_{14}$$

$$\sum m_y = 0,36 + 1,808 + 1,06 + 0,084 + 0,12 + 0,09 + 0,12 + 0,2 + 0,001$$

$$\sum m_y = 3,843kg \doteq 3,9kg$$

Osa z:

$$\sum m_z = m_5 + m_9 + m_{10} + m_{12} + m_{13} + m_{14} + m_{15}$$

$$\sum m_z = 1,06 + 0,12 + 0,09 + 0,12 + 0,2 + 0,001 + 1,448$$

$$\sum m_z = 3,039kg \doteq 3,1kg$$

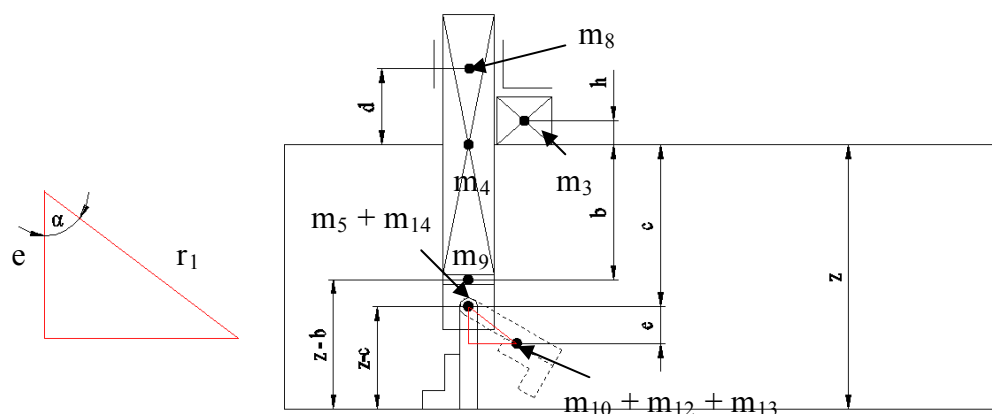
Výše uvedený výpočet nezahrnuje hmotnost spojovacího materiálu. Jako opravný faktor pro tuto nepatrnou nepřesnost jsou výše uvedené hmotnosti zaokrouhlené na stovky gramů nahoru.

Výpočet kinetické energie:

$$W_k = \frac{1}{2} (\sum m_x \cdot x'^2 + \sum m_y \cdot y'^2 + \sum m_z \cdot z'^2) + \frac{1}{2} \cdot [(m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot r^2 \cdot \alpha'^2]$$

Výpočet potenciální energie:

Při výpočtu potenciální energie bylo třeba vzdálenosti těžišť jednotlivých dílů odměřit z 3D modelu. Následující obrázek zachycuje potřebné veličiny.



Obr. 4C – Řez přípravkem

Odměřeno:

$$r_1 = 0,06\text{m}$$

$$r = 0,07\text{m}$$

$$b = 0,125\text{m}$$

$$c = 0,17\text{m}$$

$$d = 0,099\text{m}$$

$$h = 0,089\text{m}$$

$$e = r_1 \cdot \cos \alpha$$

$$W_p = m_3 \cdot g \cdot (z + h) + m_4 \cdot g \cdot z + m_8 \cdot g \cdot (z + d) + m_9 \cdot g \cdot (z - b) + (m_5 + m_{14}) \cdot g \cdot (z - c) + (m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot g \cdot (z - c - e)$$

$$W_p = m_3 \cdot g \cdot (z + h) + m_4 \cdot g \cdot z + m_8 \cdot g \cdot (z + d) + m_9 \cdot g \cdot (z - b) + (m_5 + m_{14}) \cdot g \cdot (z - c) + (m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot g \cdot (z - c - r_1 \cdot \cos \alpha)$$

Určení sil a momentů bude provedeno pomocí Lagrangeových rovnic II.druhu ve tvaru:

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta W_k}{\delta q_i'} \right) - \frac{\delta W_k}{\delta q_i} + \frac{\delta W_p}{\delta q_i} \quad (I)$$

kde Q_i je hledaná reakce či moment, q_i je proměnná veličina a q_i' je první derivace této proměnné.

Derivací kinetické a potenciální energie dle proměnných dostáváme:

Tab. B – Tabulka derivací

Q_i	$F_x(x)$	$F_y(y)$
$\frac{\delta W_{k_C}}{\delta q_i'}$	$\sum m_x \cdot x'$	$\sum m_y \cdot y'$
$\frac{\delta W_{k_C}}{\delta q_i}$	0	0
$\frac{\delta W_{p_C}}{\delta q_i}$	0	0
$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta W_{k_C}}{\delta q_i'} \right)$	$\sum m_x \cdot x''$	$\sum m_y \cdot y''$
Q_i	$F_z(z)$	$M_y(\alpha)$
$\frac{\delta W_{k_C}}{\delta q_i'}$	$\sum m_z \cdot z'$	$(m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot r^2 \cdot \alpha'$
$\frac{\delta W_{k_C}}{\delta q_i}$	0	0
$\frac{\delta W_{p_C}}{\delta q_i}$	$(m_3 + m_4 + m_5 + m_8 + m_9 + m_{10} + m_{12} + m_{13} + m_{14}) \cdot g$	$(m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot g \cdot r_1 \cdot \sin \alpha$
$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta W_{k_C}}{\delta q_i'} \right)$	$\sum m_z \cdot z''$	$(m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot r^2 \cdot \alpha''$

Zvoleno (dle možností pohonů):

$$a = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$\varepsilon = \alpha'' = 1 \text{ s}^{-2}$$

Dosazením z tab. B do rovnice (I):

$$F_x = \sum m_x \cdot x'' = \sum m_x \cdot a = 6,8 \cdot 5 = \underline{\underline{34 \text{ N}}}$$

$$F_y = \sum m_y \cdot y'' = \sum m_y \cdot a = 3,9 \cdot 5 = \underline{\underline{19,5 \text{ N}}}$$

$$\begin{aligned} F_z &= \sum m_z \cdot z'' + (m_3 + m_4 + m_5 + m_8 + m_9 + m_{10} + m_{12} + m_{13} + m_{14}) \cdot g = \\ &= \sum m_z \cdot a + (m_3 + m_4 + m_5 + m_8 + m_9 + m_{10} + m_{12} + m_{13} + m_{14}) \cdot g = \\ &= 3,1 \cdot 5 + (2,055 + 1,808 + 1,06 + 0,084 + 0,12 + 0,09 + 0,12 + 0,2 + 0,001) \cdot 9,81 = \underline{\underline{69,8 \text{ N}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_y &= (m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot r^2 \cdot \alpha'' + (m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot g \cdot r_1 \cdot \sin \alpha = \\ &= (m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot r^2 \cdot \varepsilon + (m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot g \cdot r_1 \cdot \sin \alpha \end{aligned}$$

$$M_y = (0,09 + 0,12 + 0,2) \cdot 0,07^2 \cdot 1 + (0,09 + 0,12 + 0,2) \cdot 9,81 \cdot 0,06 \cdot \sin 60 = \underline{\underline{0,21 \text{ Nm}}}$$

Dle katalogového listu (viz. Příloha 2) pohonu FESTO DGCI-18 je maximální možná síla $F_{\max} = 153\text{N}$. Bezpečnosti pohonů tedy vychází:

$$k_x = \frac{F_{\max}}{F_x} = \frac{153}{34} = \underline{\underline{4,5}}$$

$$k_y = \frac{F_{\max}}{F_y} = \frac{153}{19,5} = \underline{\underline{7,8}}$$

$$k_z = \frac{F_{\max}}{F_z} = \frac{153}{69,8} = \underline{\underline{2,2}}$$

Navržené přímočaré pohony jsou tedy vyhovující.

Co se týče kyvného pohonu FESTO DSMI-25-270-A-B, tak zde je maximální kroutící moment $M_{\max} = 5\text{Nm}$ (viz. Příloha 3). Bezpečnost je tedy:

$$k_{My} = \frac{M_{\max}}{M_y} = \frac{5}{0,21} = \underline{\underline{23,8}}$$

Tento pohon je tedy také z tohoto hlediska vyhovující.

Je zde ale třeba ještě zkontrolovat moment setrvačnosti rotujících dílů a porovnat z maximálním momentem setrvačnosti daného pohonu (viz. Příloha 3).

$$\underline{J_{\max} = 0,03\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}}$$

$$J = (m_{10} + m_{12} + m_{13}) \cdot r_1^2 = (0,09 + 0,12 + 0,2) \cdot 0,06^2 = \underline{\underline{0,0015\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}}} < 0,03\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$$

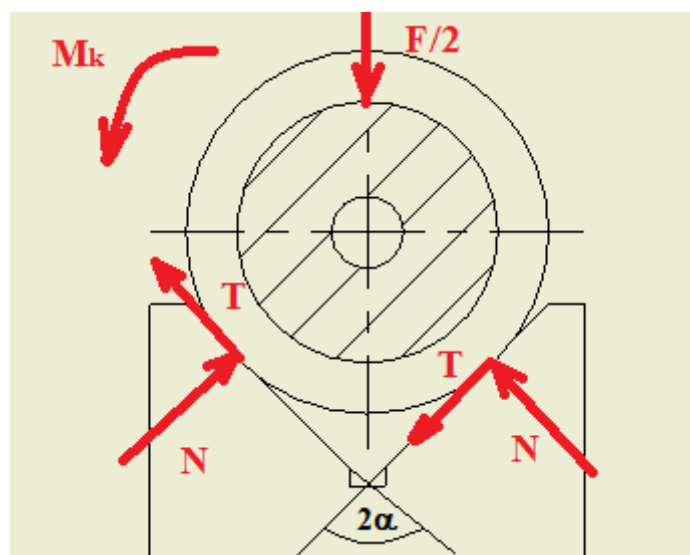
$\Rightarrow$ pohon vyhovuje

b) Návrh Pohonu 6:

Pohon 6 bude v polohovacím přípravku otáčet vačkovou hřídelí o poloměru 0,025m a hmotnosti $m = 8,1\text{kg}$. Hřídel je uložena ve dvou prizmatech. Je třeba určit maximální krouticí moment, jenž je vyvozen třecími silami. Pokud tento moment bude nižší než výrobcem předepsaný maximální možný krouticí moment $M_{\max} = 5\text{Nm}$, pak pohon bude schopen otočit hřídelí a tudíž bude vyhovující. Součinitel tření mezi vačkovou hřídelí a prizma je $f = 0,47$ (ocel – dural) a úhel prizma $2\alpha = 90^\circ$.

Řešení:

Těžiště hřídele, ve kterém se nachází tíhová síla vyvozená hřídelí, je uprostřed uložení hřídele v prizmatech. Proto reakce působící na jedno prizma bude $F/2$.



Obr. 4D – Uložení vačkové hřídele v prizmatech

$$T \cdot \cos \alpha + 2 \cdot N \cdot \sin \alpha - T \cdot \cos \alpha - \frac{F}{2} = 0 \Rightarrow N = \frac{F}{4 \cdot \sin \alpha} = \frac{m \cdot g}{4 \cdot \sin \alpha}$$

$$N = \frac{8,1 \cdot 9,81}{4 \cdot \sin 45} = \underline{\underline{28,1\text{N}}}$$

$$T = f \cdot N = 0,47 \cdot 28,1 = \underline{\underline{13,2\text{N}}}$$

$$M_k = 4 \cdot T \cdot r = 4 \cdot 13,2 \cdot 0,025 = 1,32\text{Nm} \dots \text{pro obě prizma}$$

$$1,32\text{Nm} < 5\text{Nm} \Rightarrow \text{pohon vyhovuje}$$

c) Kontrolní výpočet šroubových spojů:

Tab. C – Třídy pevností šroubů dle ISO 898 [16]

Třída pevnosti šroubu podle ISO 898	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
Třída pevnosti dřívější(ČSN)	4A	4D	4S	5D	5G	6G	8E	-	10K	12K
Označení šroubů bez zatížení podle tvrdosti	11H	11H	11H	14H	14H	22H	22H	-	33H	45H
Mez pevnosti jmenovitá R_m (MPa)	300	400	400	500	500	600	800	900	1000	1200
Mez kluzu jmenovitá R_e popř. jmenovitá $R_{p0,2}$	180 -	240 -	320 -	300 -	400 -	480 -	- 640	- 720	- 900	- 1080
Třída pevnosti matice: a) s plnou zatížitelností b) s omezenou zatížitelností c) bez zatížení	4 04 11H	4 04 11H	4 04 11H	5 04 11H	5 05 14H	6 05 14H	8 - 17H	9 - -	10 - 22H	12 - -

Tučné značky jsou přednostní.

Volím třídu pevnosti šroubů 8.8 $\Rightarrow R_e = 640 \text{ MPa}$. Dovolené napětí lze pak určit jako:

$$\sigma_{DOV} = 0,3 \cdot R_e = 0,3 \cdot 640 \text{ MPa} = 192 \text{ MPa}$$

Teoretický postup výpočtu:

$$N = \frac{T}{f}$$

$$k = \frac{d_{zvolný}}{d_{\min}}$$

$$A \geq \frac{N}{i \cdot \sigma_{DOV}}$$

$$d_{\min} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

f... součinitel tření [-]

T... tečná síla [N]

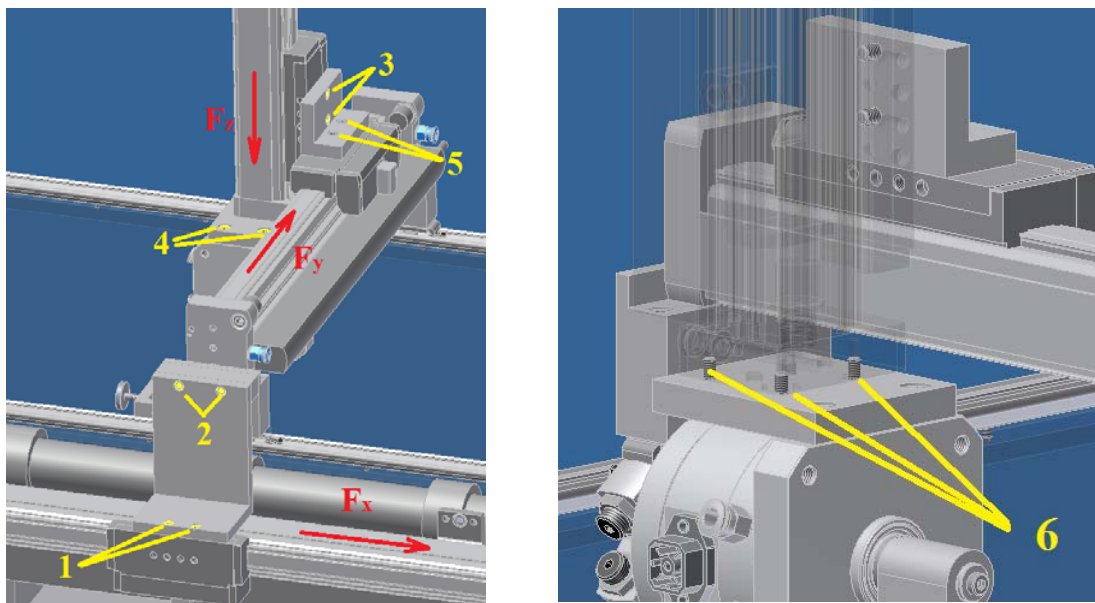
N... normálová síla [N]

i... počet šroubů [-]

A... průřez šroubu [mm^2]

$d_{\min}$... minimální průměr šroubu [mm]

k... bezpečnosti šroubového spoje [-] ($k_{\min} = 1,2$)



Obr. 4E – Zvolené šroubové spoje na automatizovaném polohovacím přípravku

1, 3, 5... ŠROUB M5x12 DIN 6912

2... ŠROUB M4x30 DIN 6912

4... ŠROUB M6x16 DIN 6912

6 ... ŠROUB M4x12 DIN 6912

$$F_x = 34N$$

$$F_y = 19,5N$$

$$F_z = 69,8N$$

$$f = 0,15...volím$$

Tab. D – Tabulka výpočtu šroubových spojů

Šroub	počet šroubů i [-]	T [N]	N [N]	A [mm ²]	d _{min} [mm]	k [-]
1	2	34	226,67	0,59	0,87	5,7
2	2	34	226,67	0,59	0,87	4,6
3	2	68,9	459,33	1,20	1,23	4,1
4	2	-	68,90	0,18	0,48	12,5
5	2	19,5	130,00	0,34	0,66	7,6
6	3	-	68,90	0,12	0,39	10,3

Z výše uvedené tabulky je zřejmé, že dle vypočtené bezpečnosti všechny navržené velikosti šroubových spojů vyhovují.

Příloha 5:

Ultrazvukové přístroje DIO 562 - 2CH a DIO 2000 – 1CH:

a) DIO 562 – 2CH



Specification

Plug-in memory cards (PCMCIA 1MB) for up to 780 A-scans, 100 AVG diagrams, 100 DAC diagrams, 100 device settings with 6 min. voice recording, 300 device settings without voice recording

Gain 20 - 100 dB in 0.1 dB steps

Frequency range 0,5 - 20 MHz

PRF 20 - 5000 Hz

Burst 1.0 - 8 MHz

Analogue filters - Wideband 2.5, 5.0, 4.0 MHz

Digital filters (FIR) 1, 2.5, 5.0, 4.0 MHz

Propagation velocity 1 000 - 10 000 m/sec

Max. range in steel 10.5 m

Communication interface RS 232 (RS 485)

Digitization rate 36 - 256 MHz

Display 128 x 256 pixels

Operating Range 0 °C to +50 °C

Battery operating time 7 hours (NiMh), 12 hours (LiIon)

b) DIO 2000 – 1CH



Features of the basic DIO2000 plug-in-unit

Each channel is created by an independent module (card with electronic circuits) containing all components as a complete ultrasonic flaw detector with

- adjustable pulse repetition rate;
- adjustable amplifier gain and band filters;
- digital signal processing DSP (digital filters, averaging and further functions);
- three gates with a set-up alarm;
- measuring of echo height maximum, minimum, average, echo extent and graphic processing;
- 2 analogue outputs (amplitude and time) for C-scan;
- automatically renewable freeze mode;
- maximum freezing;
- external and internal synchronization with adjustable time shift;
- possibility of connecting an external power transmitter to every channel;
- possibility of using probes with internal preamplifier.

Transmitter:

location: in each channel unit

transmitted pulse: up to 250 V at 50 Ω loading

transmitted pulse width: 60 ns up to 1 μ s

triggering of the transmitted pulse: internal or external

synchronization of the transmitted pulse: automatic PC controlled

transmitted pulse shift: 0 ns to 10 ms

max. transmitter repetition rate: 10 kHz

operation facilities: normal or TR probes for frequency range from 1 to 20 MHz

- in steps. Ω transmitter output impedance: adjustable from 30 to 1000

Receiver:

Location: in every channel unit

Max. input echo signal voltage: 1 Vp-p

Processable echo signal voltage: < 1 Vp-p to > 0.1 mVp-p at 100% screen height

Adjustable dynamic: +20 dB to +99.9 dB

Gain linearity: 1 %

Receiver frequency range: 0.5 MHz to 20 MHz (for -3 dB)

Input receiver impedance: adjustable from 30 to 1000 Ω

Digital Data Processing:

Evaluation: by the built-in microprocessor, amplitude and time comparison, leading edge or peak value evaluation in selected gate, statistic elimination of interference, data compression, A-scan

Noise suppressor: 0 to 80 % screen height

Gates: 3

Threshold levels: 1 in every gate - adjustable

Gate triggering: synchronized by the transmitter or selected echo leading edge ("echostart")

Measuring Accuracy:

Amplitudes for flaw detection: ± 1 % relative to 10 MHz signal

Time size measurement: ± 1 μm relative to sound propagation velocity (in ferritic steel) for ultrasonic frequency of 15 Hz

Entering of measuring parameters: by means of a PC through RS 232; 422, USB

setting of the whole testing system: "manual inspection" by a PC or by pre-selected parameters stored in the PC (set at some preceding testing).

Příloha 6:

Ultrazvuková sonda Panametrics V260-RM 15MHz a imerzní ultrazvuková sonda s frekvencí 10MHz a Ø 15mm

a) Ultrazvuková sonda Panametrics V260-RM 15MHz



Sonopen® Replaceable Delay Line Transducer

- Focused replaceable delay line
- Extremely small tip diameter may improve performance on curved surfaces and small indentations.
- Handle for easier positioning of transducer head

Frequency	Nominal Element Size		Transducer Part Numbers		
	inches	mm	Straight Handle	Right Angle Handle	45° Handle
15	0.125	3	V260-SM	V260-RM	V260-45

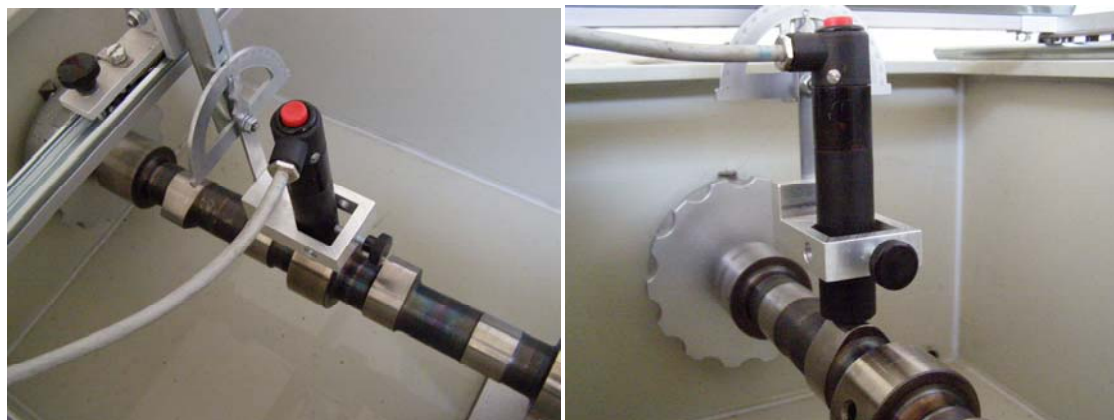
b) Imerzní ultrazvuková sonda s frekvencí 10MHz a Ø 15mm



Příloha 7:

DOMENA – gHr – fotografie z měření

a) Sonda upnutá v držáku



b) Kalibrační měření na etalonu s magnetizací $M_{etalon} = 200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$



c) Polohovací přípravek s upnutou měřicí sondou



Příloha 8:

Ultrazvukové měření – fotografie

a) Měření imerzní sondou s frekvencí 10MHz a $\varnothing$ 15mm na řezu ložiskem



b) Měření sondou Panametrics V260-RM 15MHz přímo na vačkové hřídeli

