

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a ověření technologie výroby klíčových komponentů samo-
vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska

Autor: **Bc. Adam Polášek**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**
Konzultant: **Ing. Marek Urban**

Akademický rok 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam POLÁŠEK**

Osobní číslo: **S15N0075K**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**

Název tématu: **Návrh a ověření technologie výroby klíčových komponentů
samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska**

Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Analýza současného stavu
2. Návrh technologie výroby klíčových komponent ložiska
3. Ověření technologie výroby klíčových komponent ložiska
4. Zpracování výsledků do celkové technologičnosti konstrukce samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska
5. Ekonomické a procesní zhodnocení řešení

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **Elektronické informační zdroje, dostupné z www.knihovna.zcu.cz**
- **CIRP ANNALS - Manufacturing Technology, dostupné z www.cirp.net**
- **MM Průmyslové Spektrum a MM Science Journal, dostupné z www.mmspektrum.com**
- **Strojírenská technologie a Manufacturing technology, dostupné z <http://journal.strojirenskatechnologie.cz>**
- **SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z www.sandvik.coromant.com**
- **STANĚK, J., NĚMEJC, J.: Metodika zpracování a úprava diplomových prací. Plzeň, ZČU, 2005.**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **18. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2016**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. října 2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Řehořovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Urbanovi za poskytnuté cenné rady během zpracování diplomové práce. Dále pak společnosti GTW Bearings s.r.o. za umožnění realizace práce.

Adam Polášek

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Polášek	Jméno Adam	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie - technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVISTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh a ověření technologie výroby klíčových komponentů samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	81	TEXTOVÁ ČÁST	74	GRAFICKÁ ČÁST	1
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce je zaměřena na návrh a ověření technologie výroby klíčových komponentů samo-vyrovnávacího ložiska. Komponenty se nazývají vahadla a jejich funkční plochy jsou primárně namáhány na otláčení. Odolnosti proti otláčení bylo dosaženo laserovým povrchovým kalením a nitridací. Na závěr práce je provedeno vyhodnocení jednotlivých navržených variant včetně ekonomického zhodnocení.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">technologie obrábění, samo-vyrovnávací ložisko, axiální segmentové ložisko, vahadla</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Polášek	Name Adam
FIELD OF STUDY	2303T004 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
		Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design and verification of technology of manufacturing the main components of thrust bearing with self-equalized elements	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	81	TEXT PART	74	GRAPHICAL PART	1
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The thesis is focused on the design and verification of machining the main elements of the thrust bearing with self-equalized elements. These elements are called leveling plates and their functional faces are primarily deformed due to stress. Resistance to deformation has been achieved by laser surface hardening or nitriding. Finally, the thesis is an evaluation of each of the proposed solutions, including an economic evaluation.</p>
KEY WORDS	<p>machining technology, self-equalized, thrust bearing, leveling plates</p>

Seznam použitých veličin a zkratk

3D	trojrozměrný
μm	mikrometr (jednotka délky)
API	z anglického American Petroleum Institute = americký petrolejářský institut
CAD	z anglického computer-aided design = počítačem podporované projektování
CAM	z anglického computer-aided machining = počítačem podporované obrábění
CNC	z anglického computer numeric control = číslicové řízení počítačem
ČR	Česká republika
ČSN	chráněné označení českých technických norem
D	průměr
EN	evropská norma
f_z	posuv na zub [mm]
HB	označení stupnice tvrdosti materiálu dle Brinella
HL	označení stupnice tvrdosti materiálu dle Leeba
HRC	označení stupnice tvrdosti materiálu dle Rockwella
HSC/HSM	z anglického high speed cutting/machining = vysokorychlostní řezání/obrábění
CHTZ	chemicko-tepelné zpracování
ISO	z anglického International Organization for Standardization = mezinárodní organizace pro normalizaci
IT	toleranční stupeň přesnosti
kp	kilopond (dřívější používaná jednotka síly)
MPa	megapascal (jednotka tlaku)
mm	milimetr (jednotka délky)
n	otáčky
N	newton (jednotka síly)
PÚ	povrchová úprava
R	poloměr
Ra	střední aritmetická úchylka profilu
Rz	výška nerovností profilu určená z deseti bodů
TPV	technická příprava výroby
TZ	tepelné zpracování
VBD	vyměnitelná břitová destička
v_c	řezná rychlost [m/min]
v_f	posuvová rychlost [mm/min]
Z	počet zubů [-]
ZČU	Západočeská univerzita

Obsah

Úvod	10
1 Analýza současného stavu	10
1.1 GTW Bearings s.r.o.	10
1.1.1 Historie	10
1.1.2 Výrobky	11
1.2 Samo-vyrovnávací axiální segmentové ložisko.....	12
1.2.1 Plánovaná výroba společnosti GTW Bearings s.r.o.	14
1.2.2 Součásti ložiska	14
1.2.3 Klíčové komponenty	17
1.2.4 Požadavky kladené na funkční plochy vahadel.....	19
2 Návrh technologie výroby klíčových komponent ložiska	21
2.1 Výběr součásti a materiálu pro návrh a ověření technologie výroby klíčových komponent ložiska.....	21
2.1.1 Výběr součásti	21
2.1.2 Výběr materiálu	21
2.2 Posouzení technologičnosti konstrukce	22
2.2.1 Z hlediska materiálu	22
2.2.2 Z hlediska polotovaru	22
2.2.3 Z hlediska tvaru a rozměrů	23
2.2.4 Z hlediska přesnosti a jakosti povrchu	23
2.2.5 Z hlediska tuhosti a upnutí	23
2.3 Technologie povrchových úprav pro dosažení zpevnění povrchové vrstvy.....	24
2.3.1 Metody tepelného (chemicko-tepelného) zpracování.....	24
2.3.2 Obrábění tvrdých materiálů.....	26
2.3.3 Ostatní vybrané metody úpravy povrchových vrstev	28
2.4 Shrnutí a výběr technologií pro dosažení požadavků na funkční plochy	31
3 Ověření technologie výroby klíčových komponent ložiska	32
3.1 Polotovar.....	32
3.2 Kompletní obrobení	32
3.3 Ověřující série měření po obrobení.....	45
3.3.1 Měření výšky	45
3.3.2 Měření geometrické přesnosti	45
3.3.3 Měření drsnosti funkčních ploch	46
3.3.4 Měření tvrdosti funkčních ploch.....	47
3.4 Tepelné a chemicko-tepelné zpracování.....	48
3.5 Leštění funkčních ploch.....	49

3.6	Závěrečná série měření	49
3.6.1	Měření tvrdosti	49
3.6.2	Měření opotřebení klíčového nástroje	50
4	Zpracování výsledků do celkové technologičnosti konstrukce	51
5	Ekonomické a procesní zhodnocení řešení	52
5.1	Ekonomické zhodnocení.....	52
5.2	Procesní zhodnocení	53
5.2.1	Bodovací metoda	55
5.2.2	Metoda váženého součtu	56
Závěr	57
Literatura a odkazy	58
	Seznam odborné literatury a zdrojů.....	58
	Seznam příloh.....	59

Úvod

Práce je zaměřena na návrh a ověření technologie výroby klíčových komponentů kluzného samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska vyvíjeného firmou GTW Bearings s.r.o. Tato ložiska nacházejí uplatnění v turbínách, kompresorech, generátorech atd., kde je zapotřebí eliminovat vliv průhybu nebo teplotní dilatace hřídele, který je s ložiskem v kontaktu pomocí límce. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část stručně popisuje historii společnosti, současný stav vývoje ložiska včetně základního popisu jeho funkce. Dále pak návrh technologií pro splnění zadaných požadavků, zejména odolnosti proti otlacení funkčních ploch. Druhá část je praktická a popisuje zvolené technologie výroby na zkušebních kusech včetně ověřující série měření těchto kusů a celkové technicko-ekonomické hodnocení jednotlivých variant.

Cíle práce

Cílem diplomové práce je navrhnout a ověřit vhodnou technologii výroby klíčových komponent kluzného samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska, které značnou mírou ovlivňují správnou funkci tzv. samo-vyrovnání. Výstupem je možné doporučení pro společnost GTW Bearings.

1 Analýza současného stavu

1.1 GTW Bearings s.r.o.

Firma GTW Bearings s.r.o. se specializuje na vývoj, konstrukci a výrobu kluzných kompozicových ložisek. Sídlo se nachází v České republice v obci Příšov nedaleko Plzně směrem na Karlovy Vary. Společnost získala dnes již velice rozšířené certifikáty ČSN EN ISO 9001:2008 a 14001:2004. Dalším působením společnosti je spolupráce na projektech aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje zejména v oblasti progresivních technologií a materiálů. Získané poznatky vedou k posílení výkonnosti ekonomických subjektů a růstu konkurenceschopnosti hospodářství a společnosti ČR. V současné době se společnost neustále rozšiřuje nejenom v oblasti strojního vybavení, ale i v počtu zaměstnanců. [1]

1.1.1 Historie

1996: Založení GTW BEARINGS s.r.o. – výroba kluzných kompozicových ložisek

1997: Stavba vylévárny kompozic

1998: Založení GTW TECHNIK s.r.o. – obchodní zastoupení v České republice a východní Evropě

1998: Stavba první výrobní haly

2003: Stavba druhé výrobní haly

2006: Certifikace dle EN ISO 9001:2000

2007: Stavba nové administrativní budovy

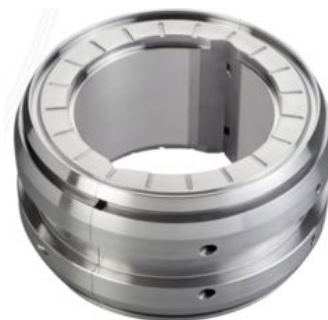
2010: Recertifikace dle EN ISO 9001:2008

2010: Stavba třetí výrobní haly [1]

1.1.2 Výrobky

Profilová ložiska (ložiska s fixní geometrií)

Profilová ložiska mají široké uplatnění u pomaloběžných i rychloběžných strojů díky rozsahu možných geometrií jejich kluzných ploch. Ložisko se skládá z ocelového těla s kompozicovou výstelkou. Kompozicová výstelka je založená na bázi cínu nebo olova. Na ložisko se aplikuje slévárenskými technologiemi odstředivého nebo statického lití. [1]



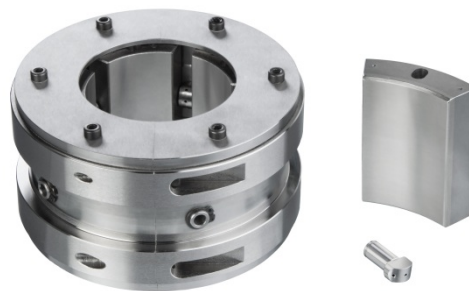
Obrázek 1-1 Radiálně-axiální ložisko [1]

Ložiska s radiálními naklápěcími segmenty

V oblasti radiálních ložisek jsou pro velkou řadu aplikací používána ložiska s radiálními naklápěcími segmenty. Jedním z jejich předností je použití při velkých obvodových rychlostech. Ložiska lze navrhnout v řadě variant na základě aplikace rotorové dynamiky. Standardní počet segmentů je pět, ale existují i ložiska se čtyřmi nebo i třemi segmenty. [1]

Tato ložiska se vyznačují i dalšími technickými přednostmi:

- hydrodynamická stabilita při vysokých obvodových rychlostech
- malá citlivost na směr zatížení
- malá citlivost na nevyrovnanost hřídele
- minimalizování průtoku oleje



Obrázek 2-1 Ložisko s rad. nakl. segmenty [1]

Ložiska s axiálními naklápěcími systémy

Axiální naklápěcí segmenty jsou navrženy pro přenos většího zatížení s následujícími výhodami:

- jednotlivé segmenty jsou kyvně uloženy a vytváří samostatný hydrodynamický film
- kyvné uložení umožňuje dva směry otáčení
- uložení segmentů přímo na ložisku nebo na samostatném nosném kruhu

Izolovaná ložiska

Izolovaná ložiska splňují požadavek na elektrické odizolování jejich vnějšího průměru zejména v elektrických strojích. V některých aplikacích může docházet k průchodu elektrického proudu mezi hřídelí a ložiskem. Tento negativní jev způsobuje elektrokorozi a degradaci kompozicové výstelky vnitřního průměru ložiska. [1]

Izolace je na obrázku 3 označena zelenou barvou v zápichu ložiska.

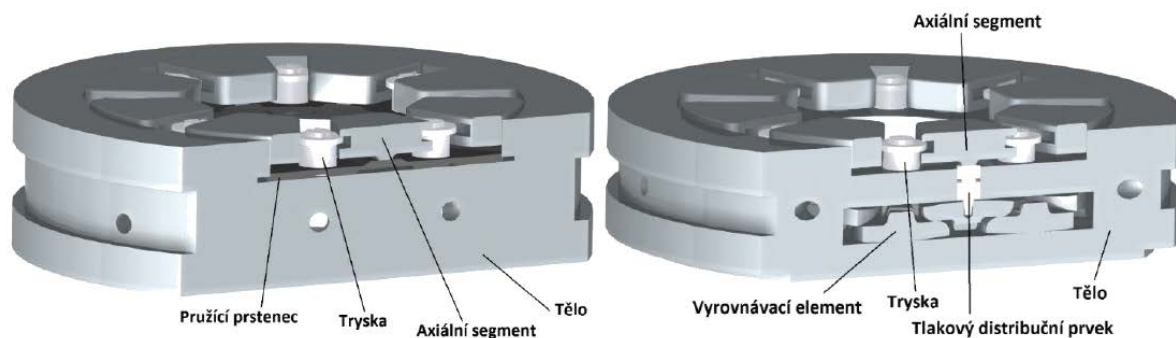


Obrázek 3-1 Izolované ložisko [1]

1.2 Samo-vyrovnávací axiální segmentové ložisko

Historie:

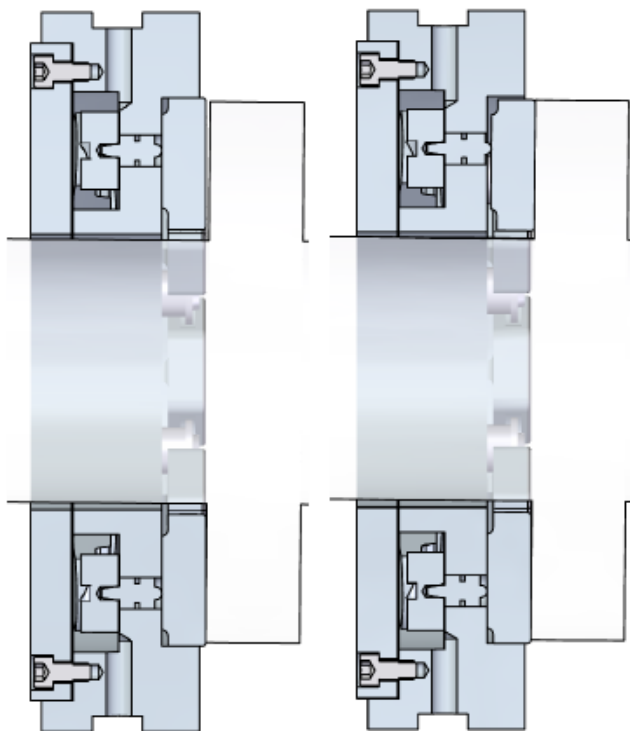
První patent na samo-vyrovnávací ložisko byl registrován v USA roku 1938 Albertem Kingsbury, jehož společnost Kingsbury působí na trhu dodnes. V návaznosti na tento patent byl později roku 1950 registrován další patent na samo-vyrovnávací ložisko pomocí pružin. Za zmínku stojí také patenty z 90. let 20. století v tehdejším Československu. V dnešní době se používá systém vahadel, kde dochází k plnohodnotnému vyrovnání bez rizika proměnlivé přítláčné síly pružin. Další konstrukční řešení samo-vyrovnávací funkce viz Obrázek 7-1. [2]



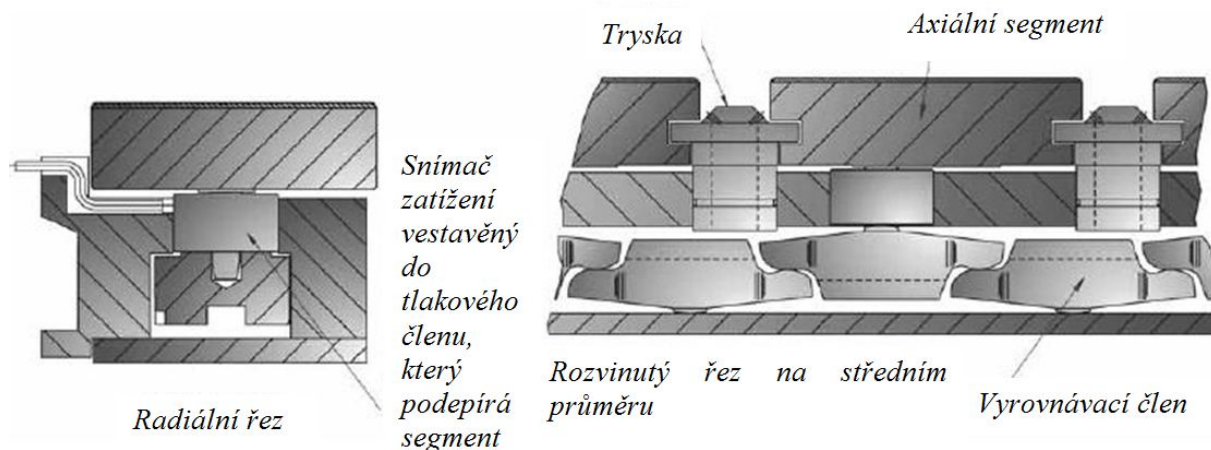
Obrázek 4-1 Řez samovyrovnávacím ložiskem

Princip:

Uložením axiálních segmentů na plovoucím tlakovém členu se pomocí systému vahadel (vyrovnávací člen) přizpůsobí geometrickému naklopení zpravidla do $0,1^\circ$. Samo-vyrovnávací funkce vytváří rovnoměrné zatížení ložiska se stejnou tloušťkou olejového filmu na každém axiálním segmentu. Kontaktní plocha mezi límcem hřídele a axiálními segmenty zůstává využita celým svým obsahem tvaru mezikruží (viz Obrázek 5-1).



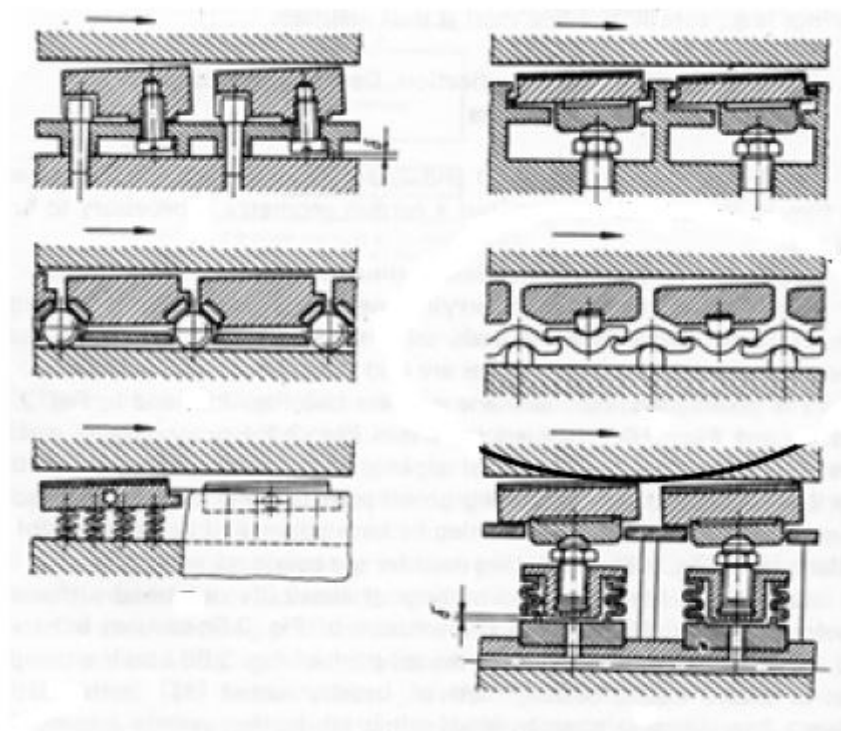
Obrázek 5-1 Znáznornění samovyrovnávacího principu



Obrázek 6-1 Detailní pohled na funkční členy ložiska [3]

Použití:

Ložiska jsou používána u horizontálně i vertikálně uložených hřídel s vysokým zatížením a rychlostmi. Použití je typické pro případy, kdy existuje riziko, že se límeček hřídele limitně naklopí vůči ložisku (teplotní dilatace stroje, prohnutí hřídele vlastní vahou) a tím se sníží kontaktní plocha ložiska s hřídelí. Nižší nosná plocha má za následek lokální zvýšení teploty na zatěžovaných axiálních segmentech. Není neobvyklé, že rozdíl teplot mezi horním a spodním segmentem může být až 60 °C (například na horním segmentu pouze 60 °C, na spodním 120 °C). Limitní teplota pro ložiskové kovy (kompozici) je právě okolo 120°C. Tento systém samovyrovnávacích ložisek v porovnání se standardními axiálními ložisky značně zvyšuje provozní bezpečnost, životnost a interval oprav. Rozhodovací podmínky pro použití právě těchto ložisek byly zjištěny praktickými testy, které zřejmě posloužily jako podklady pro doporučené použití uvedené v API normách. [3]



Obrázek 7-1 Různé druhy řešení samo-vyrovnávací funkce [10]

Aplikace:

- Průmyslové turbíny
- Generátory
- Kompresory
- Pumpy
- Motory
- Průmyslové převodovky
- Lodní pohony
- Vodní a parní turbíny
- Horizontální odstředivá čerpadla
- a další ...

1.2.1 Plánovaná výroba společnosti GTW Bearings s.r.o.

Samo-vyrovnávací axiální segmentové ložisko je v současné době ve stadiu vývoje prototypu pro budoucí rozšíření sortimentu dodávaných výrobků. Nelze hovořit o kusové výrobě, nýbrž o výrobě sériové, která je ve společnosti standardně od tří kusů ložisek. Předpokládá se opakování výroby různých průměrů ložisek. Ideálním stavem je plně parametrizovaná konstrukce provázaná do následné přípravy výroby těchto ložisek.

1.2.2 Součásti ložiska

Tělo ložiska

Tento dělený díl o tvaru mezikruží je základním prvkem ložiska. Obě poloviny budou po uložení ložiska ve stroji svařeny na vnějším průměru v dělicí rovině. V těle jsou uloženy vahadla, tlakové segmenty a také obsahuje závitové otvory pro trysky, které zajišťují axiální segmenty ve správné poloze. Zápich tvaru $\frac{1}{2}$ V po obvodu slouží k přívodu oleje, který je u kluzných kompozitových ložisek nezbytně nutný pro zajištění hydrodynamického mazání.



Obrázek 8-1 Tělo ložiska

Výrobní postup

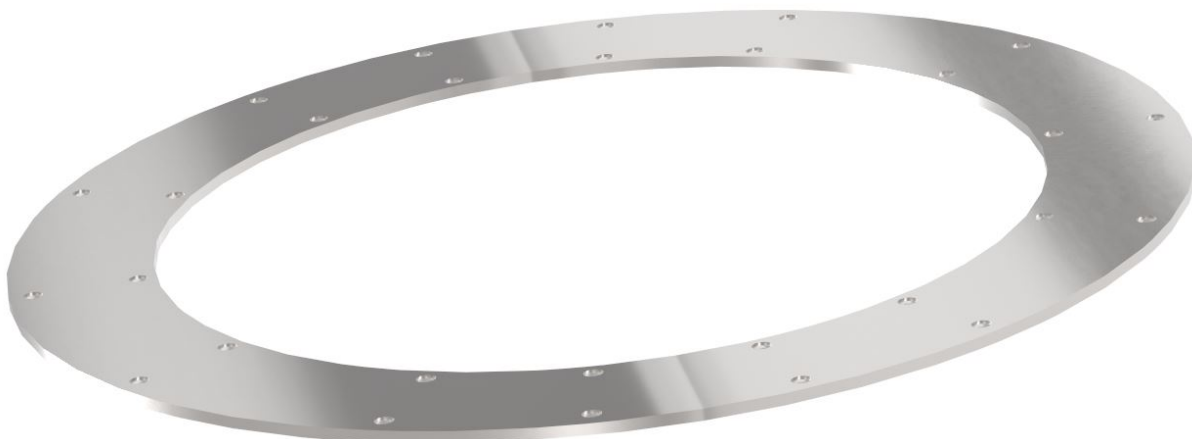
Polotovary: P 60 – ČSN 41 1523 ŽÍHÁNO NA ODSTRANĚNÍ PNUTÍ

Op.	Název	Text operace
10	CNC horizontka WHN 10	Ustavit na čelo výpalku, frézovat 2x technologickou plochu na rozměr 315,5 mm na vnějším průměru. Ofrézovat dělicí roviny na rozměr 316 mm.
20	Zámečnick	Srazit ostří na dělicí rovině, sestavit a spáskovat pomocí objímky na vnějším průměru.
30	Velký soustruh	Soustružit průměrové rozměry s přídavkem 1mm/plochu, délkové rozměry s 0,5mm/plochu Soustružit hotově s ohledem na přídavek zápich na obvodu šířky 12 mm a jedním bokem pod úhlem 25°. (Detail B, D) Soustružit hotově zápich z čela přední strany tělesa mezi průměry 555,5(+0,3,+0,2) mm a 489,5(-0,2,-0,3) mm do hloubky 21 (±0,05) mm s ohledem na přídavek. (Detail B)
40	Zámečnick	Rozebrat a ogrotovat.
50	CNC horizontka WHN 10	Přišroubovat spodní plech. Frézovat společně se spodním plechem hotově dělicí rovinu cermetovými plátky s nejmenším ubráním (horní a spodní díl).
60	Zámečnick	Srazit ostří na dělicí rovině.
70	Frézka SHW	Frézovat samostatně horní a spodní díl. Horní díl: 14x závit M8x11/15 mm; 9x průchozí otvor \varnothing 26H8 mm; 9x průchozí závit M16; 1x otvor \varnothing 4,5x8 mm; 9x průchozí otvor pro závit M5 se závitem M5x30 mm (řez C-C); 1x průchozí otvor pro závit M5 se závitem M5x25 mm (řez E-E); 9x průchozí otvor \varnothing 10 mm v zápichu na obvodu pod úhlem 25° (detail D) Spodní díl: 14x závit M8x11/15 mm; 9x průchozí otvor \varnothing 26H8 mm; 9x průchozí závit M16; 1x otvor \varnothing 4,5x8 mm; 9x průchozí otvor pro závit M5 se závitem M5x30 mm (řez C-C); 1x průchozí otvor pro závit M5 se závitem M5x25 mm (řez E-E); 9x průchozí otvor \varnothing 10 mm v zápichu na obvodu pod úhlem 25° (detail D)
80	CNC karusel velký FERMAT	Soustružit hotově dle výkresu. Vystředit dle dna zápichu přilehlé čelo hotově 21±0,05 mm.
90	Zámečnick	Srazit ostří na dělicí rovině a začistit.
100	TK	Mezioperační rozměrová kontrola.

Tabulka 1-1 Výrobní postup těla ložiska

Spodní plech

Spodní plech uzavírá spodní část ložiska a umožňuje montáž vahadel. Stejně jako tělo je i tento díl dělený a tvaru mezikružít. K tělu je připevněn pomocí šroubů se záupstnou hlavou. U této součásti je nejdůležitější správné dolícování s jednotlivými polovinami těla ložiska. Zejména operace se současným frézováním dělicích rovin těla ložiska a plechů. Celková tloušťka plechu závisí na skutečném rozměru těla a následná operace broušení se provede až po sestavení celé sestavy. Tento postup zajistí požadovanou toleranci šířky ložiska.



Obrázek 9-1 Spodní plech

Výrobní postup

Polotovary: P 60 – ČSN 41 1523 ŽÍHÁNO NA ODSTRANĚNÍ PNUTÍ

Op.	Název	Text operace - Vše
10	Frézka SHW	Frézovat dělicí rovinu na výšku 302,5 (+0,1) mm Hotově 28 x průchozí otvor $\varnothing 10$ včetně zahloubení 90° (dle det. B)
20	Zámečnick	Ogrotovat, srazit ostří na dělicí rovině.
30	CNC horizontka WHN 10	Sestavit s tělesem - axiálním kroužkem a poté frézovat hotově dělicí rovinu cermetovými plátky s nejmenším ubráním (horní a spodní díl).
40	Bruska	Brousit levou stranu plechu až po sestavení a změření složené sestavy. Finální tloušťka dle celkové tolerance sestavy.

Tabulka 2-1 Výrobní postup spodního plechu

Axiální segment

Segmenty mají tvar podobný lichoběžníku. Na kontaktní axiální ploše je nanášena tenká vrstva kompozitního kovu. Spodní část segmentu přenáší axiální sílu dále na samovyvažovací komponenty. Boční zářezy společně s hlavou trysky zajišťují segmenty v požadované poloze na tělu ložiska.



Obrázek 10-1 Axiální segment

Výrobní postup axiálních segmentů včetně polotovaru reprezentuje současné provozní možnosti a již dlouhodobě ověřené „know-how“ a zkušenosti TPV firmy GTW Bearings. Vzhledem k těmto zkušenostem jsem se rozhodl tento postup dále nerozvádět a neupravovat.

Výrobní postup

Polotovary: P 35 – ČSN 41 4220 ŽIHÁNO/ŠLECHTĚNO

Op.	Název	Text operace - Vše
10	MCV vertikál. CNC frézka	Oboustranně frézovat polotovary (desku) na tloušťku 32 mm.
20	TK	Mezioperační rozměrová kontrola.
30	Slévárna	Opískovat.
40	Slévárna	Odmastit, vymořit, pocínovat, staticky odlít.
50	Slévárna	Očistit.
60	MCV vertikál. CNC frézka	Frézovat pro ultrazvuk jednostranně kompozici na tloušťku 34,5 mm.
70	TK	Ultrazvuková kontrola.
80	TK	Kapilární zkouška.
90	Pila	Rozříznout na pásy dle přiloženého technologického plánu rozřezu RD701.
100	Centrum malé - Makino	Číslo programu: Makino (O0567) Celkovou tloušťku s přídavkem 0,1 mm/pl. pro broušení; ostatní hotově dle výkresu.
110	TK	Kapilární zkouška.
120	Zámečnick	Dohotovit celkovou výšku 68 mm + 4 x R6 mm. Začistit
130	Bruska	Brousit hotově dle výkresu oboustranně celkovou tloušťku 20(-0,008) mm; protokolovat.
140	Zámečnick	Začistit ,dohotovit rádiusy, vyznačit pořadové číslo.
150	TK	Kapilární zkouška.
160	TK	Mezioperační rozměrová kontrola.

Tabulka 3-1 Výrobní postup ax. segmentu

Tryska

Jednoduchá rotační součást opatřená závitem pro přišroubování do těla, výstupními otvory pro škrtení průtoku oleje ložiskem. Svým tvarem lícuje s bočními záfrezy v axiálním segmentu. Hlava je opatřena drážkou pro montáž.



Obrázek 11-1 Tryska

V současné době je vzhledem k vytíženosti strojního vybavení společnosti tato součást vyráběna v kooperaci stejně jako ostatní druhy trysek použitých v sortimentu výrobků společnosti.

1.2.3 Klíčové komponenty

Vahadla

Vahadla a především jejich geometrie jsou klíčovým prvkem celého samo-vyrovňovacího ložiska. Přenáší zatěžující sílu z více zatížených segmentů na méně zatížené segmenty důsledkem dilatace hřídele, resp. kontaktní plochy jeho límce. Vahadla jsou ve dvou na sobě závislých provedeních (dolní a horní).

Vahadlo dolní



Vahadlo horní



Obrázek 12-1 Vahadla

Nejdůležitější součásti pro správnou funkci samo-vyrovnání zatěžovaných axiálních segmentů ložiska jsou právě vahadla. Rozměry rádiů a celkový tvar funkčních ploch, které tvoří obecnou kinematickou vazbu, jsou předmětem experimentálního vývoje, neboť matematický popis této vazby je velice obtížný, a proto nelze jednoznačně určit tvar a rozměry vahadel. Tento fakt však není podstatný pro zpracování této diplomové práce.



Obrázek 13-1 Sestava vahadel včetně segmentů bez těla ložiska

S přihlédnutím na skutečnost, že je celé ložisko ve stadiu vývoje, není známo, jaké tlaky působí na funkční plochy, tak nelze jednoznačně určit požadavky na materiál. Dle konkurenčních samo-vyrovnávacích ložisek můžeme z použitých materiálů usoudit, že jsou tyto plochy opravdu značnou silou namáhány. Konkurenční společnosti používají pro vahadla materiál ocel třídy 15 nebo dokonce z martenzitické korozivzdorné oceli na odlitky vyrobené přesným litím. Původní prototypové vzorky byly vyrobeny z materiálu ocel třídy 11 z důvodu snadné obrobitelnosti a dostupnosti.

Prototypové ložisko GTW bylo vystaveno zkoušce funkčnosti naklápění jednoduchým měřicím přípravkem, který bohužel neumožňuje vyvinout přibližné provozní zatížení. Zkouška přinesla pouze vizuální důkaz namáhání vahadel na otlacení, kdy na funkčních plochách vznikly otlacené plošky. Tento jev však značně ovlivňuje i použitý materiál pro prototypová vahadla.

Společnost GTW Bearings s.r.o. bohužel v současné době nedisponuje 5-ti osým frézovacím centrem, které by bylo vhodné k výrobě těchto vahadel. Z tohoto důvodu byly prototypy vahadel vyrobeny v kooperaci.

Tlakový segment

Tlakový segment přenáší axiální sílu z axiálního segmentu na horní vahadlo. Někteří výrobci samo-vyrovnávacích ložisek umožňují tímto tlakovým členem s měřicí sondou stanovit zatěžující axiální sílu ložiska. Po obvodu segmentu se nachází drážka pro O-kroužek.

Tlakový segment lze obrobít na soustruhu s následujícím dokončovacím frézováním kulového vrchlíku poloměru R 100 mm v horní části součásti. Jako jediný díl ze skupiny klíčových součástí byl vyroben soběstačně na strojním vybavení společnosti. Avšak pro samotnou funkci ložiska je méně významný než již zmiňovaná vahadla.



Obrázek 14-1 Tlakový segment

Výrobní postup

Polotovar: KR 30 – ČSN 41 1109

Op.	Název	Text operace - Vše
10	CNC soustruh MASTURN	Hotově soustružit stranu čepu a vnější povrch dle výkresu. Poté upíchnout na délku 23 mm. Otočit a upnout. Soustružit kouli R100 s přídkem 0,15-0,2 mm.
20	Zámečnick	Ogrotovat.
30	Centrum malé - Kitamura	Hotově kouli R 100 mm.
40	TK	Mezioperační rozměrová kontrola

Tabulka 4-1 Výrobní postup tlakového segmentu

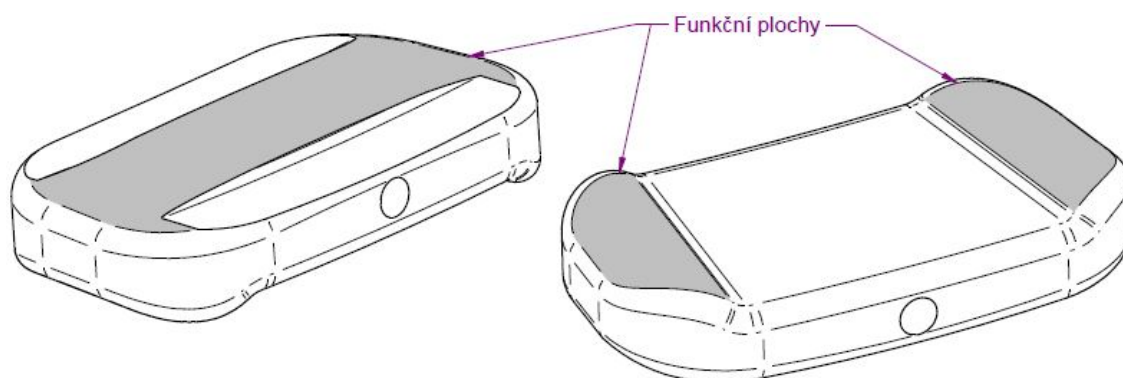
1.2.4 Požadavky kladené na funkční plochy vahadel

Funkční plochy vahadel jsou zvýrazněny na výkresové dokumentaci jednotlivých součástí. Jedná se především o tvarové plochy (viz Obrázek 15-1; Obrázek 16-1 a Obrázek 17-1). Požadavky byly stanoveny po provedení prvotních zkoušek funkčnosti systému vahadel u prototypového ložiska.

- Minimální tvrdost funkčních ploch 50 HRC (513 HV) do hloubky 0,3-0,4 mm se současným zachováním pevnosti jádra.
- Maximální drsnost funkčních ploch udaná střední aritmetickou odchylkou Ra 0,8 μm .
- Rozměrová a geometrická přesnost funkčních ploch dle výkresové dokumentace.

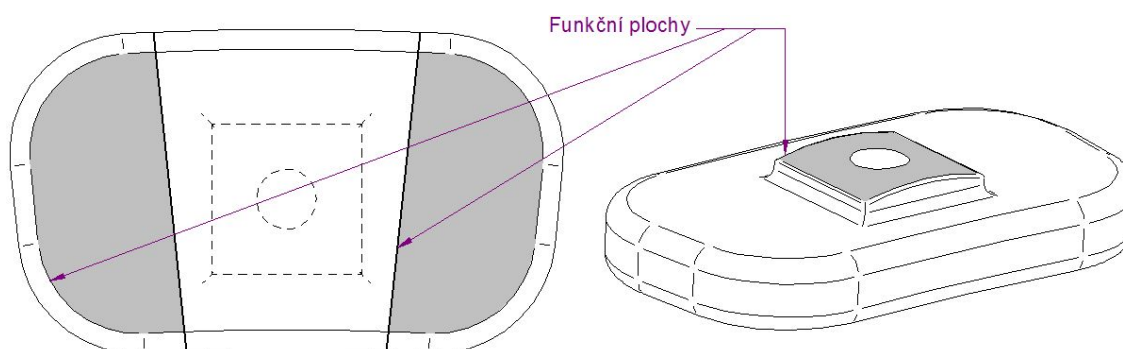
Požadavky byly zvoleny v rámci realizace diplomové práce. Skutečné zatížení ověřené praktickými testy ložiska pro bližší specifikaci požadavků není doposud známo.

Funkční plochy dolního vahadla



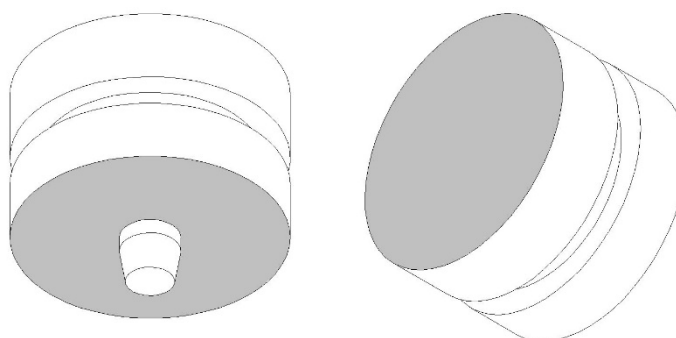
Obrázek 15-1 Funkční plochy dolního vahadla

Funkční plochy horního vahadla



Obrázek 16-1 Funkční plochy horního vahadla

Funkční plochy tlakového segmentu



Obrázek 17-1 Funkční plochy tlakového segmentu

2 Návrh technologie výroby klíčových komponent ložiska

2.1 Výběr součásti a materiálu pro návrh a ověření technologie výroby klíčových komponent ložiska

2.1.1 Výběr součásti

101	Vahadlo - GTW - Horní		0,1 kg	670313-101^00	18
100	Vahadlo - GTW - Dolní		0,1 kg	670313-100^00	18
99	Tlakový segment		0,1 kg	670313-99^00	18
11	Kroužek 21x2,5-NBR 70		0,0 kg	^	18
10	Kolík 3m6x14-St ISO 2338		0,0 kg	^	2
8	Šroub M8x16-8.8 ISO 10642		0,0 kg	^	28
7	Šroub M5x25-45H ISO 4028 - ÚPRAVA		0,0 kg	670313-07^00	20
6	Tryska	S235JRG2	0,1 kg	670313-06^00	18
5	Spodní plech		4,7 kg	670313-05^00	1
4	Axiální segment		0,7 kg	670313-03^00	16
3	Axiální segment		0,7 kg	670313-04^00	2
1	Tělo - axiální kroužek		29,7 kg	670313-01^00	1
Poz.	Název	Materiál	Hmotnost	Číslo výkresu	Množství

Tabulka 5-2 Kusovník samovyrovnávacího ložiska GTW

Sestava ložiska obsahuje 18 kusů dolních vahadel, 18 kusů horních vahadel a 18 kusů tlakových segmentů. Pro návrh a ověření technologie byla po konzultaci s konstruktérem ložiska vybrána součást **DOLNÍ VAHADLO**, která je tvarově i výrobně ze všech klíčových komponent nejsložitější.

Lze tedy předpokládat největší ekonomické náklady i problémy při výrobě právě u této součásti. Vzhledem k již zmiňovanému omezení z hlediska strojního vybavení společnosti bude pro další vývoj vahadel ložiska nutné využívat kooperačních služeb u dodavatelů s potřebným strojním vybavením. Ostatní dílce (horní vahadlo a tlakový segment) nebudou v rámci diplomové práce vyráběny a testovány. Podrobné rozměry vahadla a výkresovou dokumentaci nelze v diplomové práci uvádět na žádost společnosti GTW Bearings.

2.1.2 Výběr materiálu

Pro návrh a ověření technologie výroby dolního vahadla byly vybrány následující materiály:

- ocel třídy 12
- ocel třídy 15
- ocel třídy 16

Oceli jsou označeny na přání společnosti pouze třídou dle ČSN pro zachování „know-how“.

Oceli třídy 15 a 16 byly vybrány na základě předchozích zkušeností společnosti GTW s výrobou typově podobných dílců namáhaných na otačení. Praktické použití těchto ocelí je podloženo dlouhodobou provozní spolehlivostí dodávaných výrobků. Ocel třídy 12 byla vybrána jako možná alternativa pro srovnání a také jako protireakce na současný trend, kdy se často nasazuje drahý a těžkoobrobitelný materiál namísto celkové optimalizace výrobku pomocí základních inženýrských přístupů. Všechny výše uvedené materiály jsou vhodné k dalšímu tepelnému nebo chemicko-tepelnému zpracování.

Podrobné informace o vlastnostech a složení stanovené normou u vybraných materiálů pro ověření výroby vahadel jsou uvedeny v materiálových listech (viz příloha č. 1 až 3). Tyto listy mimo jiné ukazují, jakých reálných hodnot tvrdosti po tepelném zpracování lze na jednotlivých vzorcích dosáhnout, a tedy splnit jeden z požadavků na funkční plochy. Ostatní požadavky uvedené v kapitole 1.2.4 bude nutné ověřit praktickými testy, tedy výrobou zkušebních vzorků.

2.2 Posouzení technologičnosti konstrukce

Důvodem posuzování technologičnosti konstrukce před samotnou výrobou je odhalení možných problémů, které by mohly nastat a zkomplikovat výrobu. Posouzením technologičnosti lze po dohodě s konstruktérem odstranit nežádoucí prvky konstrukce. Odstraněním nežádoucích prvků je pak možné snížit negativní dopad na náročnost a cenu výroby. Mezi základní cíle technologičnosti konstrukce v praxi patří přijatelné náklady, požadované užitné vlastnosti, požadovaná jakost, přijatelná rizika a co nejnížší pracnost. Obecný pohled na technologičnost konstrukce lze provést z hlediska tvaru, materiálu a technologie výroby. Každé hledisko vychází z různých požadavků funkce součásti, a proto v praxi hledáme vždy přijatelný kompromis mezi těmito požadavky.

Posouzení technologičnosti se týká několika níže uvedených hledisek a pouze vybraného dolního vahadla.

2.2.1 Z hlediska materiálu

Dolní vahadlo je namáháno na otláčení a ohyb. Pro svoji správnou funkci nesmí funkční plochy podléhat otláčení. Je tedy nezbytné, aby tyto plochy byly tvrdé. Z hlediska namáhání na ohyb nesmí být jádro součásti pružné. Materiál musí zajistit svými vlastnostmi nebo i případnou povrchovou úpravou dodržení těchto požadavků. Zvolené legované oceli mají oproti oceli etalonové horší obrobitelnost i vyšší pořizovací cenu.

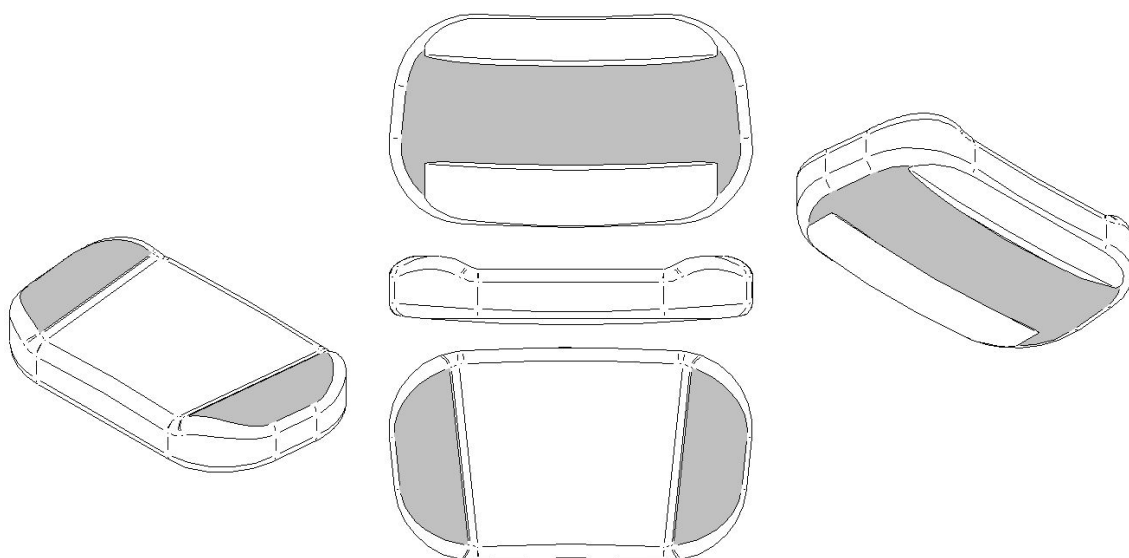
2.2.2 Z hlediska polotovaru

Volba druhu polotovaru je ovlivněna počtem výrobků, daným materiálem a způsobem zpracování polotovaru. Nenormalizované polotovary ve formě odlitku nebo výkovku jsou nevhodné pro malý počet vyráběných vahadel. Vhodnější typy polotovarů jsou proto normalizované profily (tyče, plechy, pásy atd.). Nevýhodou normalizovaných polotovarů je omezená rozměrová řada dle normy. Součásti tedy vyžadují větší přídavky na opracování a s tím jsou spojené další aspekty (větší odpad, spotřeba energie, pracnost a vyšší náklady na výrobu). Jedním z možných rozměrů polotovaru bude kvádr o rozměrech 62x37x16 mm. Tvar polotovaru by měl odpovídat svým tvarem co nejbližší hotovému výrobku, ale je nutné zohlednit počet vyráběných součástí. Jedno ložisko obsahuje 18 dolních vahadel a vzhledem k rozmanitosti vybraných materiálů bude možných druhů normalizovaných polotovarů více. Nabízí se polotovar ve formě ploché válcované tyče, přířezu z kovaných bloků, popřípadě výpalků z plechu. V případě přířezu ploché tyče na pile může nastat problém při řezání legovaných ocelí, kdy bude pilový list nebo kotouč více namáháný. Přířezy z kovaných bloků a výpalky se již dodávají na požadovaný rozměr. Ploché válcované tyče se vyrábějí v nejbližším možném rozměru 40x20 mm.

2.2.3 Z hlediska tvaru a rozměrů

Dolní vahadlo je nerotační součást. Základní tvar součásti je mezikruhová výseč mezi tolerovanými průměry 554(-0,1; -0,2) mm a 490(+0,2; +0,1) mm. Celková výška vahadla měřená mezi spodní válcovou plochou o poloměru R mm a dvěma horními rádiy je v toleranci X(0; -0,1) mm. Kvádr opsaný vahadlem má následující rozměry 55,5x32,5xX mm. Z hlediska pracovního prostoru nejsou kladeny na stroj speciální požadavky.

Na součásti se nacházejí tvarové plochy označené šedivou barvou, které byly již dříve označeny jako plochy funkční. Tyto tvarové plochy lze ideálně vyrobit na pětiosém frézovacím CNC centru. Při obrábění na klasické tříosé frézce za použití například kulové frézy, která je vhodná k obrobení tvarových ploch, nastává problém v místě řezu ve vrcholech ploch. Ve středu kulové frézy jsou nulové otáčky a nulový průměr frézy. Řezná rychlost je nulová a nedochází k obrábění. Výsledný povrch je potom značně nekvalitní a vzhledem k požadavkům na funkční plochy není tento způsob výroby uspokojivý.



Obrázek 18-2 Dolní vahadlo - pohledy

2.2.4 Z hlediska přesnosti a jakosti povrchu

Výkresem určené standardní přesnosti a tolerance dle ISO 2768 a ISO 8015 lze dosáhnout na běžných obráběcích strojích za použití běžných nástrojů. Drsnost (Ra 0,8 μm) tvarových ploch můžeme dosáhnout běžnými nástroji i bez použití dokončovacích operací broušení, která by byla u takto složitých tvarových ploch obtížná. Celková výška vahadla je kótovaná mezi horními vrcholy rádiu a spodní válcovou plochou. Tento fakt může způsobit problémy pro dodržení tolerance výšky jednotlivých vrcholů vahadla v řádu setin milimetru.

2.2.5 Z hlediska tuhosti a upnutí

Při frézování lze bez problémů upnout do strojního svěráku, protože všechny hrany polotovaru jsou rovnoběžné. Jako velmi vhodné řešení se nabízí obrábění při jednom upnutí součásti, které nabízí nejenom úsporu času vlivem ztráty přeupínáním, ale také příznivě ovlivňuje geometrickou přesnost oddělených ploch vahadla. Jako nevýhoda tohoto způsobu může být nižší tuhost upnutí vlivem většího vyložení obráběného dílu. Standardním způsobem je obrábění na dvě upnutí součásti. Tuhost upnutí je zde vyšší, ale hrozí ztráta rozměrové a tvarové přesnosti vlivem napojení horní části na spodní.

2.3 Technologie povrchových úprav pro dosažení zpevnění povrchové vrstvy

Následující kapitola poskytuje obecný přehled včetně rozdělení některých vybraných technologických metod pro dosažení zpevnění povrchové vrstvy. Jedná se o speciální dokončovací technologie obrábění, metody tepelného a chemicko-tepelného zpracování. Předběžný výběr možných metod byl proveden s ohledem na zvolený materiál a tvar funkčních ploch vahadel. Technologie jsou pouze obecně představeny za účelem všeobecného přehledu a jejich možné aplikace v praktické části této diplomové práce.

2.3.1 Metody tepelného (chemicko-tepelného) zpracování

Nitridace [5] [6]

Nitridace je druh chemicko-tepelného zpracování kovů. Při nitridaci obohacujeme povrch kovu dusíkem ve formě atomů nebo iontů, který dalším zpracováním vytváří velmi pevné nitridy v povrchové vrstvě. Nitridace je difúzní proces, kdy se nemění rozměry součásti. Maximální možný nárůst rozměru je vlivem vnitřního pnutí v povrchové nitridované vrstvě a nedosahuje obvykle hodnoty více než 0,03 milimetru. Hloubka vrstvy nebývá větší než 0,5 mm z důvodu pomalého procesu nitridace (asi 0,01 mm za hodinu).

Nitridovat lze prakticky všechny druhy oceli, případně litin. Na vlastnosti nitridované vrstvy mají vliv legující prvky (zejména hliník, molybden, vanad, wolfram). Oceli, které obsahují zmiňované legující prvky, snadno vytvoří stabilní nitridy v povrchové vrstvě. Tyto oceli se označují jako nitridační a lze u nich dosáhnout vysoké tvrdosti (až 1 300 HV). Pokud materiál tyto prvky neobsahuje (měkké, nízkouhlíkové oceli) vznikne vrstva s nižší tvrdostí. Nitridy se v povrchové vrstvě tvoří při teplotě 500 °C až 600 °C. Teplota nitridace musí být bezpodmínečně nižší, než teplota popouštění, aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivnění vlastností jádra součásti.

Výhody:

- zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy
- zvýšení odolnosti povrchu na otláčení (neplatí pro bodový styk součástí)
- odolnost proti korozi
- snížení koeficientu tření

Nejznámější způsoby:

- Nitridace v plynu

Nitridace probíhá v atmosféře obsahující plynný amoniak (čpavek), který se rozkládá na základní prvky dusík a vodík. Hloubka vrstvy je špatně regulovatelná a proces je pomalý. Dosažitelná tvrdost je funkcí teploty, času disociace čpavku a jakosti nitridovaného materiálu (zejména chemického složení, velikosti zrna a předchozího tepelného zpracování). Nitridace v plynu je dnes nejběžněji používaná nitridační metoda.

- Nitridace v solné lázni

Při této metodě dusík do oceli difunduje v roztavené solné lázni složené z kyanidů, které jsou však jedovaté. Prakticky se dnes již nepoužívá.

- Nitridace iontová

Moderní metoda prováděná ve vakuové nádobě. Oproti nitridaci v plynu je proces rychlejší a lépe regulovatelný.

Povrchové kalení a cementace [7] [8]

Povrchovým kalením lze dosáhnout tvrdého zpevněného povrchu se zachováním houževnatého jádra součástí. Tato metoda vyžaduje rychlý ohřev povrchu součástí a následné ochlazení, aby bylo docíleno zpevnění pouze v požadované povrchové vrstvě. S vysokou rychlostí ohřevu roste rychlost nukleace zárodků austenitu a díky tomu vzniká jemnější zrna výsledné martenzitické struktury. Dosahuje se tedy vyšší tvrdosti martenzitu v povrchové vrstvě než při objemovém kalení. Protože martenzitická struktura má větší objem než ferit, je v povrchové vrstvě příznivé tlakové napětí, které pozitivně ovlivňuje únavovou pevnost.

K povrchovému kalení se používají nejčastěji podeutektoidní uhlíkové oceli nebo nízkolegované s obsahem uhlíku 0,35-0,7 % hmotnosti. Výjimku tvoří laserové povrchové kalení, které umožňuje kromě běžně kalitelných ocelí zakalit i oceli s nízkým obsahem uhlíku (0,2 % hmotnosti).

Ověření tvrdosti se provádí měřením hloubky vtisku, která musí být menší než 1/10 tloušťky zakalené vrstvy.

Metody povrchového kalení:

- Plamenem

Ohřev a následné ochlazení probíhá nepřetržitým (postupným) způsobem, kdy se pohybuje buď ohřívací zařízení nebo kalená součást. Chladicí zařízení (nejčastěji vodní) je umístěno těsně za ohřívacím. Jiný způsob spočívá v provedení celého procesu kalení ve dvou oddělených procesech (jednorázově). Součást se ohřeje a následně celá ochladí.

- Indukcí

Ohřev povrchu součástí je prováděn indukovanými proudy pomocí induktoru. Kalený předmět se vkládá těsně k induktoru, kde v povrchové vrstvě vznikají elektromagnetické vířivé proudy. Hloubka vrstvy závisí na frekvenci magnetického pole.

Indukční způsob se s výhodou používá v sériové nebo hromadné výrobě, kde může být zautomatizován a zařazen do výrobní linky.

- Energetickými svazky (laser, plasma, elektronový paprsek)

Laserové záření umožňuje dodat povrchu velmi rychle velké množství tepelné energie, a díky tomu vzniká minimálně teplotně ovlivněné pásmo. Důležitým parametrem je stopa (nejčastěji obdélníková) laserového paprsku, která se pohybuje v rozmezí od tří do pěti milimetrů. Mezera mezi stopami musí být alespoň dvě hloubky zakalení. Pokud mezera nebude dostatečná, druhá stopa popustí první stopu. V praxi je však tato skutečnost jiná. Stopy se běžně překrývají. Laserové povrchové kalení dosahuje prokalené vrstvy v závislosti na času působení a výkonu laseru bez problémů i 2 mm. U této metody se chladí součást pouze na vzduchu, není potřeba kalicí médium. Laserové zařízení se s výhodou umísťuje na průmyslové roboty pro snadné zaměření kaleného místa součástí. Roboti umožňují sériové nasazení této technologie.

Výhody laserového kalení:

- kalení přesně do požadovaného místa na součásti
- kvalita a rychlost provedení
- minimální deformace součásti
- nízké teplotní ovlivnění okolního materiálu
- nevznikají povrchové trhliny

S konvenčním povrchovým kalením je úzce spojená cementace povrchu součástí z nízkouhlíkových ocelí (do obsahu uhlíku 0,35 % hmotnosti). Cementací se obohacuje pouze povrchová vrstva uhlíkem, který je nezbytný k vytvoření tvrdé martenzitické struktury. Po nasycení povrchu následuje kalení a nízkoteplotní popouštění. Obsah uhlíku se v povrchové vrstvě zvyšuje na 0,7-0,9 % hmotnosti. Cementace se nejčastěji provádí v plynném prostředí při teplotách 850-950 °C. Právě plynné prostředí umožňuje velmi dobrou regulaci podmínek cementování.

Nitrocementace a karbonitridace [6] [9]

Tyto způsoby chemicko-tepelného zpracování jsou založeny na současném sycení povrchu součásti uhlíkem a dusíkem. Název se odvíjí od prvku s převládajícím vlivem. U nitrocementace má převládající vliv uhlík a po zpracování je nutné součásti zušlechtit. Oceli vhodné k nitrocementaci obsahují 0,25–0,4 % uhlíku. Teploty při zpracování dosahují díky atmosféře obsahující amoniak nižší hodnoty oproti běžné cementaci. Teploty se pohybují v rozmezí 750 až 850 °C. Hloubka vrstvy se doporučuje okolo 0,2–0,4 mm. Rychlost tvorby nitrocementační vrstvy je přibližně 0,1 mm za hodinu.

Karbonitridace je charakterizována převládajícím vlivem dusíku a po zpracování není nutné následné zušlechtění materiálu. V případě ocelí s vyšším obsahem uhlíku (nad 0,4 %) se o karbonitridaci může jednat i tehdy, je-li použito pouze nitridační atmosféry, protože uhlík do vrstvy difunduje z jádra materiálu a vytváří pak vrstvu karbonitridovanou. Teplota procesu je 560 až 620 °C, tedy nižší než u nitrocementace. Rychlost tvorby vrstvy se pohybuje okolo 0,05 mm za 2-3 hodiny.

2.3.2 Obrábění tvrdých materiálů

Obrábění tvrdých materiálů bylo dříve velice obtížné. V dnešní době s vývojem řezných materiálů (např. řezné keramiky a cermetů), způsobů obrábění (vysokorychlostní) a obráběcích strojů lze realizovat i třískové obrábění těchto materiálů. Za tvrdé lze považovat materiály v rozsahu tvrdostí 43 až 70 HRC se zhoršenou obrobiteľnosťou. [10]

Vybrané příklady tvrdých materiálů:

- Oceli
 - Kalené
 - Korozivzdorné
 - Žáruvzdorné
 - Nástrojové
 - a jiné

- Litiny
 - Šedé
 - Tvrzené
 - Bílé

Technologie tvrdého obrábění

- Broušení

Broušení převážně rotačních součástí z tvrdých materiálů je dnes s výhodou nahrazováno soustružením na speciálních vysocepřesných CNC soustruzích.

- Tvrdé obrábění konvenčními metodami běžnými či vyššími rychlostmi
- Vysokorychlostní obrábění (HSC, HSM)

Hlavní princip této metody spočívá v použití řezné rychlosti 5 až 10krát větší než při běžném obrábění. Hranice vysoké řezné rychlosti je odlišná pro jednotlivé druhy obráběných materiálů, ale také samotnou konstrukcí nástroje a geometrií břítu. Dalšími znaky HSC obrábění jsou vysoké otáčky a posuvy se současným zmenšením hloubky řezu (ap). Při vysokorychlostním obrábění dochází k ohřátí obráběného materiálu na teplotu blízkou teplotě tavení. Pro ocel je tato teplota okolo 1 500 °C, pro litinu 1 300 °C a pro hliník 600 °C. Přenos tepla do obrobku i nástroje je minimální a veškeré teplo odchází třiskou mimo proces. Tato skutečnost zabraňuje tepelnému ovlivnění obrobku. [10]

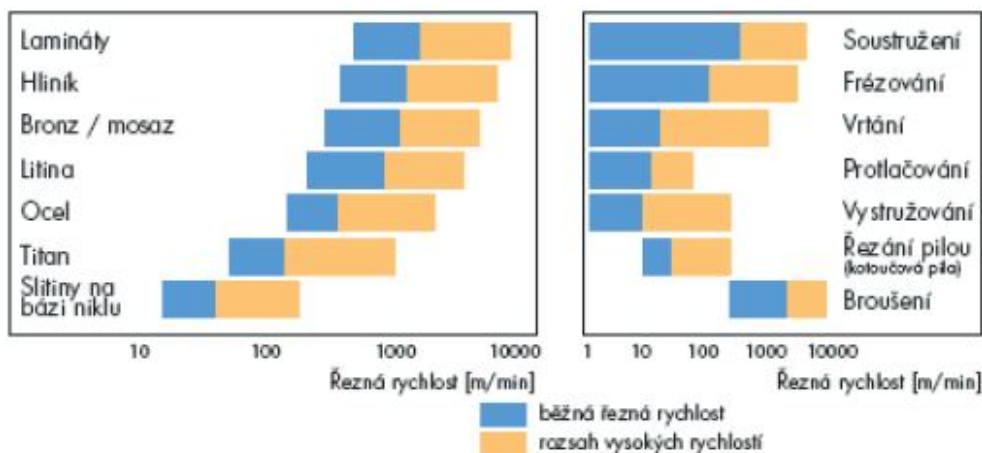
Hlavní přínosy vysokorychlostního obrábění:

- snížení strojních časů
- zlepšení kvality obrobeného povrchu
- delší životnost nástroje
- zvýšení tvarové a rozměrové přesnosti obrobku
- minimalizace nebo úplné odstranění dokončovacích operací
- absence použití chladicích kapalin
- vysoké hodnoty úběrů

Nevýhody:

- nákladné strojní a nástrojové vybavení
- kvalifikovanější pracovníci na obsluhu stroje

Následující obrázek zobrazuje rozsah řezných rychlostí v závislosti na materiálu a použité metodě obrábění.



Obrázek 19-2 rychlosti při HSC a konvenčním obrábění [10]

Technologie HSM frézování tvarově složitých ploch je dnes používána při výrobě zápusťek a forem, kde se s výhodou uplatňují přednosti této moderní technologie.

Nástroje pro obrábění tvrdých materiálů

Volba nástroje je v první řadě ovlivněna obráběným materiálem. Materiál nástroje musí mít obecně tvrdost větší než obráběný materiál o 5-6 HRC. Pro správnou volbu nástroje je nutné zohlednit i tyto další faktory:

- požadovaná jakost povrchu
- obráběcí stroj
- typ obráběcí operace
- řezné podmínky
- celkové náklady na obrábění

2.3.3 Ostatní vybrané metody úpravy povrchových vrstev

Válečkování

Válečkování je dokončovací metoda bez úběru materiálu. Dochází zde ke zpevňování povrchové vrstvy důsledkem plastické deformace vyvolané přítlačnou silou tvářecího elementu. Jako tvářecí elementy se nejčastěji používají válečky nebo kuličky v závislosti na upravovaném povrchu. Kromě zpevňování dochází také ke zvyšování nosného podílu povrchu a s tím spojené hodnoty drsnosti. Nejvýraznější zpevnění lze vyzorovat u tvárných kovů. Válečkují se primárně rotační vnější a vnitřní plochy. [11]

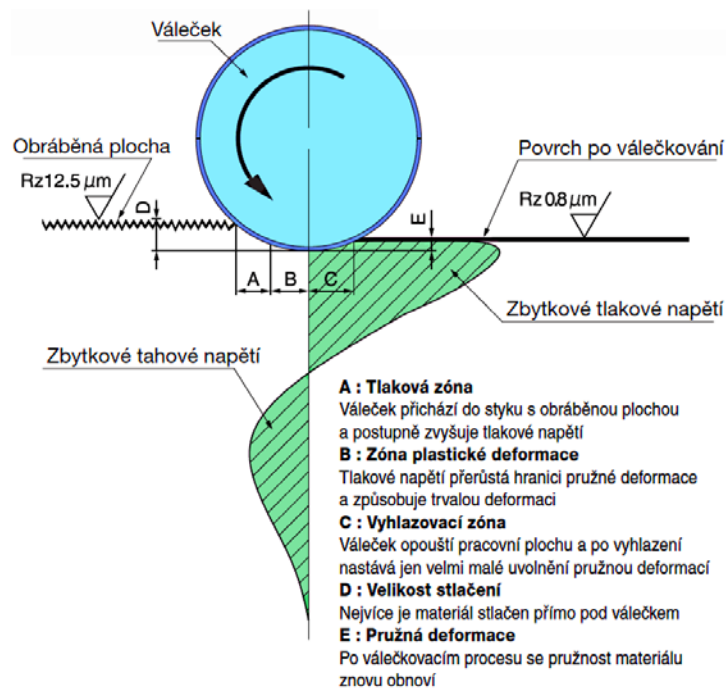
Omezení z hlediska vhodného materiálu je primárně hodnotou tvrdosti, protože válečkovaný materiál nesmí být tvrdší než 40 HRC. Dále pak pevností menší než 1250 MPa a výchozí drsností povrchu Ra menší než 3,2 μm . Dosahovanou tvrdost po válečkování by bylo nutné ověřit praktickými testy nebo experimentálně v závislosti na použitém materiálu obrobku. V současné době není otázka válečkování tvarových ploch dostatečně popsána pro praktické použití v této diplomové práci. [11]

Dosahované parametry:

- Zmenšení rozměru součásti o 0,01 až 0,05 mm v závislosti na průměru
- Rozměrová přesnost IT6 až IT8
- Drsnost Ra 0,05 až 0,4 μm
- Hloubka zpevnění povrchové vrstvy až 0,1 mm

Výhody válečkování:

- Zvýšení pevnosti a meze únavy
- Zvýšení tvrdosti
- Zvýšení odolnosti proti korozi
- Zvýšení nosného podílu profilu
- Přeměna tahových zbytkových napětí na příznivé tlakové



Obrázek 20-2 Válečkování [11]

Tryskání bez úběru materiálu

Tato metoda je založena na ostřelování upravovaného povrchu vysokou rychlostí sférickými neabrazivními částicemi z různých materiálů. Pro dosažení požadovaného efektu zpevnění povrchu a ne pouhého očištění (známé jako pískování) mají tyto materiály vyšší hmotnost. Z pracovních podmínek výsledný povrch ovlivňuje rychlost a směr dopadu částic. [11]

Dle použitých částic se nazývají i příslušné operace:

- Kuličkování – ocelové kuličky o průměru 0,3 až 3 mm z měkké, kalené nebo korozivzdorné oceli
- Balotínování – skleněné kuličky o průměru 0,03 až 0,8 mm
- Tryskání keramickými kuličkami

Výhodou ocelových kuliček je vyšší pevnost, avšak s negativním zanecháváním stop po nárazu. Keramické a skleněné kuličky stopy nezanechávají, ale po nárazu se do značné míry deformují a je nutné pro další aplikaci takto poškozené elementy odstranit. [11]

Hlavní charakteristiky metody:

- Drsnost povrchu v rozmezí Ra 0,8 až 1,6 μm závisí na vstupních hodnotách (např. Ra 6,3 μm se zlepší na 0,8 μm , ale Ra 0,2 μm se zhorší na 0,4 μm při stejných podmínkách).
- Vznik pozitivního tlakového zbytkového napětí v povrchové vrstvě součásti, které má vliv na mechanické namáhání, odolnost proti otěru nebo korozi.
- hloubka zpevnění 0,05 - 0,5 mm
- Přesnost rozměrů a tvarů zůstává po předchozí operaci.

Laserové navařování

Technologie laserového navařování umožňuje na povrchu součásti vytvářet specifické povrchy nezávislé na základním podkladovém materiálu. Pro vytvoření vrstvy se využívá vysoké hustoty energie laserového paprsku, která natavuje přídavný i základní materiál a vzniká tak úplně nový povrch. Po vychladnutí vznikne kvalitní a pevný spoj s povrchovými vlastnostmi přídavného materiálu. Laserový paprsek dokáže navařovat mnoho druhů materiálů jako oceli, slitiny titanu, niklu, hliníku, hořčíku, mědi a další. Podobně jako další technologie využívající laser je lze snadno zautomatizovat s použitím robotů. [12]

Laserové navařování představuje kompromis mezi vlastnostmi dvou zcela odlišných materiálů. Není problém vytvořit na podkladu z běžné konstrukční uhlíkové oceli povrch z oceli nástrojové. Technologie laserového navařování je v současné době používána také u technologie rapid prototyping (3D tisk). Nový výrobek je tvořen navařováním jednotlivých vrstev prášku na druhou, a tím vzniká požadovaný tvar. [12]

Výhody:

- příprava vysoce kvalitních vrstev v celém spektru materiálových vlastností pro požadovaný povrch (tvrdost, odolnost proti otěru, korozi nebo teplotě)
- řízení tloušťky návaru s nízkou porezitou
- nízké tepelné ovlivnění součásti oproti konvečnímu navařování
- prodloužení životnosti součásti

2.4 Výběr technologií pro dosažení požadavků na funkční plochy

Rozhodovací kritéria:

- K1 (povrchová tvrdost)
- K2 (dostupnost vzhledem k sídlu společnosti)
- K3 (nutnost strojní dokončovací operace – broušení, frézování...)
- K4 (dosahovaná hloubka zpevnění povrchové vrstvy)

Rozhodovací tabulka technologií

Bodovací stupnice a váhy kritérií (K)

body	K1	K2	K3	K4
0	< 50 HRC	≥ 15 km	vyžaduje	< 0,3 mm
1	≥ 50 HRC	< 15 km	nevyžaduje	≥ 0,3 mm
váhy	4	1	2	3


Materiál + TZ	Technologie	Kritérium				celkové body
		K1	K2	K3	K4	
ocel třídy 12 + QT	nitridace v plynu	0	1	1	1	6
	laserové povrchové kalení	1	1	1	1	10
	objemové kalení	1	1	0	1	8
	cementace + objemové kalení	1	1	0	1	8
	nitrocementace	1	1	0	1	8
	karbonitridace	0	1	1	1	6
	válečkování	0	0	1	0	2
	tryskání bez úběru materiálu	0	1	1	0	3
	laserové navařování	1	1	0	1	8
ocel třídy 15 a 16 + QT	nitridace v plynu	1	1	1	1	10
	laserové povrchové kalení	1	1	1	1	10
	objemové kalení	1	1	0	1	8
	cementace + objemové kalení	1	1	0	1	8
	nitrocementace	1	1	0	1	8
	karbonitridace	1	1	1	1	10
	válečkování	0	0	1	0	2
	tryskání bez úběru materiálu	0	1	1	0	3
	laserové navařování	1	1	0	1	8

Tabulka 6-2 Rozhodovací tabulka technologií

Na základě rozhodovací tabulky byla vybrána technologie nitridace a laserového povrchového kalení. Vybrané způsoby tepelného a chemicko-tepelného zpracování nemají značně ovlivnit výchozí tvar součásti, a proto není nutné použít dokončovací technologie obrábění. Dále tyto způsoby zpracování umožňují dosáhnout požadované hloubky zpevnění povrchové vrstvy. Ocel třídy 12 nebude v rámci diplomové práce nitridována z důvodu předpokladu nedosažení požadované tvrdosti povrchové vrstvy.

3 Ověření technologie výroby klíčových komponent ložiska

Technologie výroby bude ověřena na pěti zkušebních vahadlech podle následujícího postupu:

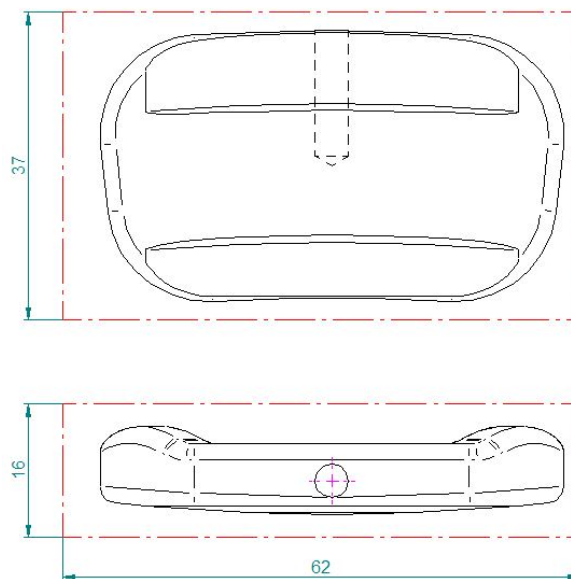
počet kusů	Materiál Polotovár	Pořadí operací 					
		1	ocel třídy 12 + QT 62x37x16	Kompletní obrobení	Porovnání rozměrové a tvarové přesnosti s modelem	1x Povrchové kalení	Ruční přeleštění funkčních ploch
2	ocel třídy 15 + QT 62x37x16	1x Povrchové kalení					
2	ocel třídy 16 + QT 62x37x16	1x Nitridace					

Tabulka 7-3 Návrh a ověření

Po kompletním obrobení dolního vahadla se jednotlivé kusy porovnávají na měřicím 3D souřadnicovém stroji s modelem součásti vytvořeným v CAD softwaru. Současně s tímto měřením se provede analýza opotřebení klíčových nástrojů pro jednotlivé materiály. Dále bude následovat laserové povrchové kalení a nitridace povrchu funkčních ploch vahadel. Tyto technologie nevyžadují následné opracování, a tedy není nutné další obrábění již tvrdého povrchu. Po tepelném zpracování (chemicko-tepelném zpracování) se opět provede porovnání na 3D souřadnicovém stroji zakončené měřením tvrdosti funkčních ploch. Náznorný postup je uveden v tabulce (Tabulka 7-3).

3.1 Polotovár

Polotovár pro zkušební vzorky byl zhotoven z přířezu kruhové tyče o průměru 90 mm, která byla následně ofrézována do požadovaného kvádrú 62x37x16 mm. Polotovary byly dodány ve šlechtěném stavu. V případě kompletní výroby všech vahadel pro celé ložisko je však tento způsob neefektivní. Vzhledem k malému počtu zkušebních kusů a zamýšlenému ověření výroby dolního vahadla bylo zvoleno improvizované řešení.



Obrázek 21-3 Polotovár dolního vahadla

3.2 Kompletní obrobení

Zkušební vahadla byla vyrobena na pětiosém CNC frézovacím centru HERMLE C42U s řídicím systémem HEIDENHAIN iTNC530. Potřebný NC program byl vytvořen pomocí CAM softwaru SolidCAM. Nástrojové vybavení bylo zvoleno s ohledem na aktuální dostupnost společnosti vlastníci obráběcí stroj. Vřeteno je vybaveno upínacím kuželem HSK A63. Ostatní parametry stroje jsou uvedeny na webových stránkách výrobce. Podrobný sled operací včetně nástrojů, grafického znázornění a řezných podmínek je uveden níže. Řezné podmínky byly zvoleny dle doporučených katalogových hodnot jednotlivých výrobců nástrojů a upraveny při samotném obrábění zkušebních vahadel. Nelze tedy tyto hodnoty považovat za optimální pro zvolenou technologii obrábění.

Hlavní důraz je kladen spíše na návrh a ověření celé výroby vahadel včetně jejich tepelného (chemicko-tepelného) zpracování než podrobné odladění nástrojů pro daný materiál. Bližší informace o použitých nástrojích jsou k dispozici v příloze č. 4.

Obráběné materiály s přiděleným MC kódem obrábitelnosti podle ISO normy (dle ČSN):

Ocel třídy 12 +QT -> ISO P1.2.Z.HT (dle ČSN 13b)

Ocel třídy 15 +QT -> ISO P2.2.Z.AN (dle ČSN 11b)

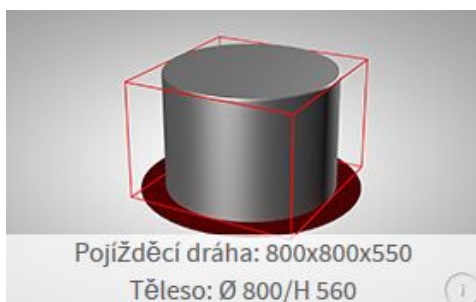
Ocel třídy 16 +QT -> ISO P2.2.Z.AN (dle ČSN 11b)

Oceli patří do skupiny nelegovaných a nízkolegovaných uhlíkových ocelí označených dle normy ISO písmenem P a modrou barvou. .



Obrázek 22-3 Hermle C42U [13]

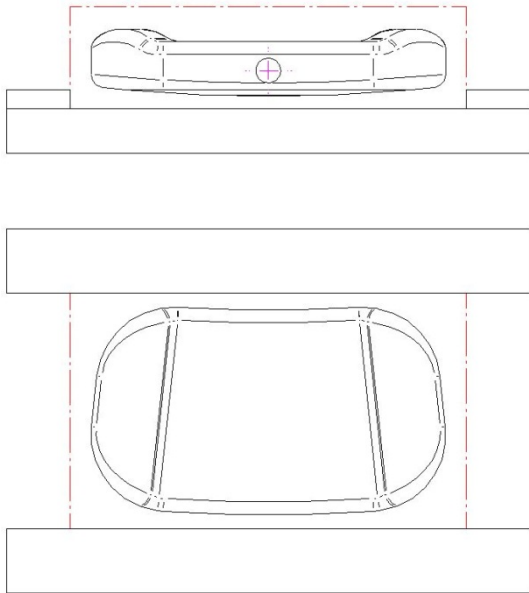
Pracovní prostor stroje



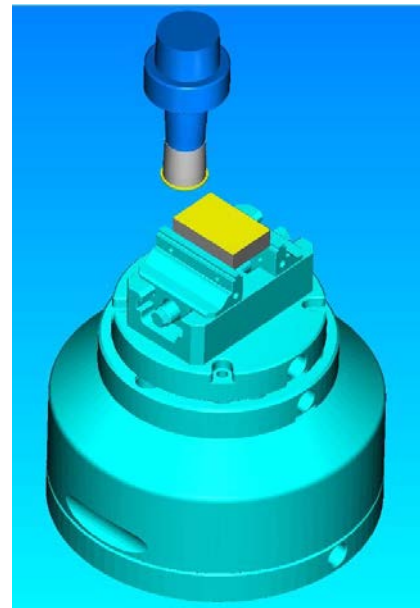
Obrázek 23-3 Hermle C42U pracovní prostor [13]

- Upnutí polotovaru

Polotovar je upnutý za delší stranu do strojního ručně ovládaného svěráku s centrickými čelistmi, které zaručují vzájemný pohyb proti sobě. Poloha nulového bodu je nastavena pomocí obrobkové sondy. Součást bude obráběna nejprve z horní části, poté otočena a dokončena spodní část.

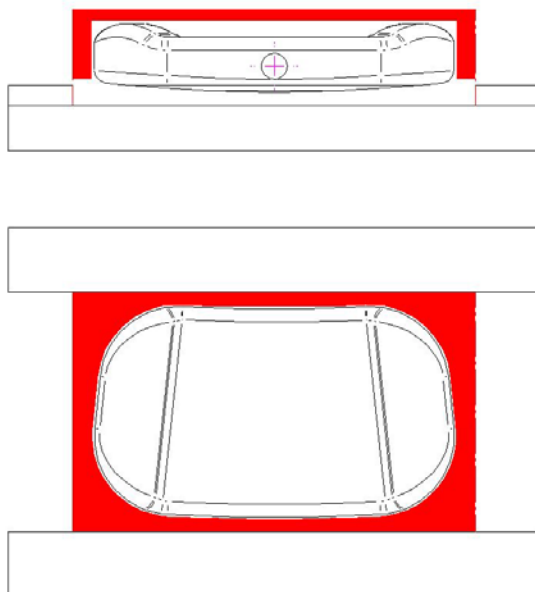


Obrázek 24-3 Upnutí polotovaru



Obrázek 25-3 Upnutí polotovaru CAM

- Zarovnání čela a vyhrubování kontury



Obrázek 26-3 Zarovnání čela



Obrázek 27-3 Fréza s VBD [14]

NÁSTROJ

název : ISCAR čelní modulární fréza s VBD
označení : FF EWX D35-4-M16-05 + VBD H600 WXCW 05T312T
materiál nástroje : VBD slinutý karbid IC830

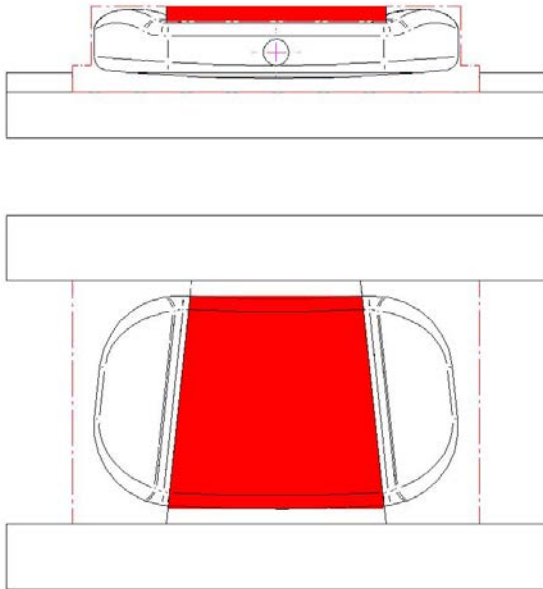
D [mm] 35
Z [-] 4

materiál obrobku	ŘEZNÉ PODMÍNKY			
	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	140	0,39	1270	2000
ocel třídy 15	82	0,60	750	1800
ocel třídy 16	82	0,60	750	1800

Procesní kapalina: vzduch

Tabulka 8-3 Řezné podmínky op. 2

- Předdokončení dna mezi funkčními plochami rádiů



Obrázek 28-3 Předdokončení dna



Obrázek 29-3 Monolitní fréza D12 [15]

NÁSTROJ

název : GARANT čelní válcová fréza
označení : 203018
materiál nástroje : slinutý karbid K20 + povlak TiAlN

D [mm] 12
Z [-] 4

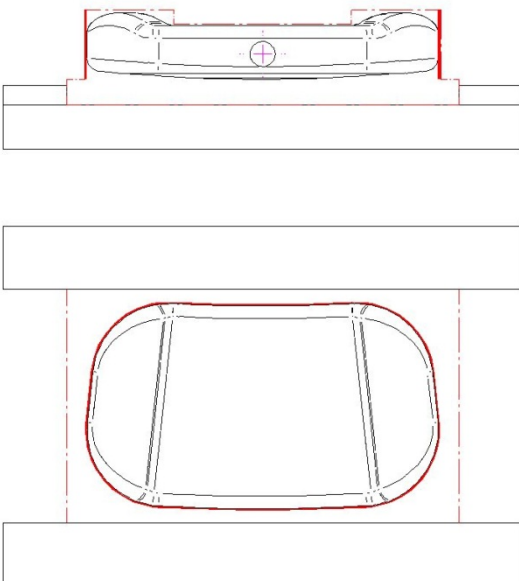
ŘEZNÉ PODMÍNKY

materiál obrobku	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	141	0,04	3742	593
ocel třídy 15	141	0,04	3742	593
ocel třídy 16	141	0,04	3742	593

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 9-3 Řezné podmínky op. 3

- Dokončení kontury součásti



Obrázek 30-3 Dokončení kontury



Obrázek 31-3 Monolitní fréza D8 [15]

NÁSTROJ

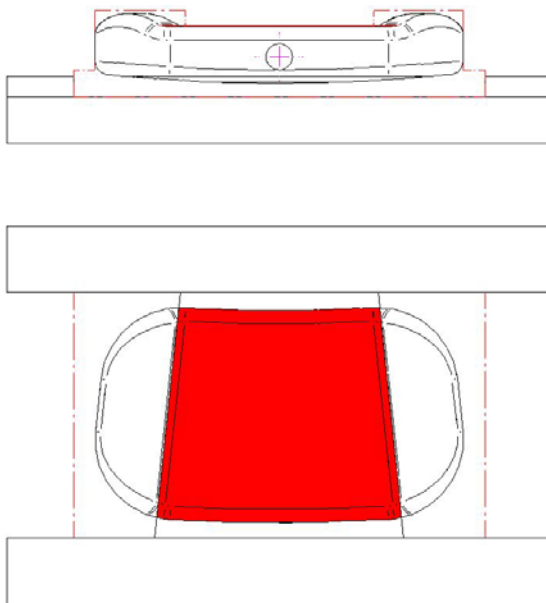
název : GARANT čelní válcová fréza
označení : 203530
materiál nástroje : slinutý karbid K30 + povlak TiAlN

D [mm]	8	ŘEZNÉ PODMÍNKY		
Z [-]	6			
materiál obrobku	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	120	0,03	4775	800
ocel třídy 15	60	0,04	2387	573
ocel třídy 16	60	0,04	2387	573

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 10-3 Řezné podmínky op. 4

- Dokončení dna mezi funkčními plochami rádiů



Obrázek 32-3 Dokončení dna



Obrázek 33-3 Toroidní fréza D12 [16]

NÁSTROJ

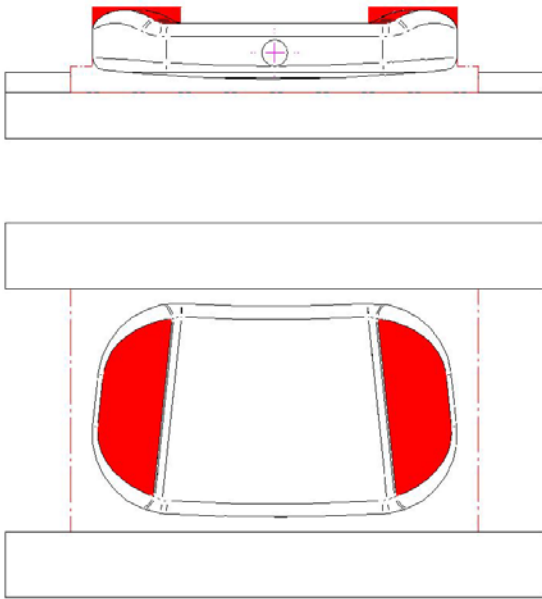
název : SCT toroidní čelní válcová fréza
označení : PLSC6X12050T20
materiál nástroje : slinutý karbid + povlak AlCrN

D [mm]	12	ŘEZNÉ PODMÍNKY		
Z [-]	6			
materiál obrobku	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	140	0,04	3714	800
ocel třídy 15	60	0,06	1592	600
ocel třídy 16	60	0,06	1592	600

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 11-3 Řezné podmínky op.5

- Předdokončení tvarových ploch

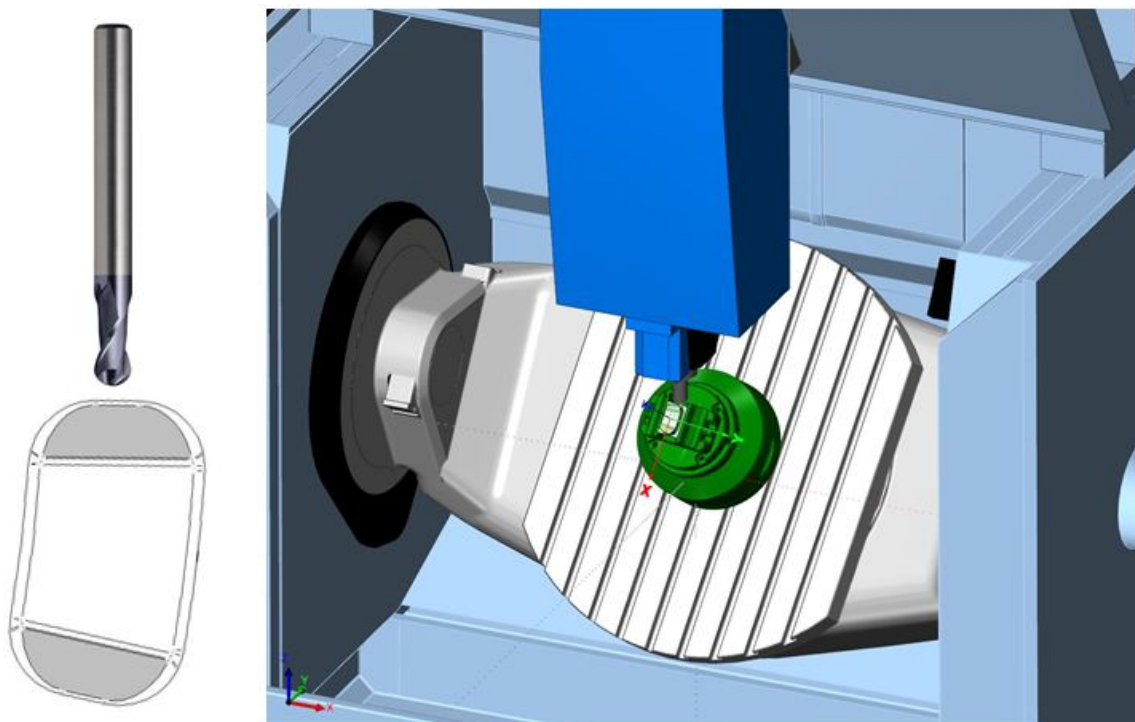


Obrázek 34-3 Předdokončení tvarových ploch



Obrázek 35-3 Kulová fréza [16]

Strategie obrábění funkčních ploch – řádkování kulovou frézou R2 se současným natáčením stolu. Kulová fréza R2 byla použita pro docílení nejlepší možné kvality (drsnosti) obrobeného povrchu a také z důvodu aktuální dostupnosti nástrojového vybavení použitého obráběcího stroje.



Obrázek 36-3 CAM simulace

NÁSTROJ

název : SCT kulová fréza
označení : PLSC2X04030B
materiál nástroje : slinutý karbid + povlak AlCrN

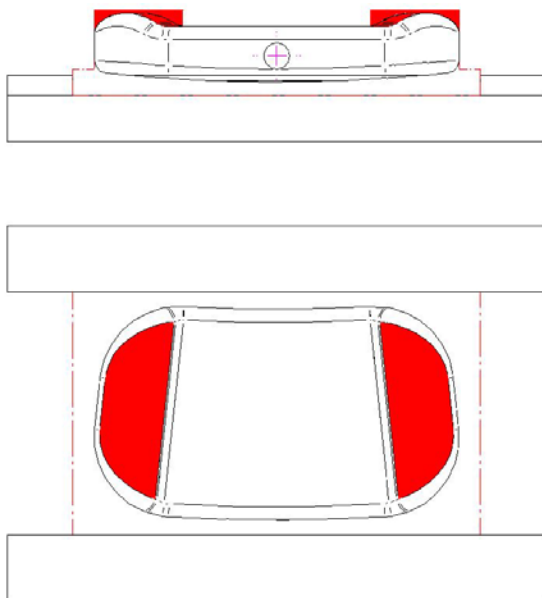
D [mm] 4
Z [-] 2

materiál obrobku	ŘEZNÉ PODMÍNKY			
	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	140	0,03	11141	698
ocel třídy 15	81	0,03	6414	426
ocel třídy 16	81	0,03	6414	426

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 12-3 Řezné podmínky op. 6

- Dokončení tvarových ploch



Obrázek 37-3 Dokončení tvarových ploch



Obrázek 38-3 Kulová fréza [16]

NÁSTROJ

název : SCT kulová fréza
označení : PLSC2X04030B
materiál nástroje : slinutý karbid + povlak AlCrN

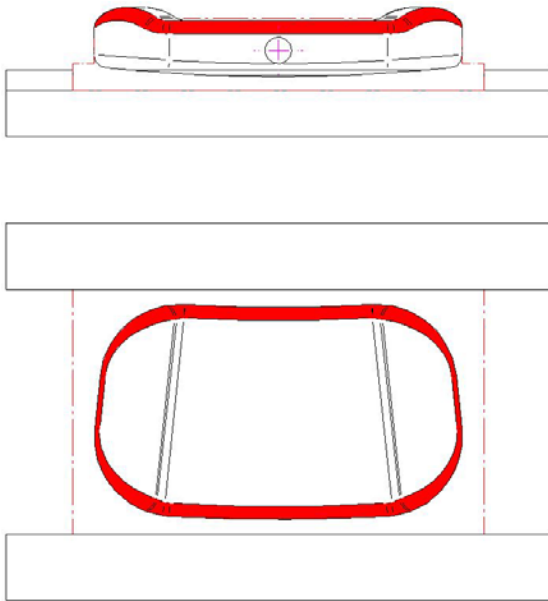
D [mm] 4
Z [-] 2

materiál obrobku	ŘEZNÉ PODMÍNKY			
	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	140	0,04	11141	868
ocel třídy 15	81	0,04	6414	538
ocel třídy 16	81	0,04	6414	538

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 13-3 Řezné podmínky op. 7

- Dokončení zaoblení kontury



Obrázek 39-3 Dokončení zaoblení kontury



Obrázek 40-3 Kulová fréza [16]

NÁSTROJ

název : SCT kulová fréza
označení : PLSC2X04030B
materiál nástroje : slinutý karbid + povlak AlCrN

D [mm] 4
Z [-] 2

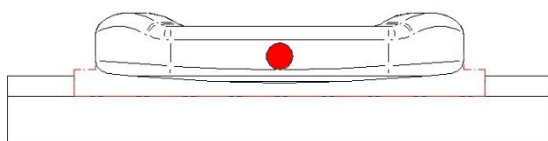
ŘEZNÉ PODMÍNKY

materiál obrobku	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	81	0,08	6414	1022
ocel třídy 15	81	0,07	6414	834
ocel třídy 16	81	0,07	6414	834

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 14-3 Řezné podmínky op. 8

- Vrtání otvoru



Obrázek 41-3 Vrtání otvoru



Obrázek 42-3 Vrták Horex [15]

NÁSTROJ

název : HOLEX vrták s vnitřním chlazením
označení : 122630
materiál nástroje : slinutý karbid + povlak TiN

D [mm] 4
Z [-] 2

ŘEZNÉ PODMÍNKY

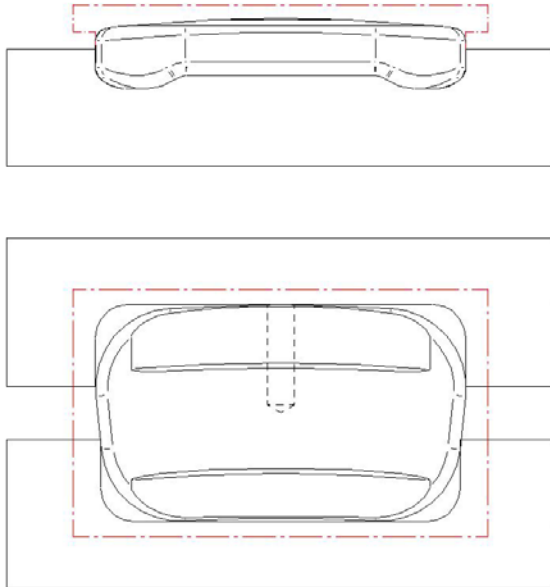
materiál obrobku	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	75	0,04	5968	537
ocel třídy 15	36	0,02	2875	139
ocel třídy 16	36	0,02	2875	139

Procesní kapalina: emulze

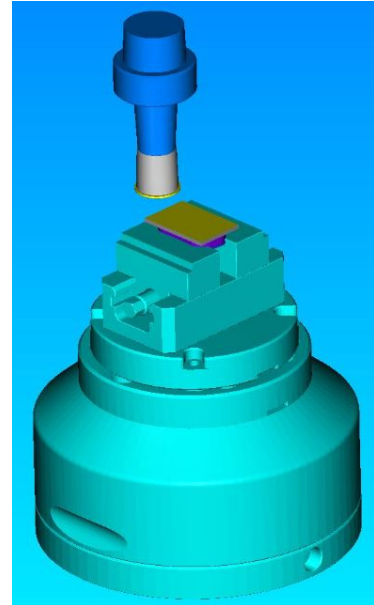
Tabulka 15-3 Řezné podmínky op. 9

- Druhé upnutí polotovaru

Po obrobení horní části se součást otočí a upne do měkkých čelistí ofrézovaných dle kontury součásti. Při frézování je potřeba zohlednit mezeru mezi čelistmi pro vyrovnávací podložku.

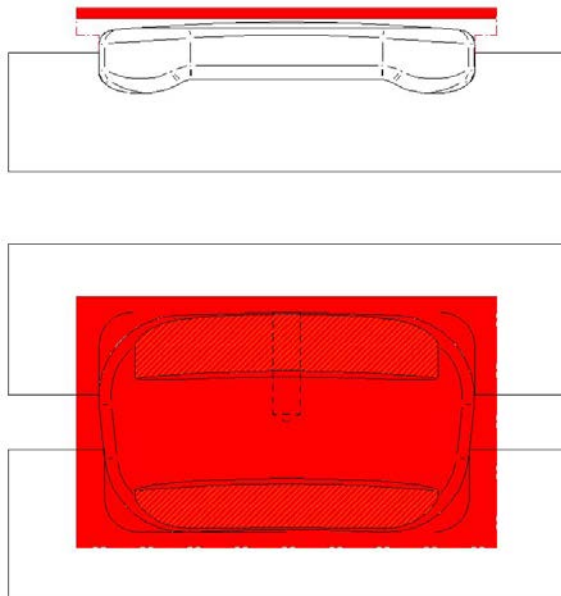


Obrázek 43-3 Druhé upnutí polotovaru



Obrázek 44-3 CAM simulace upnutí polotovaru

- Zarovnání čela, vyhrubování kontury včetně odlehčení



Obrázek 45-3 Zarovnání čela



Obrázek 46-3 Fréza s VBD [14]

NÁSTROJ

název : ISCAR čelní modulární fréza s VBD
označení : FF EWX D35-4-M16-05 + VBD H600 WXCUCU 05T312T
materiál nástroje : VBD slinutý karbid IC830

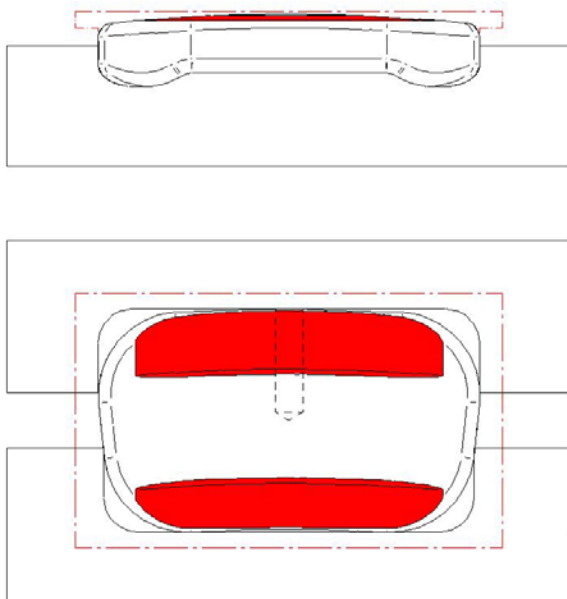
D [mm] 35
Z [-] 4

materiál obrobku	v_c [m/min]	ŘEZNÉ PODMÍNKY		
		f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	140	0,39	1273	2000
ocel třídy 15	81	0,61	733	1800
ocel třídy 16	81	0,61	733	1800

Procesní kapalina: vzduch

Tabulka 16-3 Řezné podmínky op. 11

- Dokončení odlehčení



Obrázek 47-3 Dokončení odlehčení



Obrázek 48-3 Toroidní fréza D10 [16]

NÁSTROJ

název : SCT toroidní čelní válcová fréza
označení : PLSC6X10050T10
materiál nástroje : slinutý karbid + povlak AlCrN

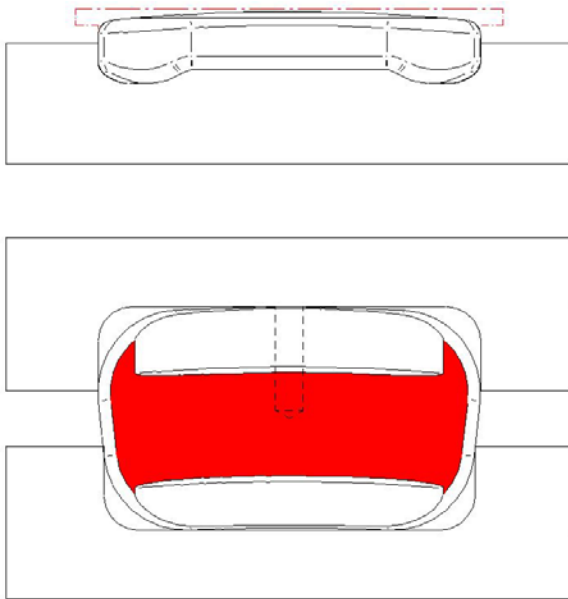
D [mm] 10
Z [-] 6

materiál obrobku	v_c [m/min]	ŘEZNÉ PODMÍNKY		
		f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	140	0,04	4456	1200
ocel třídy 15	60	0,05	1924	607
ocel třídy 16	60	0,05	1924	607

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 17-3 Řezné podmínky op. 12

- Předdokončení válcové funkční plochy



Obrázek 49-3 Předdokončení válcové funkční plochy



Obrázek 50-3 Monolitní fréza D16 [15]

NÁSTROJ

název : GARANT čelní válcová fréza
označení : 203018
materiál nástroje : slinutý karbid K20 + povlak TiAlN

D [mm] 16
Z [-] 4

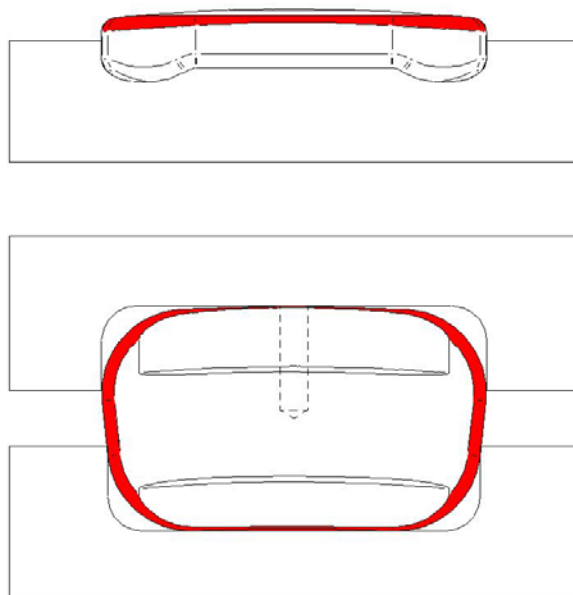
ŘEZNÉ PODMÍNKY

materiál obrobku	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	140	0,07	2785	800
ocel třídy 15	60	0,09	1203	440
ocel třídy 16	60	0,09	1203	440

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 18-3 Řezné podmínky op. 13

- Dokončení zaoblení kontury



Obrázek 51-3 Dokončení zaoblení kontury



Obrázek 52-3 Kulová fréza [16]

NÁSTROJ

název : SCT kulová fréza
označení : PLSC2X04030B
materiál nástroje : slinutý karbid + povlak AlCrN

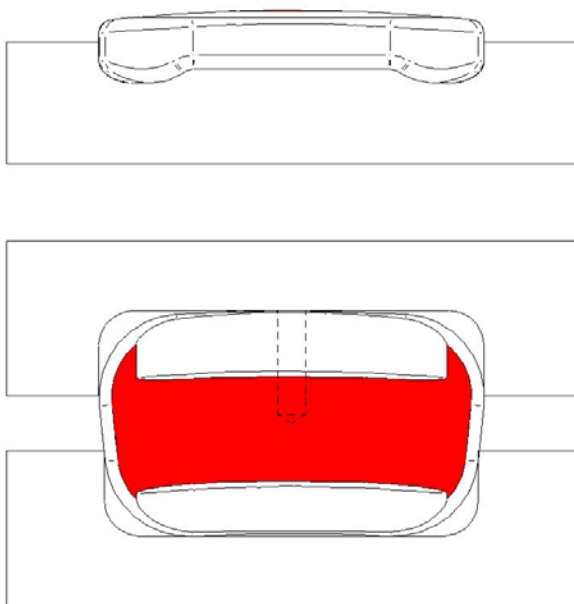
D [mm] 4
Z [-] 2

materiál obrobku	ŘEZNÉ PODMÍNKY			
	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	81	0,08	6414	1022
ocel třídy 15	81	0,07	6414	843
ocel třídy 16	81	0,07	6414	843

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 19-3 Řezné podmínky op. 14

- Dokončení válcové funkční plochy



Obrázek 53-3 Dokončení funkční válcové plochy



Obrázek 54-3 Monolitní fréza D16 [15]

NÁSTROJ

název : GARANT čelní válcová fréza
označení : 203530
materiál nástroje : slinutý karbid K30 + povlak TiAlN

D [mm] 16
Z [-] 6

materiál obrobku	ŘEZNÉ PODMÍNKY			
	v_c [m/min]	f_z [mm]	n [1/min]	v_f [mm/min]
ocel třídy 12	120	0,06	2387	800
ocel třídy 15	60	0,04	1203	300
ocel třídy 16	60	0,04	1203	300

Procesní kapalina: emulze

Tabulka 20-3 Řezné podmínky op. 15

Ukázka obrobené součásti – vahadlo č.1

Dolní strana

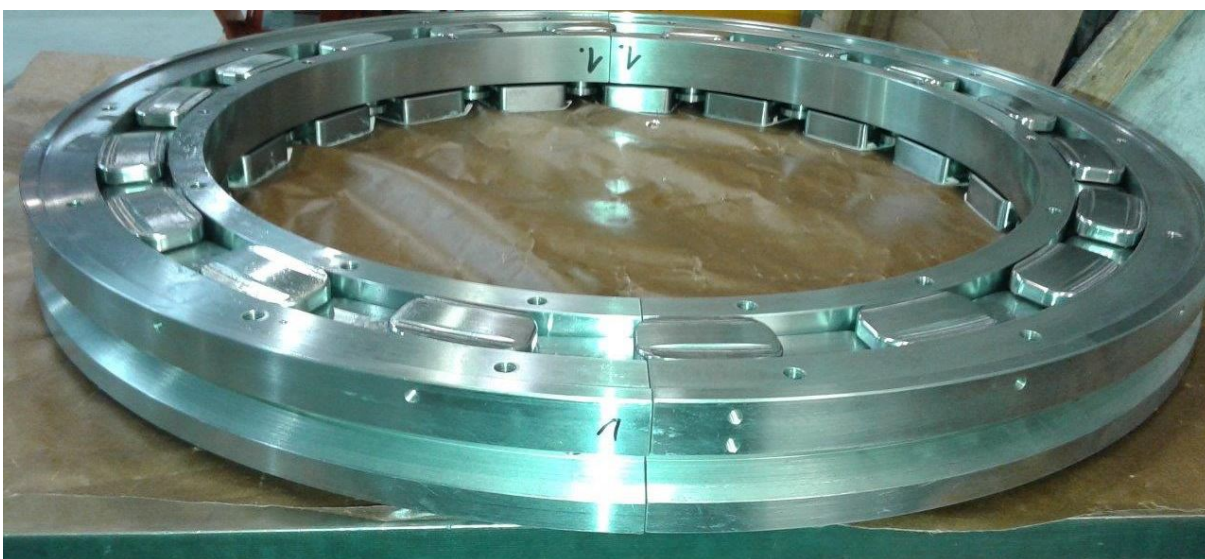


Horní strana



Obrázek 55-3 Vahadlo č.1

Ukázka sestavy vahadel v ložisku



Obrázek 56-3 Vahadla v ložisku

3.3 Ověřující série měření po obrobení

3.3.1 Měření výšky

Výška vahadel byla změřena komparační metodou pomocí digitálního úchylkoměru a koncových měrek.

Postup měření:

- Očištění měřených součástí a granitové desky
- Uchycení úchylkoměru do stojánku
- Složení koncových měrek na jmenovitý rozměr výšky vahadla
- Nastavení jmenovitého rozměru výšky vahadla na dig. úchylkoměru
- Nalezení největší odchylky výšky vahadla a označení fixem

Měření celkové výšky vahadel
Jmenovitý rozměr: X (0;-0,01) mm
odchylka od JR [mm]

Vahadlo 1	0,011
Vahadlo 2	0,008
Vahadlo 3	0,008
Vahadlo 4	0,014
Vahadlo 5	0,009

Tabulka 21-3 Měření výšky vahadel



Obrázek 57-3 Měření výšky vahadel

3.3.2 Měření geometrické přesnosti

Podrobné ověřující měření zkušebních vahadel bylo provedeno v metrologické laboratoři Regionálního technologického institutu při ZČU v Plzni. K měření byl použit 3D souřadnicový stroj CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Všechna zkušební vahadla byla samostatně změřena ve vybraných bodech na horní a spodní straně. Prvotní měření slouží k ověření požadovaného tvaru po obrobení a zároveň jako výchozí hodnoty pro další měření po tepelném a chemicko-teplném zpracování funkčních ploch vahadel. Změřené body byly následně v dodávaném softwaru měřicího stroje porovnány s modelem vahadla ve formátu .stp. Protokol s modelem vahadla zobrazuje změřenou odchylku jednotlivých bodů vůči jmenovitému rozměru daného modelem součásti (viz příloha č. 5). Odchylky jednotlivých bodů byly na horních funkčních plochách okolo 0,04 mm, na spodní funkční ploše okolo 0,01 mm. Provedené měření však nezachycuje celkový geometrický tvar obrobených kusů.



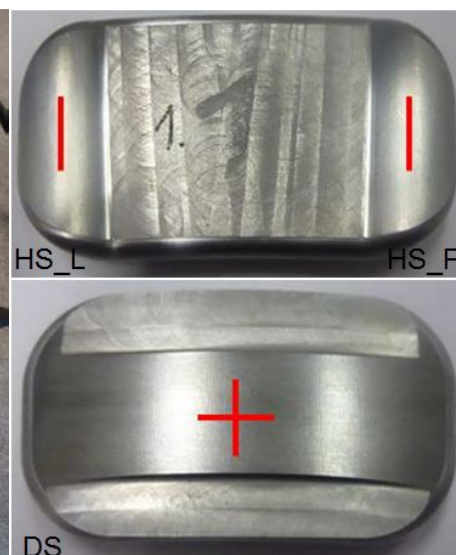
Obrázek 58-3 Zeiss Prismo Navigator [21]

3.3.3 Měření drsnosti funkčních ploch

Měření drsnosti funkčních ploch bylo provedeno pomocí přenosného drsnoměru Mitutoyo SJ-210. Následující obrázky zobrazují místa měření: horní strana vahadla na levém (HS_L) a pravém (HS_P) rádiu, dolní strana (DS) na válcové ploše ve dvou na sebe kolmých směrech. Výsledky ukazují dosažené hodnoty drsnosti v rozmezí Ra 0,1 až 0,9 μm . Horní funkční plochy byly dokončovány kulovou frézou a naměřené hodnoty drsnosti pozitivně přesahují hodnoty požadované. Parametry nastavení drsnoměru jsou zvoleny podle očekávané hodnoty drsnosti uvedené v příručce měřidla.



Obrázek 59-3 Měření drsnosti



Obrázek 60-3 Místa měření drsnosti

Měření drsnosti
Ra [μm]

Číslo měření

součást		1	2	průměr	3	4	průměr
vahadlo 1	HS_L	0,174	0,158	0,166			
	HS_P	0,266	0,120	0,193			
	DS	0,380	0,501	0,441	0,589	0,519	0,554
vahadlo 2	HS_L	0,233	0,113	0,173			
	HS_P	0,133	0,135	0,134			
	DS	0,406	0,505	0,456	0,850	0,931	0,891
vahadlo 3	HS_L	0,134	0,097	0,116			
	HS_P	0,105	0,109	0,107			
	DS	0,438	0,431	0,435	0,337	0,405	0,371
vahadlo 4	HS_L	0,102	0,084	0,093			
	HS_P	0,107	0,093	0,100			
	DS	0,398	0,387	0,393	0,767	0,867	0,817
vahadlo 5	HS_L	0,111	0,115	0,113			
	HS_P	0,117	0,129	0,123			
	DS	0,431	0,477	0,454	0,476	0,474	0,475

směr měření DS 1; 2 vertikálně

směr měření DS 3; 4 horizontálně

parametry nastavení drsnoměru Mitutoyo SJ-210 dle očekávané hodnoty drsnosti

Norma: JIS2001 měřicí dráha: $l = 4 \text{ mm}$ (1.; 2.)

mezní vlnová délka: $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ $l = 1,6 \text{ mm}$ (3.; 4.)

Tabulka 22-3 Měření drsnosti

3.3.4 Měření tvrdosti funkčních ploch

Měření tvrdosti po obrobení bylo provedeno pouze orientačně digitálním tvrdoměrem ETIPD v identických místech jako při měření drsnosti. Tvrdoměr je založen na dynamické (odrazové) metodě měření tvrdosti vyjádřené v jednotkách HL (Leeb). Jednotka HL je poté automaticky převedena do prakticky používaných stupnic (HB, HV, HRC) přímo samotným tvrdoměrem. Naměřené hodnoty tvrdosti dle Brinellovy stupnice na dně mezi rádiy horních funkčních ploch (označeno „dno FP“) mají největší vypovídající charakter, protože ostatní místa jsou zakřivená a pro takové měření je nutné použít dle výrobce podpůrný prsteneček. Výsledky na zakřiveném povrchu i přesto ukazují hodnoty nepatrně nižší než na rovném. V požadavcích na funkční plochy je tvrdost zadaná v běžněji udávané Rockwellově stupnici. Vzhledem k tomu, že Rockwellova stupnice se běžně používá od 20 HRC (asi 228 HB), nelze ji vyjádřit v této stupnici pro všechny testované vzorky. Z tohoto důvodu byla tvrdost vyjádřena v Brinellově stupnici. V návaznosti na další měření po tepelném a chemicko-tepelném zpracování se jako porovnávací hodnota použije pro zadaných 50 HRC ekvivalentní hodnota tvrdosti dle použité metody měření. [17]

Srovnávat hodnoty tvrdosti lze jen při použití stejné metody a stejného zkušebního zatížení. Převody hodnot tvrdosti podle různých metod jsou pouze orientační. Takové převody tvrdosti jsou možné jen na základě provedených porovnávacích zkoušek. Převod tvrdosti pro různé druhy materiálů a tepelného zpracování včetně stanovení nejistoty převodu je obsahem normy ČSN EN ISO 18265.

Měření tvrdosti
stupnice [HB]

součást		Číslo měření		průměr
		1	2	
vahadlo 1	HS_L	88	83	86
	HS_P	90	85	88
	DS	107	98	103
	dno FP	85	95	90
vahadlo 2	HS_L	132	127	130
	HS_P	123	130	127
	DS	145	175	160
	dno FP	155	166	161
vahadlo 3	HS_L	125	136	131
	HS_P	133	139	136
	DS	166	157	162
	dno FP	164	153	159
vahadlo 4	HS_L	187	176	182
	HS_P	163	172	168
	DS	229	249	239
	dno FP	229	229	229
vahadlo 5	HS_L	189	198	194
	HS_P	173	203	188
	DS	243	267	255
	dno FP	241	257	249

Tabulka 23-3 Měření tvrdosti (orientační)



Obrázek 61-3 Dílenský tvrdoměr ETIPD

Hodnoty naměřené a převedené do Brinellovy stupnice jsou pouze informativní. Pro celkové hodnocení nejsou důležité, a proto byla zvolena jednoduchá dílenská metoda měření digitálním tvrdoměrem.

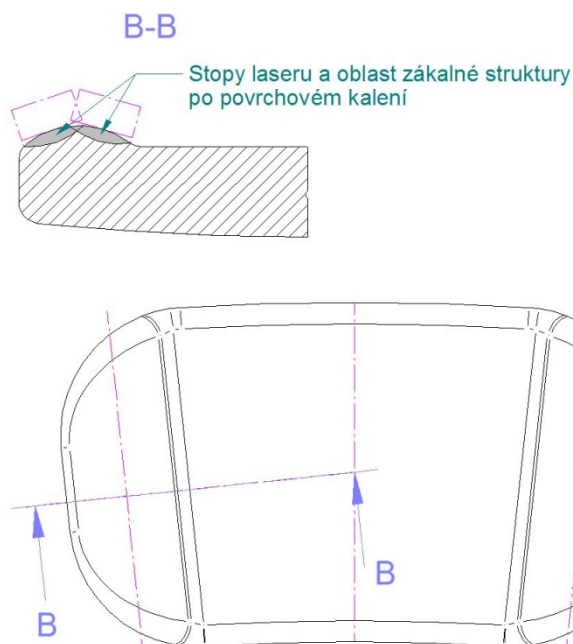
3.4 Tepelné a chemicko-tepelné zpracování

Laserové povrchové kalení

Zkušební vzorky:

- Vahadla číslo 1, 3 a 5

Tři zkušební vzorky byly na funkčních plochách laserově povrchově zakaleny do hloubky 0,35 mm. Materiály obsahují minimální požadovaný procentuální obsah uhlíku, který je nezbytný pro vytvoření zákalné struktury. Následující schéma zobrazuje v řezu stopy laserového paprsku a vzniklou zákalnou vrstvu horních rádií. Stopy laseru se navzdory teorii běžně překrývají. Tato skutečnost byla potvrzena právě u kooperované společnosti zabývající se laserovými technologiemi tepelného zpracování.



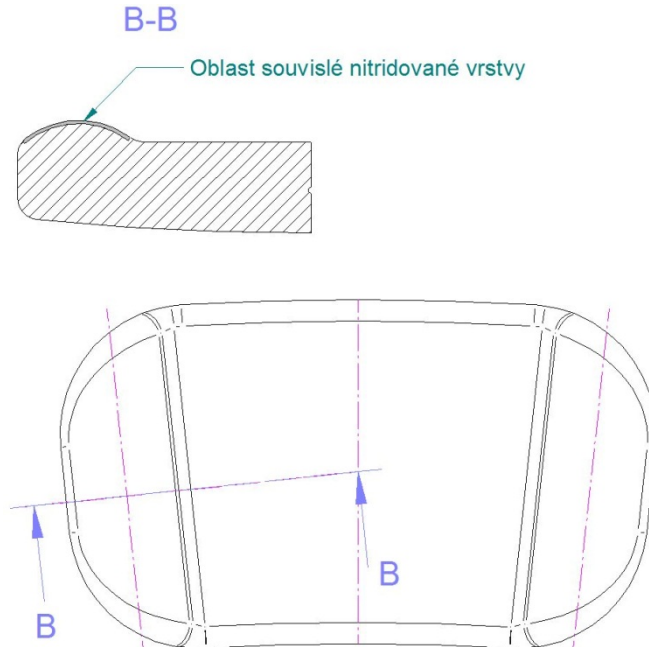
Obrázek 62-3 Laserové povrchové kalení

Nitridace v plynu

Zkušební vzorky:

- Vahadla číslo 2 a 4

Nitridace funkčních ploch byla provedena v atmosféře obsahující plynný amoniak po dobu 35 hodin na požadovanou hloubku 0,35 mm. Dosahovaná tvrdost povrchové vrstvy je umocněna primárně obsahem legujících prvků v oceli. Nitridovat lze obecně všechny druhy ocelí. Hloubka nitridované vrstvy není ve skutečnosti tak rovnoměrná, jak ukazuje obrázek. Nejvyšší tvrdosti je dosahováno na povrchu a směrem k jádru strmě klesá. Na plochy, které se nemají nitridovat, se aplikuje ochranný cínový nátěr proti nitridaci.



Obrázek 63-3 Nitridace

Vybrané způsoby tepelného a chemicko-tepelného zpracování nemají značně ovlivnit výchozí tvar součásti, a proto není ve výrobním postupu zkušebních vahadel zařazeno další strojní opracování již vzniklé tvrdé povrchové vrstvy. Z tohoto důvodu byly testované kusy obrobena bez přídavků na další zpracování.

3.5 Leštění funkčních ploch

Dokončovací operace ručním leštěním funkčních ploch po laserovém povrchovém kalení a nitridaci. Primárním úkolem je odstranit stopy po nástroji a tepelném zpracování. Leštěním nesmíme dopustit velkého úběru materiálu ani při použití super jemného rouna.

Pro ruční leštění byla použita rouna z netkané textilie:

- Korundové rouno o hrubosti P360
- Rouno z karbidu křemíku P400

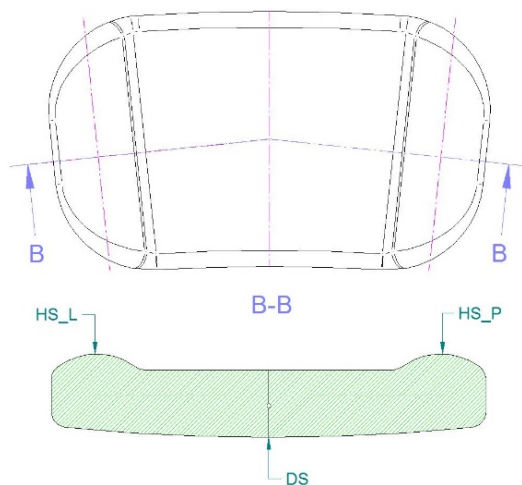
3.6 Závěrečná série měření

Závěrečná série měření zahrnuje opětovné měření výšky, geometrické přesnosti, drsnosti a tvrdosti. Získané údaje slouží jako podklady k procesnímu hodnocení jednotlivých variant. Tabulky s výsledky jsou uvedeny v příloze č.6.

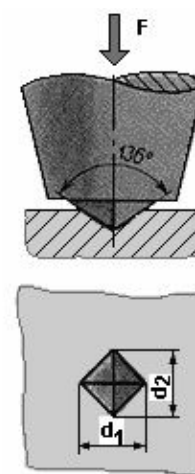
3.6.1 Měření tvrdosti

Tvrdost nitridovaných a povrchově zakalených funkčních ploch byla ověřena metodou měření tvrdosti podle Vickerse. Místa měření jsou vyznačena na obrázku níže.

Norma ČSN ISO 15787 stanovuje pro minimální hloubku tvrzené vrstvy a očekávanou povrchovou tvrdost nejvyšší dovolené zkušební zatížení. Pro hloubku vrstvy 0,3-0,4 mm s očekávanou hodnotou tvrdosti 500 až 600 HV je dle normy maximální dovolené zatížení 10 kp (98 N). Pro nitridované nebo nitrocementované vrstvy z vysocelegovaných ocelí je vhodné vzhledem ke gradientu tvrdosti v povrchové vrstvě použít zkušební zatížení nižší. [18]



Obrázek 64-3 Místa měření

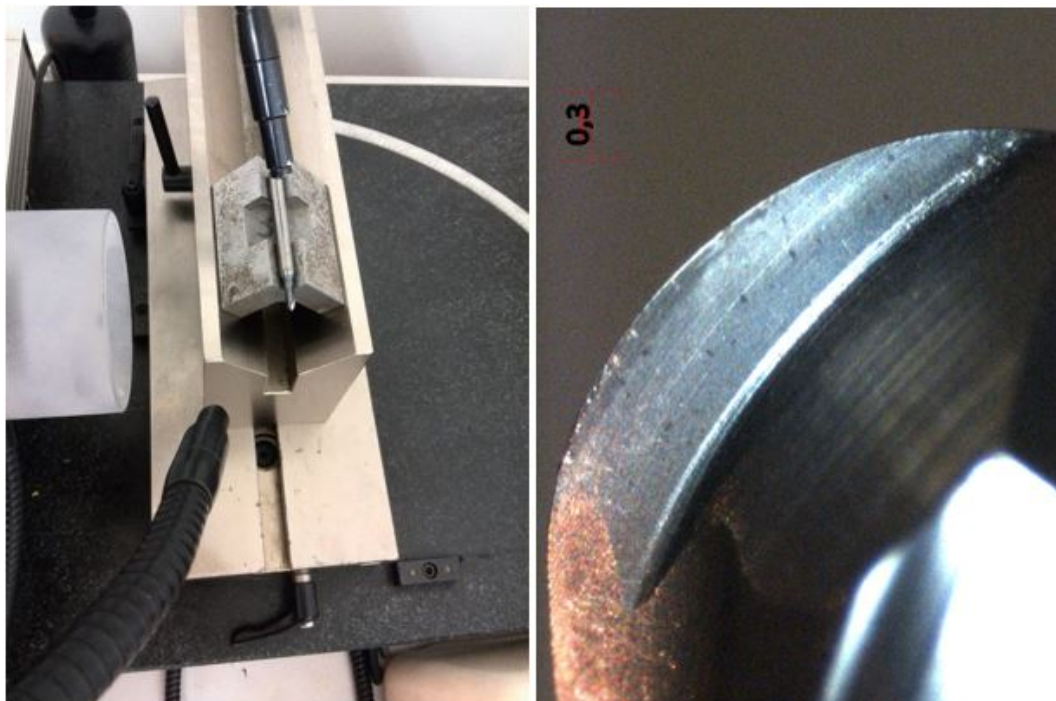


Obrázek 65-3 Indentor

3.6.2 Měření opotřebení klíčového nástroje

Součástí série měření bylo také zjištění opotřebení klíčového nástroje u vybraných variant pro jednotlivé druhy obráběných materiálů (pro každý materiál byl použit nový nástroj). Tři kulové frézy R2-2Z byly měřeny na mikroskopu BLICKLE s vyhodnocovacím softwarem. Postup měření je jednoduchý a uživatelsky velmi přívětivý. Nástroj se položí na prizma a nasvětlí pomocí připojených světel. Snímací kamera přenáší zvětšený obraz na monitor. V softwaru se jednoduchými křivkami znázorní hrana měřeného břitu nového neopotřebovaného nástroje. Takto připravená maska slouží pro vlastní měření opotřebovaných nástrojů.

Vzhledem k malému počtu obráběných zkušebních vahadel a s tím spojené krátké doby řezu nástrojů nebylo zjištěno na žádném čele výrazné opotřebení.



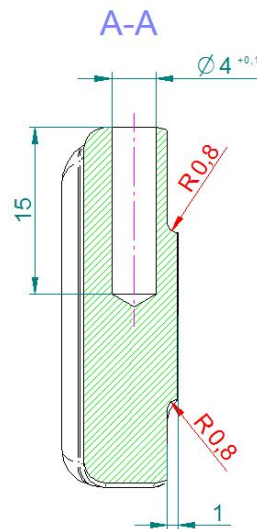
Obrázek 66-3 Měření opotřebení kulové frézy R2-2Z

4 Zpracování výsledků do celkové technologičnosti konstrukce

Prvotní posouzení technologičnosti konstrukce nemůže jednoznačně předvídat problémy, které nastanou při samotné výrobě. Z tohoto důvodu je vhodné posouzení znovu po výrobě prototypů. Pokud budeme uvažovat technologičnost konstrukce pro celé samo-vyvažovací ložisko, lze za dědičné součásti považovat axiální segmenty a trysky. Tyto součásti se vyrábějí standardně pro mnoho ložisek ve výrobním programu společnosti. Samotné tělo ložiska je svými parametry v první řadě závislé na zástavbových rozměrech stroje, od kterých se odvíjí rozměry samo-vyvažovacích elementů. Prostor pro vahadla je tedy vymezen mezikružím mezi vnitřním a vnějším průměrem ložiska. Horní část těla určená k ustavení kluzných axiálních segmentů je také pevně určena a nelze ji více upravovat.

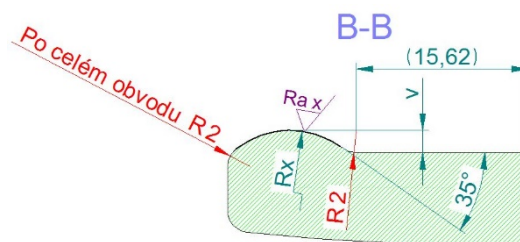
Vahadla

Vhodné úpravy pro zjednodušení procesu obrábění jsou zvýrazněny červeně na níže uvedených obrázcích vyjmutých z výkresu dolního vahadla (součástí přílohy). Navrhované změny designu vahadel nemůžou ovlivnit správnou funkci součásti.



Obrázek 67-3 Řez A-A

- Změna rádiu R0,8 na R1 z důvodu možnosti použití standardního nástroje – toroidní frézy se běžně nabízejí s rádií 1; 1,5; 2 mm.



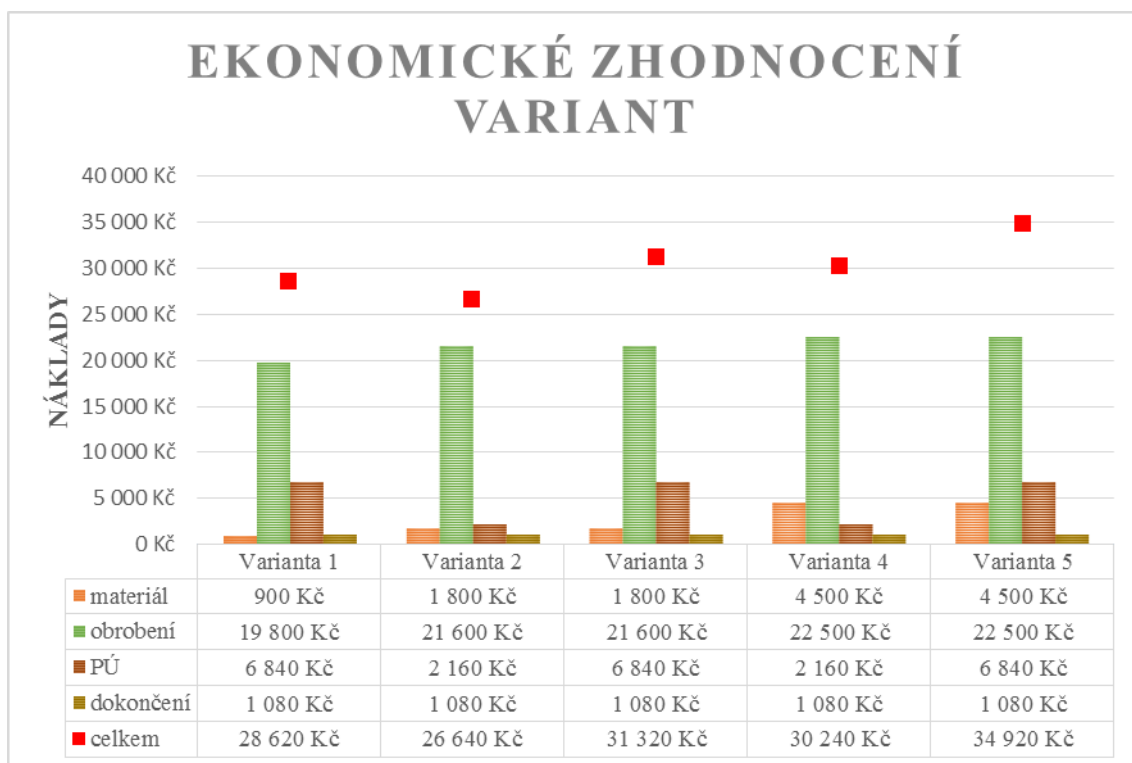
Obrázek 68-3 Řez B-B

- Změna zaoblení kontury R2 po obvodu na prosté sražení hrany 2x45° z důvodu snadnějšího opracování při použití standardní frézy na sražení hran.
- Napojení horních funkčních ploch se dnem mezi těmito plochami prostřednictvím rádiu zaoblení R2 není nutné zachovat. Důsledkem tohoto faktu může být nasazena jiná dokončovací strategie obrábění funkčních ploch. Jako příklad lze uvést možné nasazení čelní frézy s kruhovými vyměnitelnými břitovými destičkami nebo kulové frézy s větším rádiem .

5 Ekonomické a procesní zhodnocení řešení

5.1 Ekonomické zhodnocení

Následující kapitola poskytuje přehled o ekonomickém zatížení jednotlivých variant řešení. Varianty jsou vyhodnoceny pro sestavu dolních vahadel v počtu 18 kusů, tedy pro jedno ložisko.



Obrázek 69-5 Ekonomické zhodnocení variant

Celkové náklady pro jednotlivé varianty jsou vyznačeny červeně. Nitridace a laserové kalení je označeno jako PÚ. Z grafu je patrné, že nejvyšší náklady jsou na obrobení vahadel v kooperaci. Z hlediska ekonomického hodnocení zvítězila **varianta číslo 2 (nitridovaná vahadla z oceli třídy 15)**. Nízkou cenu materiálu a náklady na obrobení u varianty číslo 1 (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12) převyšší cena laserového kalení a variantu posune na druhé místo.

Polotovary

Zvolený rozměr polotovaru 62x37x16 mm byl poptán z níže uvedených typů nabízených polotovarů. Tepelné zpracování (šlechtění) u všech polotovarů zajišťuje dodavatel. Ploché tyče z materiálů ocel třídy 15 a ocel třídy 16 nejbližší požadovanému rozměru polotovaru oslovení dodavatelé nejsou schopni dodat.

- Ocel třídy 12 poptána z přesných výpalků z plechu P15 – 62x37 mm (plech P20 zbytečně navyšuje přídavek na opracování).
- Ocel třídy 15 a ocel třídy 16 poptána jako přířez z kovaných bloků na požadovaný rozměr 62x37x16 mm.

Obrobení v kooperaci

Ceny za kompletní obrobení součástí z různých materiálů jsou stanoveny dle aktuální nabídky kooperované společnosti. V současné době společnost neplánuje koupi nového strojního vybavení pro vlastní realizaci výroby vahadel ani jinak tvarově složitých součástí.

5.2 Procesní zhodnocení

Procesní zhodnocení zahrnuje jednotlivé dílčí měření drsnosti a tvrdosti funkčních ploch, dále pak odchylek od jmenovitého tvaru modelu a odchylek jmenovitého rozměru výšky vahadel. Tabulky s výsledky dílčích měření jsou uvedeny v příloze č.6.

Drsnost (Ra) funkčních ploch nebyla výrazně zhoršena. Rozdíly hodnot jsou pouze v řádu 0,01 μm .

Měřením tvrdosti u prvního nitridovaného vzorku (vahadlo č. 2) byla zjištěna výrazně nižší tvrdost než předpokládaná (až 600 HV). Možnou záměnu materiálu polotovaru však lze vyvrátit použitými řeznými podmínkami při obrábění a ověřujícím měřením tvrdosti po obrobení (viz kapitola 3.3.4 a 3.2). Pro úplné vyloučení možné záměny materiálu byla nitridace u vahadla č. 2 provedena znovu. Opětovné měření záměnu materiálu zcela vyvrátilo. Naměřené hodnoty tvrdosti na dolní funkční ploše (DS) a rovném odlehčení byly okolo 570 HV10. Pokles tvrdosti mohl být důsledkem předchozího stavu po tepelném zpracování polotovaru a stupni prokování, který má vliv na velikost zrna. Velikost zrna značně ovlivňuje difúzní proces. Vzniklá povrchová vrstva nitridů mohla být velmi slabá a možným nešetřeným způsobem leštění byla poté degradována. Pro ověření hloubky nitridované vrstvy by bylo vhodné provést měření průběhu tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

Vyhodnocení odchylek vahadel od jmenovitého tvaru modelu bylo provedeno pomocí funkce průměrná odchylka. Vahadla byla seřazena podle nejmenších odchylek a výsledné zhodnocení bylo omezeno pouze na jednotlivé použité technologie nitridace a laserového povrchového kalení. Nitridovaná vahadla dosáhla menších odchylek.

Procesní zhodnocení bylo provedeno metodou bodovací a metodou váženého součtu.

Pro obě metody byla použita níže uvedená kritéria:

- K1 (celková cena vybrané varianty uvedená v ekonomickém zhodnocení)
- K2 (změny odchylek bodů od jmenovitého tvaru modelu)
- K3 (tvrdost funkčních ploch)
- K4 (doba procesu)

Dobou procesu je myšlen proces od nákupu materiálu po hotovou součást. Délka procesu u variant 1, 2 a 4 je 6 týdnů; u variant 3 a 5 je 7 týdnů.

- K5 (třída obrobiteľnosti materiálu podle ČSN)

Stanovení vah jednotlivých kritérií bylo provedeno pomocí metody pořadí podle dvou níže uvedených preferencí kritérií. Preference kritérií pro stanovení vah A upřednostňuje celkovou cenu. Druhá varianta upřednostňuje tvrdost funkčních ploch. [19]

A

Preference kritérií:

$$K1 > K3 > K2 > K5 > K4$$

Stanovení vah kritérií		A
pořadí kritérií	body	váha
K1	5	0,33
K3	4	0,27
K2	3	0,20
K5	2	0,13
K4	1	0,07
Celkem	15	

Tabulka 24-5 Stanovení vah preference kritérií A

B

Preference kritérií:

$$K3 > K1 > K2 > K5 > K4$$

Stanovení vah kritérií		B
pořadí kritérií	body	váha
K3	5	0,33
K1	4	0,27
K2	3	0,20
K5	2	0,13
K4	1	0,07
Celkem	15	

Tabulka 25-5 Stanovení vah preference kritérií B

Jednotlivé váhy pro obě hodnotící metody jsou vypočteny podle níže uvedeného vzorce [19] :

$$váha_j = \frac{body_j}{\frac{n(n+1)}{2}} ; j = 1, 2, \dots, n ; n = \text{počet kritérií}; j = \text{číslo kritéria}$$

Pro vyhodnocení jsou použita maximalizační kritéria. Nejlepší varianta z hlediska procesního zhodnocení bude s nejvyšší hodnotou celkových bodů (resp. funkce užitku).

5.2.1 Bodovací metoda

Bodovací metoda představuje jednoduché vyhodnocení podle přiřazených bodů jednotlivým variantám (vahadlům 1 až 5). V porovnání s další použitou metodou váženého součtu nezachycuje změny výsledných hodnot jednotlivých kritérií. Váhy kritérií jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 24-5 a 25-5). [19]

Bodovací stupnice kritérií

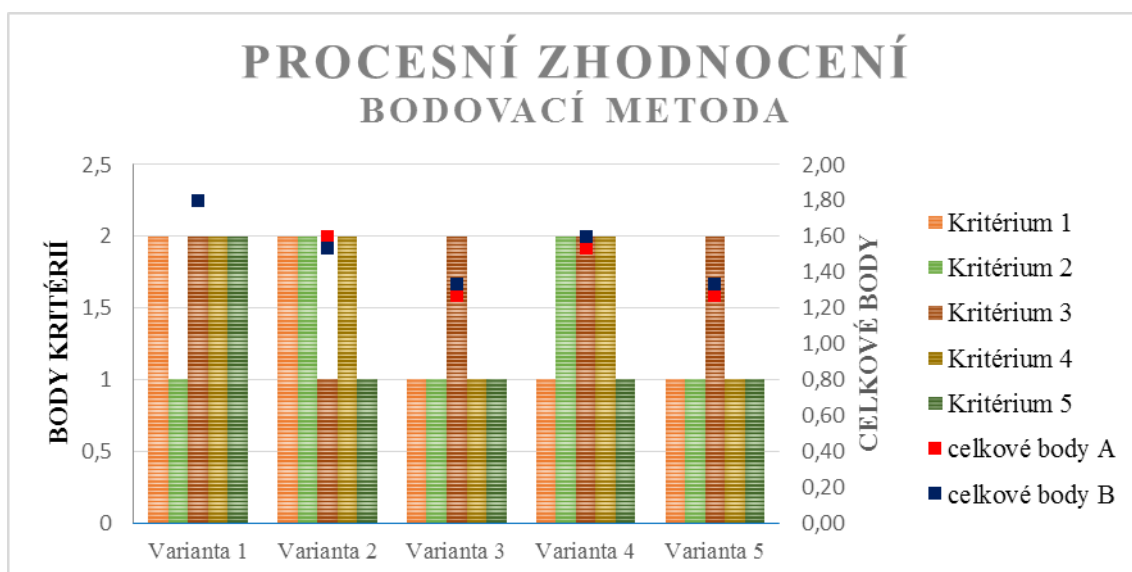
body	cena K1	odchylky K2	tvrdost K3	čas procesu K4	obrobitelnost K5
1	30 tis. Kč a více	velké	méně než 600 HV (včetně)	více než 6 týdnů	1b - 11b
2	méně než 30 tis. Kč (včetně)	malé	více než 600 HV	méně než 6 týdnů (včetně)	12b - 20 b

Tabulka 26-5 Bodovací stupnice kritérií

Bodovací metoda

Varianta	Kritérium					váhy A		váhy B	
	K1	K2	K3	K4	K5	body	pořadí	body	pořadí
Varianta 1	2	1	2	2	2	1,80	1.	1,80	1.
Varianta 2	2	2	1	2	1	1,60	2.	1,53	3.
Varianta 3	1	1	2	1	1	1,27	4.	1,33	4.
Varianta 4	1	2	2	2	1	1,53	3.	1,60	2.
Varianta 5	1	1	2	1	1	1,27	4.	1,33	4.

Tabulka 27-5 Bodovací metoda



Obrázek 70-5 Procesní zhodnocení – bodovací metoda

Nejllepší varianta stanovená pomocí bodovací metody při preferenci ceny i tvrdosti funkčních ploch je **varianta číslo 1** (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12). Na čtvrtém místě se umístily dvě varianty (číslo 3 a 5).

Tento materiál má dobré předpoklady pro splnění požadavků na funkční plochy. Zvolené kritéria pro hodnocení jsou ovšem velmi obecná a pro splnění například tvrdosti funkčních ploch stačí pouze procentuální obsah uhlíku v oceli. Pro nasazení této varianty do sériové výroby bude vhodné podložit zvolené řešení dalšími detailními testy. Pokud budou mít tyto testy uspokojivé výsledky, není nutné používat drahé, těžko obrobitelné materiály.

5.2.2 Metoda váženého součtu

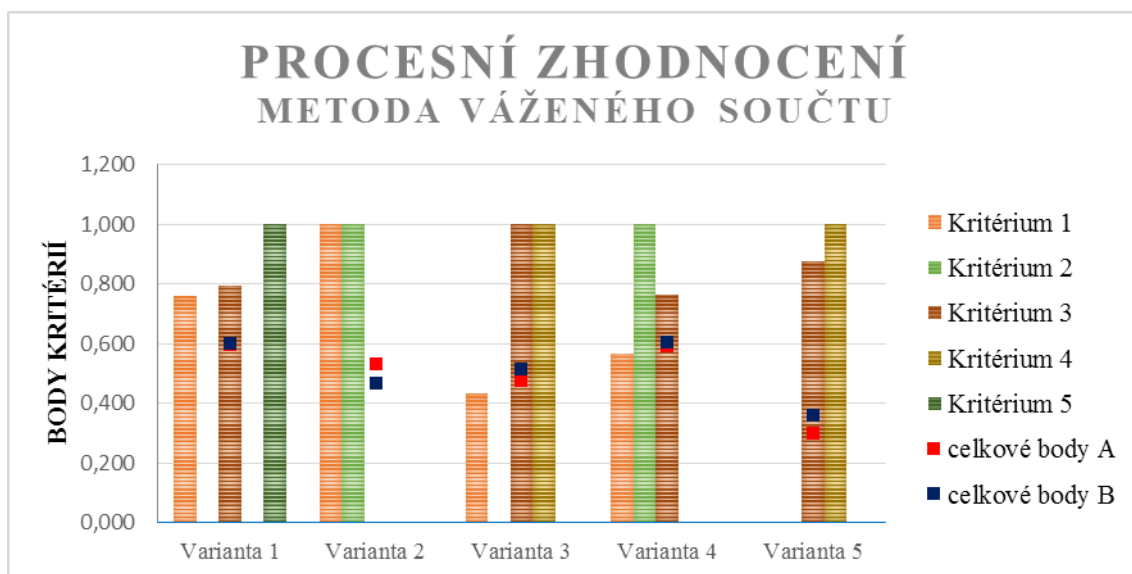
Metoda váženého součtu zohledňuje různé bodovací stupnice pro každé kritérium. Lze tedy použít body nebo přímo hodnoty tvrdosti, cen, počtu týdnů atd. jednotlivých variant. Tato metoda je důvěryhodnější než metoda bodovací, neboť lépe zachycuje změny výsledných hodnot jednotlivých kritérií. Podrobný popis této metody je uveden v příloze číslo 8. Váhy kritérií jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 24-5 a 25-5).

Metoda váženého součtu

Varianta	Kritérium					váhy A		váhy B	
	K1	K2	K3	K4	K5	u(Ai)	pořadí	u(Ai)	pořadí
Varianta 1	0,761	0,000	0,794	0,000	1,000	0,599	1.	0,601	2.
Varianta 2	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,533	3.	0,467	4.
Varianta 3	0,435	0,000	1,000	1,000	0,000	0,478	4.	0,516	3.
Varianta 4	0,565	1,000	0,765	0,000	0,000	0,593	2.	0,606	1.
Varianta 5	0,000	0,000	0,877	1,000	0,000	0,300	5.	0,359	5.

u(Ai) = agregovaná funkce užitku

Tabulka 28-5 Metoda váženého součtu



Obrázek 71-5 Procesní zhodnocení – metoda váženého součtu

Nejlepší varianta stanovená pomocí metody váženého součtu při preferenci ceny je **varianta číslo 1** (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12). Při preferenci tvrdosti funkčních ploch vyhrála **varianta číslo 4** (nitridovaná vahadla z oceli třídy 16). Výsledné hodnoty prvních dvou pozic pro stanovení pořadí jsou si velice podobné. Tento fakt může být způsoben právě detailnějším zhodnocením výsledků jednotlivých kritérií. Pokud srovnáme první dvě pozice pořadí obou preferencí je patrná záměna jejich pořadí.

Výsledné hodnocení prvních dvou pozic pořadí s přihlédnutím k metodě bodovací lze stanovit následovně :

1. **Varianta 1 (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12)**
2. **Varianta 4 (nitridovaná vahadla z oceli třídy 16)**

Závěr

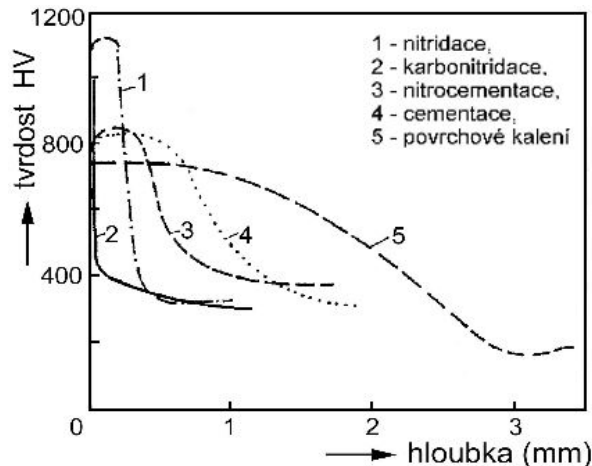
Cílem diplomové práce bylo navrhnout a ověřit různé technologie výroby klíčových komponent samo-vyrovnávacího axiálního segmentového ložiska vyvíjeného společností GTW Bearings s.r.o. Ložisko je v současné době ve fázi vývoje různých druhů naklápěcích elementů, které jsou hlavním prvkem celého funkčního principu samotného ložiska.

V první části práce je krátce představena společnost s návazností na historii samo-vyrovnávacích axiálních ložisek včetně jejich stručného popisu funkčního principu a použití v průmyslových zařízeních. Dále práce obsahuje současné výrobní možnosti jednotlivých dílů ložiska, které je společnost schopna realizovat na svém strojním vybavení. Klíčové komponenty však v požadované kvalitě nyní produkovat neumožňuje.

Druhá část se již zabývá pouze vybranými klíčovými komponentami nazývané vahadla (resp. dolní vahadla). Po teoretickém představení technologií vhodných pro splnění požadavků na funkční plochy vahadel následuje návrh a praktické ověření vybraných technologií. Bylo vyrobeno pět kusů zkušebních vzorků ze třech různých materiálů (ocel třídy 12, 15 a 16) na pětiosém CNC frézovacím centru. Řezné podmínky byly zvoleny dle doporučených katalogových hodnot jednotlivých výrobců nástrojů a upraveny při samotném obrábění zkušebních vahadel. Tyto hodnoty nelze považovat za optimální pro zvolenou technologii obrábění a použitý materiál, ale lze je považovat za odrazový můstek pro další optimalizaci výroby. Obrobené kusy se dále laserově povrchově zakalily, nebo nitridovaly na funkčních plochách. V nejbližší době bude také ověřena technologie laserového navařování funkčních ploch vahadel. Vzhledem k časovému rámci této diplomové práce nemohla být tato metoda experimentálně ověřena. Výrobní postup je doprovázen sérií ověřujících měření pro závěrečné ekonomické a procesní zhodnocení.

Nejlepší varianta z hlediska procesního a ekonomického hodnocení je **varianta číslo 1 (laserově povrchově kalená vahadla z oceli třídy 12)**. Na druhém místě se umístila **varianta číslo 4 (nitridovaná vahadla z oceli třídy 16)**. Na základě procesního zhodnocení v této diplomové práci budou vybrané varianty 1 a 4 dále testovány a optimalizovány. Jedna z těchto variant bude použita pro výrobu vahadel, které budou součástí prvního komerčně dodávaného axiálního samovyrovňovacího ložiska pro experimentální turbínu TG 10 společnosti Doosan Škoda Power s.r.o. . Dodací termín ložiska je v červenci tohoto roku (tj. 2016).

Měření prováděná v této diplomové práci poskytují základní přehled o problematice výroby klíčových komponent. Před konečným zavedením výroby těchto komponent samo-vyrovnávacího ložiska bude vhodné provést další tribologické zkoušky pro ověření požadovaných výstupů kladených na funkční plochy vahadel. Hloubka zpevněné vrstvy funkčních ploch je založena na důvěryhodnosti dodavatele nitridace a laserového povrchového kalení. K získání skutečného průběhu tvrdosti bude dále proveden podélný řez vahadlem a metalografický výbrus pro zvolenou metodu měření. Průběh tvrdosti v závislosti na hloubce je nutné ověřit převážně u nitridovaných vzorků, kde je tento průběh obecně různě strmý u různých materiálů. V rámci diplomové práce nebylo možné toto měření realizovat z finančních důvodů.



Obrázek 72-5 Obecný průběh tvrdosti materiálu po různých metodách TZ a CHTZ [5]

Literatura a odkazy

Seznam odborné literatury a zdrojů

1. GTW Bearings s.r.o. [Online] [Citace: 5. září 2015.] <http://www.gtw.cz>.
2. Google patenty. [Online] [Citace: 5. září 2015.]
Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US2110464>.
3. Waukesha Bearings. [Online] [Citace: 5. září 2015.]
<http://www.waukbearing.com/en/engineered-fluid-film/product-lines/thrust-bearings/>.
4. Pioneer Motor Bearing Inc. [Online] [Citace: 15. září 2015.] <http://www.pioneer1.com>.
5. **DAĐOUREK, Karel.** *Vybrané technologie povrchových úprav.* [prezentace] 2006.
[Citace: 11. leden 2016]. Dostupné z:
http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/09nitridace.pdf.
6. **RÁDL, Karel.** *Chemicko-tepelné zpracování tenkých vrstev.* KMM, ZČU v Plzni, Fakulta strojní. 2015. Bakalářská práce.
7. **BAŠEK, Ondřej.** *Mobilní zařízení pro povrchové kalení.* Ústav konstruování, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2010. Diplomová práce. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/16348/2010_DP_Basek_Ondrej_76308.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
8. **DAĐOUREK, Karel.** *Povrchové kalení.* [prezentace] 2007. [Citace: 11. leden 2016].
Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ/ttz%20Dad/povrkal.pdf.
9. Ústav materiálového inženýrství ČVUT. *projektn.* [Online] [Citace: 1. březen 2016.]
<http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/>.
10. **BUKÁČEK, Zdeněk.** *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břítu.* Ústav konstruování, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2009.
Diplomová práce. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18708.
11. **VIČAR, David.** *Moderní dokončovací metody obrábění a jejich využití.* Ústav konstruování, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2011. Bakalářská práce.
Dostupné z:
<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/373/Vi%C4%8Dar%20D.%20Modern%C3%AD%20dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20metody%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20a%20jejich%20vyu%C5%BEit%C3%AD.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
12. **FIEDLER, Lukáš.** *Vliv parametrů laserového navařování na korozní vlastnosti návaru.* KMM, ZČU v Plzni, Fakulta strojní. 2014. Diplomová práce.
13. Hermle AG. [Online] [Citace: 25. březen 2016.] <http://www.hermle.cz>.
14. ISCAR ČR s.r.o. [Online] [Citace: 26. březen 2016.] <http://www.iscar.cz>.
15. Hoffmann Group. [Online] [Citace: 18. březen 2016.] <https://www.hoffmann-group.com>.
16. SCT Tools. [Online] [Citace: 26. březen 2016.] <http://www.sct-tools.com>.
17. Proinex Instruments, s.r.o. [Online] [Citace: 15. duben 2016.]
<http://www.merenivrdosti.cz>.
18. Technická dokumentace - Tepelné zpracování součástí z železných kovů - Označování na výkresech. Praha : Český normalizační institut, 2003. 013146.
19. Ekonomická fakulta JČU. *Vícekritériální rozhodování za jistoty.* [Online]
[Citace: 5. květen 2016.]
Dostupné z: <http://www2.ef.jcu.cz/~jfrieb/tspp/data/teorie/Vicekritko.pdf>.
20. Bohdan Bolzano s.r.o. [Online] [Citace: 5. únor 2016.] <http://www.bolzano.cz>.
21. Zeiss Česká republika. [Online] [Citace: 31. březen 2016.] <http://www.zeiss.cz>.

Seznam příloh

Příloha č.1 : Vlastnosti oceli třídy 12

Příloha č.2 : Vlastnosti oceli třídy 15

Příloha č.3 : Vlastnosti oceli třídy 16

Příloha č.4 : Katalog použitých nástrojů

Příloha č.5 : Protokol měření porovnání bodů s modelem

Příloha č.6 : Tabulky vyhodnocení měření

Příloha č.7 : Obrazová příloha

Příloha č.8 : Metoda váženého součtu

Příloha č.1

Vlastnosti oceli třídy 12

Přehled vlastností oceli																		
Druh oceli	Nelegovaná ušlechtlá ocel k zušlechťování																	
TDP																		
Dřívější označení																		
Použití	Často používaná nelegovaná ocel pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechťeném nebo normalizačně žíhaném. Optimálních mechanických hodnot včetně houževnatosti se dosahuje v zakaleném a následně popuštěném stavu. U tvarově složitějších dílů se pro zamezení vzniku trhlin dává přednost kalení do oleje. Ocel je vhodná i k povrchovému kalení plamenem nebo indukci.																	
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)																		
Složení hotového výrobku ¹⁾																		
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ²⁾	Průměr mm	R _e min. MPa	R _m MPa	A min. %	Z min. %	KV min. J												
	d ≤ 16	490	700-850	14	35	-												
	16 < d ≤ 40	430	650-800	16	40	25												
Mechanické vlastnosti ve stavu normalizačně žíhaném ³⁾	d ≤ 16	340	min. 620	14	-	-												
	16 < d ≤ 100	305	580	16	-	-												
	100 < d ≤ 250	275	560	16	-	-												
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (+S)				Žíháno na měkko (+A)				Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)									
	HB max. 255				HB max. 207				HRC min. 55									
Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušebního tělesa v mm																	
	Tvrdost v HRC																	
		Mez	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25	30
	+H	max	62	61	61	60	57	51	44	37	34	33	32	31	30	-	-	-
		min	55	51	37	30	28	27	26	25	24	23	22	21	20	-	-	-
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 10 mm)</p> <p>Tvrdość v HRC</p> <p>Teplota popuštění st. C</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Křivky prokalitelnosti</p> <p>Tvrdość v HRC</p> <p>Vzdálenost od plochy kaleného čela v mm</p> </div> </div>																		
Technologické vlastnosti																		
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1150 až 850 °C																	
Tepelné zpracování	Normalizační žíhání °C	Žíhání na měkko °C	Isotermické žíhání °C	Teplota kalení °C	Kalici prostředí	Teplota popuštění °C	Zkouška kalením čela °C											
	840 až 880	650 až 700	800 až 950 660 -1 hod.	820 až 860	voda nebo olej	550 až 660	850 ± 5											
	Uvedené podmínky jsou doporučeny s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokalitelnosti.) Teplota kalení při spodní hranici se doporučuje pro kalení do vody a při horní hranici při kalení do oleje. Jako kalici prostředí lze použít i syntetické kapaliny-emulze.																	
Obrobitelnost	Obrobitelnost třískovým obráběním může být ve stavu po válcování ztížená vlivem zvýšené pevnosti. Pro obrábění je výhodnější stav žíhaný na měkko. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel se zvýšeným obsahem S.																	
Stříhatelnost	Přichází v úvahu např. při dělení tyčí na vsázkové délky pro zápuštěkové kování. Ocel C45 je stříhatelná za studena i ve stavu po válcování u průměru nad 80 mm.																	
¹⁾ obsah síry u oceli je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %. ²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně. ³⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení popř. normalizačním žíhání) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP. R _e –mez kluzu, R _m – pevnost v tahu, A – tažnost (požáteční délka L ₀ = 5,65√S ₀), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty). ⁴⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.																		

[20]

Příloha č.2

Vlastnosti oceli třídy 15

Přehled vlastností oceli																	
Druh oceli	Nizkolegovaná ušlechtlá chrom - molybdenová ocel k zušlechťování																
TDP	ČSN EN 10083-3: 2007																
Dřívejší označení																	
Použití	Ocel s vyšší prokalitelností pro výše namáhané strojní díly. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Do průměru 100 mm lze po zušlechťení docílit pevnosti nad 1000 MPa při ještě dostatečné houževnatosti. Není náchylná k popouštění křehkosti. Kalí se do méně razantního kalicího prostředí, poněvadž je náchylná ke vzniku kalických trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení. Patří k nejčastěji používaným ocelím k zušlechťování.																
Chemické složení v hmot. % (rozbor tavby)																	
Složení hotového výrobku ²⁾																	
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ³⁾	Průměr mm	R _e min. MPa	R _m MPa	A min. %	Z min. %	KV min. J											
	d ≤ 16	900	1100 - 1300	10	40	-											
	16 < d ≤ 40	750	1000 - 1200	11	45	35											
	40 < d ≤ 100	650	900 - 1100	12	50	35											
	100 < d ≤ 160	550	800 - 950	13	50	35											
160 < d ≤ 250	500	750 - 900	14	55	35												
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost	Žháno na měkko			Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)												
	HB max. 255	HB max. 241 (23 HRC)			HRC min. 53												
Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušební tělesa v mm																
	Tvrdost v HRC																
	⁵⁾ Mez	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50	
	+H	max.	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47	46	45
		min.	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30	29	29
	+HH	max.	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47	46	45
		min.	56	56	55	54	52	48	46	44	41	39	38	36	36	35	34
	+HL	max.	58	58	58	57	56	54	53	51	49	46	44	42	41	40	40
		min.	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30	29	29

Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 30 mm)

Křivky prokalitelnosti

Technologické vlastnosti						
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1100 až 850 °C					
Teplné zpracování	Normalizační žhání °C	Žhání na měkko °C	Isotermické žhání °C	Teplota kalení °C	Kalící prostředí	Teplota popouštění °C
	850 až 880	680 až 720	800 až 900 670 - 3 hod.	820 až 860	olej nebo voda	540 až 680
	Uvedené podmínky jsou doporučeny s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokal.) Jako kalící prostředí se s ohledem na náchylnost ke kalickým trhlinám doporučují syntetické polymery a olej. K docílení rovnoměrných hodnot po zušlechťení u větších průměrů (zejména kovaných) přispívá normalizační žhání před zušlechťením. Body přeměry : A _{c1} = 745°C, A _{c2} = 790°C, M _s = 300°C					
Obrobitelnost	Obrábí se ve stavu žháném na měkko. Při nižších pevnostech lze obrábět i ve stavu zušlechťeném. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel i se zvýšeným obsahem S. Díly, které se zušlechťují na vyšší pevnost se nejprve předhrubují ve stavu žháném a dokončí po zušlechťení.					
Stříhatelnost	Pro docílení tvrdosti vhodné pro stříhání se ocel žhává nebo řízeně vychlazuje.					

¹⁾ obsah síry u oceli : I je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %.

²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně.

³⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žháném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP.
R_e – mez kluzu, R_m – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční délka L₀ = 5,65√S₀), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty).

⁴⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.

⁵⁾ +H – normální hodnoty pro celý pás prokalitelnosti, +HH - zúžený pás prokalitelnosti směrem k horní hranici, +HL – zúžený pás prokalitelnosti směrem ke spodní hranici.

Příloha č.3

Vlastnosti oceli třídy 16

Přehled vlastnosti oceli :																	
Druh oceli	Sředně legovaná ušlechtlá chrom – niki - molybdenová ocel k zušlechťování																
TDP	CSN EN 10083-3: 2007																
Dřívější označení																	
Použití	Ocel s vysokou prokalitelností pro vysoce namáhané strojní díly. V zušlechťeném stavu má velmi příznivý poměr pevnosti k mezi kluzu a vysokou houževnatost. Vysoká houževnatost brzdí šíření únavových trhlin. Ocel se proto vyznačuje vysokými hodnotami meze únavy při střídavém a kombinovaném způsobu namáhání. Není náchylná k popouštění křehkosti. Kalí se převážně do oleje nebo do roztoků syntetických polymerů.																
Chemické složení v hmot. % (rozbor tavby)																	
Složení hotového výrobku ¹⁾																	
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ²⁾	Průměr mm	R_m min. MPa	R_m MPa	A min. %	Z min. %	KV min. J											
	$d \leq 16$	1000	1200 - 1400	9	40	-											
	$16 < d \leq 40$	900	1100 - 1300	10	45	45											
	$40 < d \leq 100$	800	1000 - 1200	11	50	45											
	$100 < d \leq 160$	700	900 - 1100	12	55	45											
	$160 < d \leq 250$	600	800 - 950	13	55	45											
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost			Žíhaný na měkko													
	Doporučuje se stav žíhaný na měkko			HB max. 248 (24 HRC)													
Prokalitelnost ³⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušební tělesa v mm																
	Tvrdost v HRC																
	+H	Mez	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
		max.	58	58	58	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
	min.	50	50	50	50	49	48	48	48	48	47	47	47	46	45	44	44
	+HH	max.	58	58	58	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
		min.	53	53	53	53	52	51	51	51	51	50	50	50	49	48	48
	+HL	max.	55	55	55	55	54	54	54	54	54	54	54	53	53	53	53
		min.	50	50	50	50	49	48	48	48	48	47	47	46	45	44	44

Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 60 mm)

Křivky prokalitelnosti

Technologické vlastnosti						
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1100 až 900 °C					
Teplné zpracování	Normalizační žíhání °C	Žíhání na měkko °C	Isotermické žíhání °C	Teplota kalení °C	Kalící prostředí	Teplota popouštění °C
	850 až 870	680 až 700	800 až 900 650 - 3 hod.	830 až 860	olej	540 až 660
	Uvedené podmínky jsou doporučeny s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokal.) K docílení rovnoměrných hodnot po zušlechťení u větších průměrů (zejména kovaných) přispívá normalizační žíhání před zušlechťením. Jako kalícího prostředí lze použít i roztoků syntetických polymerů. Body přeměny : $A_c1 = 740^\circ\text{C}$, $A_c2 = 790^\circ\text{C}$, $M_s = 330^\circ\text{C}$					
Obrobitelnost	Obrábí se ve stavu žíhaném na měkko. Díly, které se zušlechťují se nejprve předhrubují ve stavu žíhaném a dokončí po zušlechťení. Vlivem vyšší houževnatosti je obrábění ztíženo.					
Sřihatelnost	Sřihatelnost je ztížena vlivem vysoké houževnatosti i ve stavu žíhaném.					

¹⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP. R_m – mez kluzu, R_m – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční délka $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% střední hodnoty).

²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně.

³⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.

⁴⁾ +H – normální hodnoty pro celý pás prokalitelnosti, +HH - zúžený pás prokalitelnosti směrem k horní hranici, +HL – zúžený pás směrem ke spodní hranici.

Příloha č.4

Katalog použitých nástrojů



2 flute ball nose; 30° helix; SCT norm; long reach; AlCrN coated
Radiusfräser 2 Schneiden; 30° Drallwinkel; SCT Norm; abgesetzter Schaft; AlCrN beschichtet

Specifications / Spezifikationen



DIN 6535 HA	DIN 6535 HB	Dc	Ds	Lc	Ln	Dn	Lt	r	z
PLSC2X02030B	PLSW2X02030B	2,0	6	3	7	1,9	62	1,0	2
PLSC2X03030B	PLSW2X03030B	3,0	6	4	9,5	2,8	62	1,5	2
PLSC2X04030B	PLSW2X04030B	4,0	6	5	12	4,8	62	2,0	2
PLSC2X05030B	PLSW2X05030B	5,0	6	6	14,5	4,8	80	2,5	2
PLSC2X06030B	PLSW2X06030B	6,0	6	7	17	5,7	80	3,0	2
PLSC2X08030B	PLSW2X08030B	8,0	8	9	22	7,6	90	4,0	2
PLSC2X10030B	PLSW2X10030B	10,0	10	11	27	9,5	100	5,0	2
PLSC2X12030B	PLSW2X12030B	12,0	12	13	32	11,5	120	6,0	2
PLSC2X14030B	PLSW2X14030B	14,0	14	15	37	13,5	120	7,0	2
PLSC2X16030B	PLSW2X16030B	16,0	16	17	42	15,5	140	8,0	2
PLSC2X18030B	PLSW2X18030B	18,0	18	19	47	17,5	140	9,0	2
PLSC2X20030B	PLSW2X20030B	20,0	20	21	52	19,5	160	10,0	2



[16]



Multi flute torical end mill; 50°-35° helix; SCT norm; long reach; AlCrN coated
 Torusfräser multi Schneiden; 50°-35° Drallwinkel; SCT Norm; lange Ausführung; AlCrN beschichtet

Specifications / Spezifikationen



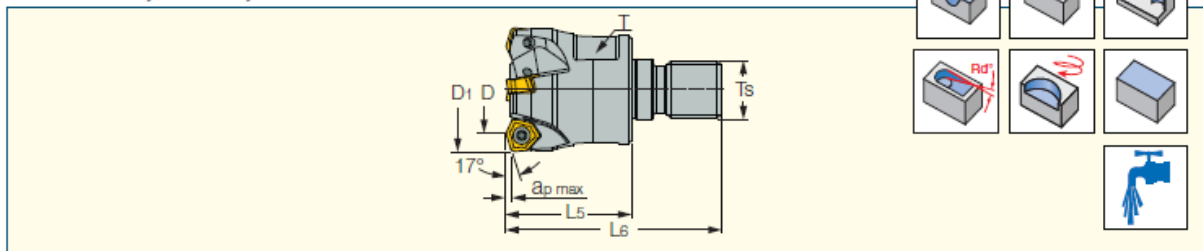
DIN 6535 HA	DIN 6535 HB	Dc	Ds	Lc	Ln	Dn	Lt	r	z
PLSC6X06050T05	PLSW6X06050T05	6,0	6	13	-	-	62	0,5	6
PLSC6X06050T10	PLSW6X06050T10	6,0	6	13	-	-	62	1,0	6
PLSC6X08050T05	PLSW6X08050T05	8,0	8	19	-	-	68	0,5	6
PLSC6X08050T10	PLSW6X08050T10	8,0	8	19	-	-	68	1,0	6
PLSC6X10050T05	PLSW6X10050T05	10,0	10	22	-	-	80	0,5	6
PLSC6X10050T10	PLSW6X10050T10	10,0	10	22	-	-	80	1,0	6
PLSC6X10050T15	PLSW6X10050T15	10,0	10	22	-	-	80	1,5	6
PLSC6X10050T20	PLSW6X10050T20	10,0	10	22	-	-	80	2,0	6
PLSC6X12050T05	PLSW6X12050T05	12,0	12	26	-	-	93	0,5	6
PLSC6X12050T10	PLSW6X12050T10	12,0	12	26	-	-	93	1,0	6
PLSC6X12050T15	PLSW6X12050T15	12,0	12	26	-	-	93	1,5	6
PLSC6X12050T20	PLSW6X12050T20	12,0	12	26	-	-	93	2,0	6
PLSC6X16050T05	PLSW6X16050T05	16,0	16	32	-	-	108	0,5	6
PLSC6X16050T10	PLSW6X16050T10	16,0	16	32	-	-	108	1,0	6
PLSC6X16050T15	PLSW6X16050T15	16,0	16	32	-	-	108	1,5	6
PLSC6X16050T20	PLSW6X16050T20	16,0	16	32	-	-	108	2,0	6
PLSC8X20050T05	PLSW8X20050T05	20,0	20	38	-	-	126	0,5	8
PLSC8X20050T10	PLSW8X20050T10	20,0	20	38	-	-	126	1,0	8
PLSC8X20050T15	PLSW8X20050T15	20,0	20	38	-	-	126	1,5	8
PLSC8X20050T20	PLSW8X20050T20	20,0	20	38	-	-	126	2,0	8



[16]

FF EWX-M-05

Rychloposuvové frézy s adaptérem FLEXFIT a oboustrannými 6 břitými destičkami

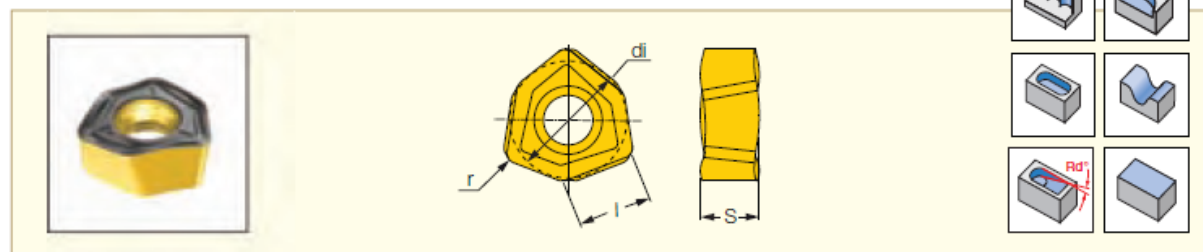


Označení	D1	D	Břítů	ap max	L5	L6	Ts	Rd°	Kg	T ⁽¹⁾
FF EWX D25-3-M12-05	25.0	15.00	3	1.00	30.00	52.00	M12	5.0	0.09	19.0
FF EWX D32-4-M16-05	32.0	22.00	4	1.00	35.00	60.00	M16	4.0	0.17	25.0
FF EWX D35-4-M16-05	35.0	25.00	4	1.00	35.00	60.00	M16	3.5	0.19	25.0
FF EWX D40-5-M16-05	40.0	30.00	5	1.00	40.00	65.00	M16	2.8	0.26	25.0

[14]

H600 WXC 05

Oboustranné destičky se 6 řeznými hranami pro frézování s vysokými posuvy

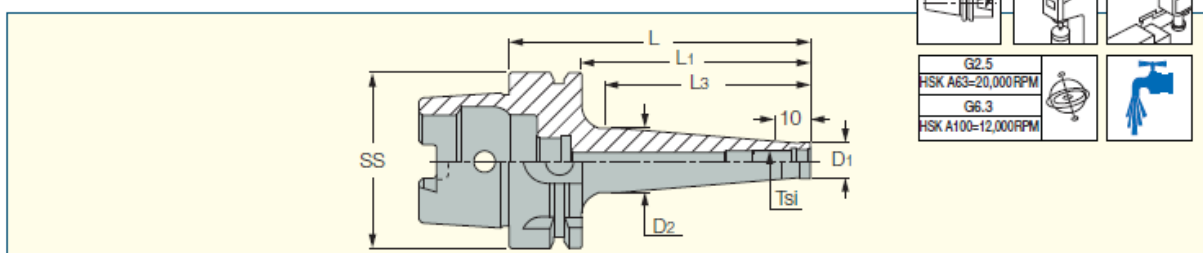


Označení	Rozměry				Houževnatý → Tvrdý				Doporučené řezné podmínky	
	di	l	S	r ⁽²⁾	IC330	IC830	IC810	IC808	ap (mm)	fz (mm/zub)
H600 WXC 05T312HP ⁽¹⁾	8.33	5.50	4.20	1.20					0.80-1.00	0.30-0.80
H600 WXC 05T312T ⁽²⁾	8.33	5.50	4.20	1.20		 			0.80-1.00	0.70-1.20

[14]

HSK A-ODP (FLEXFIT)

Závitový FLEXFIT adaptér s integrálním kuželem HSK DIN69893/A



Označení	SS	Tsi	D1	D2	L	L1	L3	Kg
HSK A 63 ODP 6X 59 ⁽¹⁾	63	M06	9.8	11.50	59.00	33.0	25.00	0.66
HSK A 63 ODP 6X109 ⁽¹⁾	63	M06	9.8	23.00	109.00	83.0	75.00	0.74
HSK A 63 ODP 8X 59 ⁽¹⁾	63	M08	13.1	15.00	59.00	33.0	25.00	0.68
HSK A 63 ODP 8X109 ⁽¹⁾	63	M08	13.1	23.00	109.00	83.0	75.00	0.76
HSK A 63 ODP10X 59 ⁽¹⁾	63	M10	18.0	20.00	59.00	33.0	25.00	0.70
HSK A 63 ODP10X109 ⁽¹⁾	63	M10	18.0	28.00	109.00	83.0	75.00	0.87
HSK A 63 ODP12X 59 ⁽¹⁾	63	M12	21.0	24.00	59.00	33.0	25.00	0.72
HSK A 63 ODP12X109 ⁽¹⁾	63	M12	21.0	31.00	109.00	83.0	75.00	0.93
HSK A 63 ODP16X 59 ⁽¹⁾	63	M16	29.0	34.60	59.00	33.0	25.00	0.79

[14]

Garant TK stopková fréza HPC / TPC



Provedení:
20 3018 – Stopka podobná DIN 6535 HB.



20 3018

[15]

Vhodnost/ v _c [m/min]	AI Plasty	AI Litina >10% Si	INOX <500 N	INOX <750 N	INOX <900 N	INOX <1100 N	INOX <1400 N	TOOLOX® 33 HRC	TOOLOX® 44 HRC	HARDOX® 500 <1600 N	INOX <900 N	INOX >900 N	Ti >850 N	Litina	CuZn	Grafit GFK CFK	Uni	max	min	Air	
ISO-kód:	N	N	N	P	P	P	P	H	H	H	M	M	S	K	N	N					
20 3018 –			210	195	170	150	145	95	70		85	75	50				o				
20 3022 –			100	90	80	70	65	55	50		45	40	30				o				
20 3025 –			120	110	100	90	80	70	60		55	45	35				o				

Ø e8 D _c	TK 20 3018			TK 20 3022			TK 20 3025			L ₃	L ₄	D ₄	L _{celk}	h6	45°	INOX >900 N f _z
	HPC / TPC	HPC	HPC	20 3018	20 3022	20 3025	20 3025	20 3025	20 3018							
mm	TiAlN	TiAlN	TiAlN	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
6	35,40	—	49,93	32	—	12	42	5,5	80	100	6	0,4	0,040			
8	46,85	—	60,31	32	—	16	62	7,4	90	100	8	0,4	0,040			
10	64,45	—	74,09	38	—	20	60	9,2	100	100	10	0,5	0,065			
12	99,—	116,60	116,60	51	76	24	73	11	100	125	12	0,5	0,065			
16	157,94	185,50	191,86	57	76	32	100	15	125	150	16	0,5	0,080			
20	244,86	313,76	380,54	57	102	40	98	19	125	175	20	0,5	0,100			

[15]

Garant TK vysoce přesné stopkové frézy



Provedení: Díky 6 břitům, vysoká stabilita a velmi klidný chod. Excentrické podbroušení. Zúžení max. 0,003 mm. Extrémně vysoce přesná kuželovitost s tolerancí v rozsahu μm, umožňuje vytvářet přesné 90° úhly a rovinné rovnoběžné plochy při obvodovém frézování. S nejvyššími požadavky na přesnost úhlů. Rohová fazetka bříty následkem excentrického podbroušení není definována.

Použití: Pro obvodové frézování při dokončování.



Vhodnost/ v _c [m/min]	AI Plasty	AI Litina >10% Si	INOX <500 N	INOX <750 N	INOX <900 N	INOX <1100 N	INOX <1400 N	INOX <35 HRC	INOX <60 HRC	INOX <67 HRC	INOX <900 N	INOX >900 N	Ti >850 N	Litina	Cu	Grafit GFK CFK	Uni	max	min	Air	
ISO-kód:	N	N	N	P	P	P	P	H	H	H	M	M	S	K	N	N					
20 3530 –			250	200	175	145	120	50			100	80		220			o				

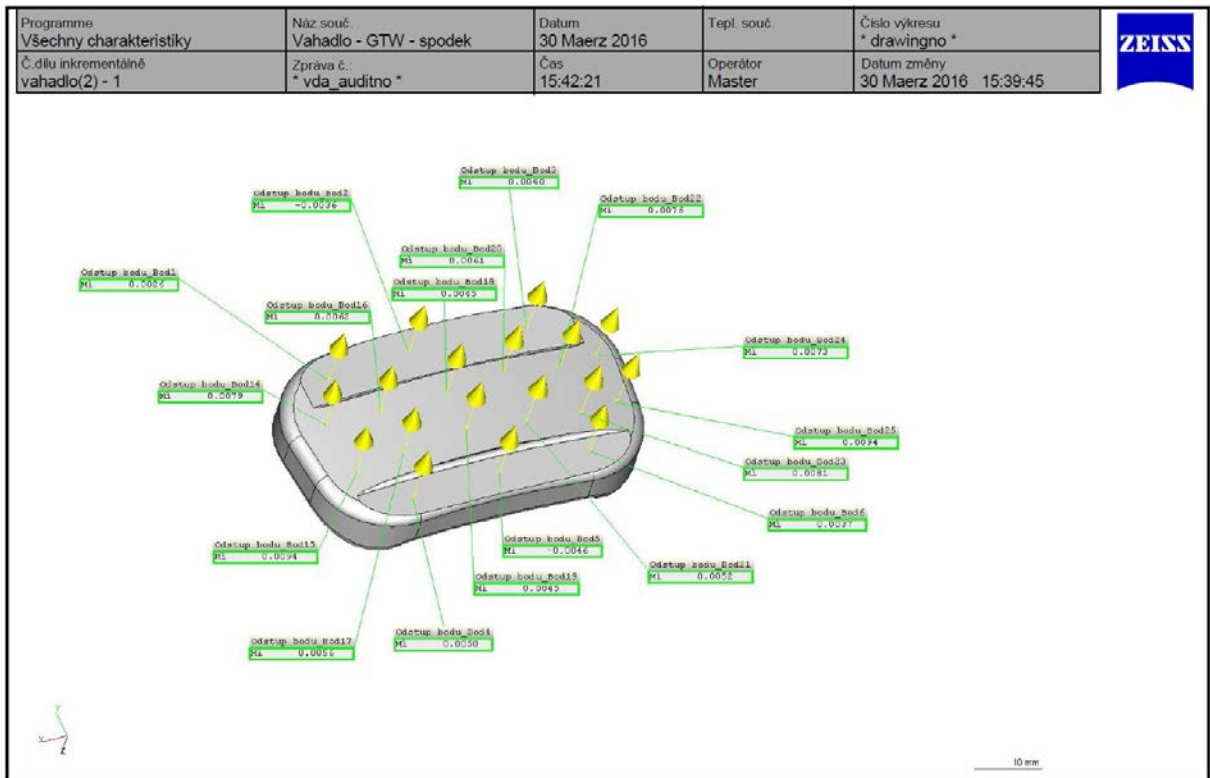
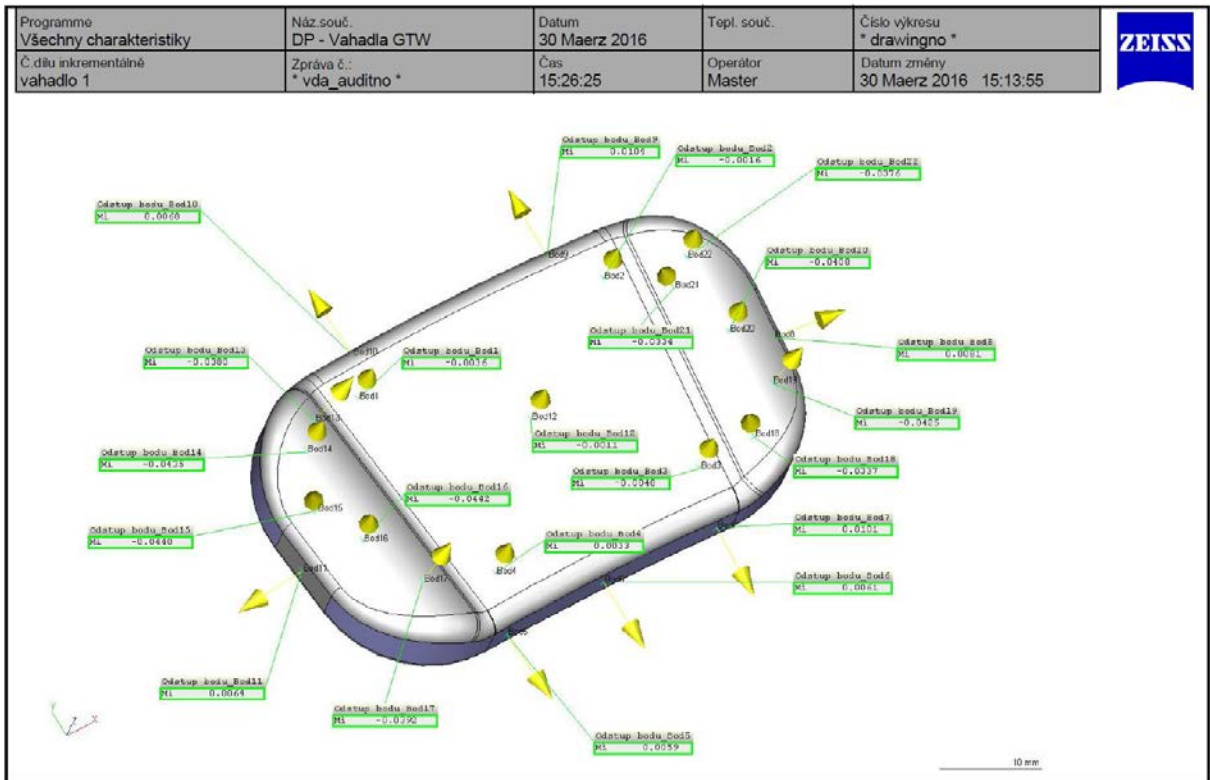
Ø f8 D _c	TK 20 3530										L ₃	L ₄	D ₄	L _{celk}	h6	INOX <900 N f _z	
	TK vysoce přesné frézy																mm
mm	TiAlN										mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
6	40,92										13	19	5,6	57	6	0,04	
8	46,53										19	25	7,6	63	8	0,04	
10	76,32										22	30	9,6	72	10	0,06	
12	101,76										26	36	11,5	83	12	0,06	
16	191,86										32	42	15	92	16	0,08	
20	276,66										38	52	19	104	20	0,10	

[15]

Příloha č.5

Protokol měření porovnání s modelem

Ukázka protokolů pro vahadlo č. 1



Příloha č.6

Tabulky vyhodnocení měření

Tabulka vyhodnocení měření drsnosti před a po povrchové úpravě

Vyhodnocení měření drsnosti

Ra [μm]

součást		PRŮMĚR. HODNOTA			PRŮMĚR. HODNOTA		
		před PÚ	po PÚ	rozdíl	před PÚ	po PÚ	rozdíl
vahadlo 1	HS_L	0,166	0,287	0,121			
	HS_P	0,193	0,230	0,037			
	DS	0,441	0,397	-0,044	0,554	0,519	-0,035
vahadlo 2	HS_L	0,173	0,194	0,021			
	HS_P	0,134	0,229	0,095			
	DS	0,456	0,370	-0,086	0,891	0,931	0,041
vahadlo 3	HS_L	0,116	0,206	0,090			
	HS_P	0,107	0,191	0,084			
	DS	0,435	0,407	-0,028	0,371	0,405	0,034
vahadlo 4	HS_L	0,093	0,124	0,031			
	HS_P	0,100	0,160	0,060			
	DS	0,393	0,330	-0,063	0,817	0,867	0,050
vahadlo 5	HS_L	0,113	0,130	0,017			
	HS_P	0,123	0,141	0,018			
	DS	0,454	0,410	-0,044	0,475	0,474	-0,001
				vertikální směr 1; 2		horizontální směr 3; 4	

Tabulka vyhodnocení měření tvrdosti po povrchové úpravě

Měření tvrdosti

stupnice [HV]

součást/zk. zatížení		Číslo měření					průměr	medián	pořadí
		ustavující	1	2	3	4			
vahadlo 1 HV10	HS_L	631	690	663	630	659	661	645	3.
	HS_P	611	674	644	646	645	652		
	DS	615	644	591	628	600	616		
vahadlo 2 HV1	HS_L	485	468	486	448	452	464	452	5.
	HS_P	409	430	460	452	431	443		
	DS	462	498	439	425	500	466		
vahadlo 3 HV10	HS_L	670	701	662	683	690	684	695	1.
	HS_P	648	650	710	670	700	683		
	DS	794	720	711	758	678	717		
vahadlo 4 HV1	HS_L	622	621	647	620	610	625	638	4.
	HS_P	614	653	631	609	608	625		
	DS	599	648	655	644	663	653		
vahadlo 5 HV10	HS_L	653	654	640	631	662	647	665	2.
	HS_P	644	650	669	668	633	655		
	DS	734	676	693	734	793	724		

Tabulka vyhodnocení odchylek bodů od jmenovitého tvaru modelu před a po povrchové úpravě

- nitridované kusy jsou označeny zeleně a kalené červeně

Tabulka vyhodnocení odchylek bodů od jmenovitého tvaru modelu

HS_D horní strana dno

DS_O dolní strana odlehčení

HS_K horní strana kontura

pořadí / vahadlo

místo	bod č.	Vahadlo 1			Vahadlo 2			Vahadlo 3			Vahadlo 4			Vahadlo 5			pořadí / vahadlo				
		Před TZ	Po TZ	rozdíl	Před TZ	Po TZ	rozdíl	Před TZ	Po TZ	rozdíl	Před TZ	Po TZ	rozdíl	Před TZ	Po TZ	rozdíl	1.	2.	3.	4.	5.
HS_D	1	-0,0036	-0,0036	0,0000	-0,0030	-0,0025	0,0005	0,0025	0,0013	-0,0012	-0,0024	-0,0038	-0,0014	-0,0021	0,0013	0,0034					
HS_D	2	-0,0016	0,0034	0,0050	0,0039	0,0028	-0,0011	-0,0033	-0,0009	0,0024	0,0025	0,0022	-0,0003	0,0017	-0,0018	-0,0035					
HS_D	3	-0,0048	-0,0036	0,0012	-0,0041	-0,0033	0,0008	0,0031	0,0026	-0,0005	-0,0033	-0,0030	0,0003	-0,0047	0,0017	0,0064					
HS_D	4	0,0033	0,0048	0,0015	0,0041	0,0034	-0,0007	-0,0031	-0,0011	0,0020	0,0035	0,0022	-0,0013	0,0040	-0,0009	-0,0049					
HS_D	12	-0,0011	0,0091	0,0102	0,0024	-0,0006	-0,0030	-0,0007	0,0096	0,0103	0,0013	-0,0030	-0,0043	-0,0010	0,0080	0,0090					
				PRŮMĚR			-0,0007			0,0026			-0,0014			0,0021					
				MEDIÁN			-0,0007			0,0020			-0,0013			0,0034					
				PRŮM. ODCHYLKA			0,0032			0,0031			0,0012			0,0050					
HS_K	5	0,0059	-0,0061	-0,0120	0,0057	0,0077	0,0020	0,0055	0,0029	-0,0026	0,0076	0,0076	0,0000	0,0059	0,0064	0,0005					
HS_K	6	0,0061	-0,0050	-0,0111	0,0074	0,0075	0,0001	0,0092	0,0042	-0,0050	0,0075	0,0064	-0,0011	0,0060	0,0061	0,0001					
HS_K	7	0,0101	-0,0083	-0,0184	0,0072	0,0078	0,0006	0,0082	0,0044	-0,0038	0,0091	0,0070	-0,0021	0,0067	0,0053	-0,0014					
HS_K	8	0,0081	0,0075	-0,0156	0,0100	0,0098	-0,0002	0,0083	0,0050	-0,0033	0,0108	0,0110	0,0002	0,0069	0,0055	-0,0014					
HS_K	9	0,0104	-0,0090	-0,0194	0,0092	0,0094	0,0002	0,0089	0,0030	-0,0059	0,0098	0,0095	-0,0003	0,0087	0,0074	-0,0013					
HS_K	10	0,0068	-0,0088	-0,0156	0,0076	0,0083	0,0007	0,0090	0,0048	-0,0042	0,0082	0,0084	0,0002	0,0094	0,0040	-0,0054					
HS_K	11	0,0064	-0,0086	-0,0150	0,0077	0,0092	0,0015	0,0116	0,0035	-0,0081	0,0117	0,0092	-0,0025	0,0079	0,0074	-0,0005					
				PRŮMĚR			-0,0153			-0,0047			-0,0008			-0,0013					
				MEDIÁN			-0,0156			-0,0042			-0,0003			-0,0013					
				PRŮM. ODCHYLKA			0,0022			0,0014			0,0009			0,0012					
HS_L	13	-0,0380	-0,0407	-0,0027	-0,0421	-0,0430	-0,0009	-0,0386	-0,0388	-0,0002	-0,0439	-0,0401	0,0038	-0,0404	-0,0401	0,0003					
HS_L	14	-0,0435	-0,0505	-0,0070	-0,0475	-0,0471	0,0004	-0,0444	-0,0468	-0,0024	-0,0491	-0,0482	0,0009	-0,0466	-0,0513	-0,0047					
HS_L	15	-0,0440	-0,0411	0,0029	-0,0479	-0,0502	-0,0023	-0,0461	-0,0444	0,0017	-0,0492	-0,0454	0,0038	-0,0482	-0,0496	-0,0014					
HS_L	16	-0,0442	-0,0372	0,0070	-0,0472	-0,0497	-0,0025	-0,0466	-0,0453	0,0013	-0,0484	-0,0476	0,0008	-0,0479	-0,0520	-0,0041					
HS_L	17	-0,0392	-0,0413	-0,0021	-0,0412	-0,0467	-0,0055	-0,0414	-0,0463	-0,0049	-0,0432	-0,0441	-0,0009	-0,0442	-0,0504	-0,0062					
				PRŮMĚR			-0,0004			-0,0009			0,0017			-0,0032					
				MEDIÁN			-0,0021			-0,0002			0,0009			-0,0041					
				PRŮM. ODCHYLKA			0,0043			0,0022			0,0017			0,0021					
HS_P	18	-0,0337	-0,0462	-0,0125	-0,0317	-0,0397	-0,0080	-0,0351	-0,0415	-0,0064	-0,0393	-0,0453	-0,0060	-0,0387	-0,0410	-0,0023					
HS_P	19	-0,0425	-0,0444	-0,0019	-0,0414	-0,0516	-0,0102	-0,0441	-0,0466	-0,0025	-0,0491	-0,0569	-0,0078	-0,0478	-0,0520	-0,0042					
HS_P	20	-0,0408	-0,0378	0,0030	-0,0405	-0,0536	-0,0131	-0,0420	-0,0435	-0,0015	-0,0461	-0,0556	-0,0095	-0,0463	-0,0555	-0,0092					
HS_P	21	-0,0334	-0,0200	0,0134	-0,0333	-0,0357	-0,0024	-0,0331	-0,0248	0,0083	-0,0365	-0,0367	-0,0002	-0,0374	-0,0486	-0,0112					
HS_P	22	-0,0376	-0,0539	-0,0163	-0,0387	-0,0503	-0,0116	-0,0383	-0,0506	-0,0123	-0,0420	-0,0548	-0,0128	-0,0428	-0,0590	-0,0162					
				PRŮMĚR			-0,0029			-0,0029			-0,0073			-0,0086					
				MEDIÁN			-0,0019			-0,0025			-0,0078			-0,0092					
				PRŮM. ODCHYLKA			0,0092			0,0052			0,0033			0,0043					
DS_O	1	0,0026	0,0043	0,0017	0,0044	0,0019	-0,0025	0,0008	0,0044	0,0036	0,0032	0,0009	-0,0023	0,0021	0,0043	0,0022					
DS_O	2	-0,0036	-0,0076	-0,0040	-0,0036	-0,0018	0,0018	0,0010	-0,0036	-0,0046	-0,0031	0,0028	0,0059	-0,0028	-0,0030	-0,0002					
DS_O	3	0,0040	0,0056	0,0016	0,0029	0,0017	-0,0012	0,0011	0,0017	0,0028	-0,0020	-0,0045	-0,0025	-0,0025	-0,0007	0,0018					
DS_O	4	0,0050	0,0077	0,0027	0,0031	-0,0032	-0,0063	0,0031	0,0023	-0,0008	-0,0049	-0,0054	-0,0005	-0,0057	-0,0021	0,0036					
DS_O	5	-0,0046	-0,0104	-0,0058	-0,0034	0,0036	0,0070	-0,0035	-0,0059	-0,0024	-0,0038	0,0046	0,0084	-0,0051	-0,0023	0,0028					
DS_O	6	0,0037	0,0044	0,0007	0,0024	-0,0032	-0,0056	0,0024	0,0042	0,0018	0,0056	-0,0033	-0,0089	0,0047	0,0040	-0,0007					
				PRŮMĚR			-0,0005			0,0001			0,0000			0,0016					
				MEDIÁN			-0,0012			0,0005			-0,0014			0,0020					
				PRŮM. ODCHYLKA			0,0029			0,0027			0,0048			0,0014					
DS	14	0,0079	0,0024	-0,0055	0,0120	0,0090	-0,0030	0,0078	0,0014	-0,0064	0,0172	0,0141	-0,0031	0,0135	0,0125	-0,0010					
DS	15	0,0094	0,0078	-0,0016	0,0124	0,0088	-0,0036	0,0093	0,0056	-0,0037	0,0193	0,0149	-0,0044	0,0154	0,0124	-0,0030					
DS	16	0,0062	-0,0016	-0,0078	0,0099	0,0093	-0,0006	0,0072	0,0042	-0,0030	0,0158	0,0161	0,0003	0,0124	0,0106	-0,0018					
DS	17	0,0056	-0,0004	-0,0060	0,0105	0,0086	-0,0019	0,0080	0,0054	-0,0026	0,0168	0,0156	-0,0012	0,0123	0,0092	-0,0031					
DS	18	0,0045	-0,0187	-0,0232	0,0098	0,0077	-0,0021	0,0067	-0,0066	-0,0133	0,0164	0,0162	-0,0002	0,0110	0,0015	-0,0095					
DS	19	0,0045	-0,0197	-0,0242	0,0114	0,0070	-0,0044	0,0063	-0,0047	-0,0110	0,0170	0,0158	-0,0012	0,0100	0,0019	-0,0081					
DS	20	0,0061	-0,0141	-0,0202	0,0082	0,0084	0,0002	0,0070	-0,0031	-0,0101	0,0169	0,0146	-0,0023	0,0100	0,0025	-0,0075					
DS	21	0,0052	-0,0137	-0,0189	0,0106	0,0082	-0,0024	0,0070	-0,0014	-0,0084	0,0161	0,0170	0,0009	0,0121	0,0058	-0,0063					
DS	22	0,0076	0,0014	-0,0062	0,0105	0,0085	-0,0020	0,0068	0,0044	-0,0024	0,0163	0,0116	-0,0047	0,0129	0,0110	-0,0019					
DS	23	0,0081	0,0041	-0,0040	0,0122	0,0080	-0,0042	0,0095	0,0068	-0,0027	0,0224	0,0194	-0,0030	0,0143	0,0121	-0,0022					
DS	24	0,0073	0,0111	0,0038	0,0106	0,0071	-0,0035	0,0109	0,0098	-0,0011	0,0167	0,0122	-0,0045	0,0170	0,0126	-0,0044					
DS	25	0,0094	0,0127	0,0033	0,0132	0,0041	-0,0091	0,0118	0,0114	-0,0004	0,0193	0,0132	-0,0061	0,0208	0,0108	-0,0100					
				PRŮMĚR			-0,0092			-0,0054			-0,0025			-0,0049					
				MEDIÁN			-0,0061			-0,0034			-0,0027			-0,0038					
		</																			

Příloha č.7

Obrazová příloha

Horní strana vahadel po laserovém povrchovém kalení



Horní strana vahadel po nitridaci



Dolní strana vahadel po laserovém povrchovém kalení



Dolní strana vahadel po nitridaci



Finální podoba zkušebních vahadel



Upnutí vahadla při měření na 3D souřadnicovém stroji Zeiss

- magnetické prizma



Příloha č.8

Metoda váženého součtu

Metoda váženého součtu [19]

Při vícekritériálním hodnocení variant můžeme každé hodnotě kritéria K_j přiřadit její užitek, tedy můžeme vytvořit dílčí lineární funkci užitku u_j , která pro variantu A_i nabývá hodnoty:

$$u_j(A_i) = u_{ij}; \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n.$$

Definičním oborem této funkce je interval mezi nejlepší a nejhorší hodnotou příslušného kritéria. Oborem funkčních hodnot je interval $\langle 0, 1 \rangle$. Tato metoda je vhodná především pro kvantitativní kritéria. Předpokládá lineární závislost užitku na hodnotách kritéria, přičemž nejhorší hodnotě j -tého kritéria (d_j) přiřadíme hodnotu 0 a nejlepší hodnotě (h_j) hodnotu 1. Pro dílčí užitek u_{ij} hodnoty y_{ij} platí:

$$u_{ij} = \frac{y_{ij} - d_j}{h_j - d_j}; \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

Pro jednotlivé varianty vypočteme agregovanou funkci užitku podle vztahu:

$$u(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j u_{ij}; \quad w_j = \text{váhy jednotlivých kritérií}$$

Varianty seřadíme podle hodnot funkce užitku $u(A_i)$. Nejlepší varianta má tuto hodnotu největší.

U kritéria K2 byly hodnoty převzány z metody bodovací (viz kapitola 5.2.1).

Hodnoty pro výpočet agregované funkce užitku

Varianta	Kritérium				
	K1	K2	K3	K4	K5
Varianta 1	28620	1	645	6	11
Varianta 2	26640	2	452	6	13
Varianta 3	31320	1	695	7	13
Varianta 4	30240	2	638	6	13
Varianta 5	34920	1	665	7	13

h_j	26640	2	695	7	11
d_j	34920	1	452	6	13

Metoda váženého součtu

Varianta	Kritérium					váhy A		váhy B	
	K1	K2	K3	K4	K5	$u(A_i)$	pořadí	$u(A_i)$	pořadí
Varianta 1	0,761	0,000	0,794	0,000	1,000	0,599	1.	0,601	2.
Varianta 2	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,533	3.	0,467	4.
Varianta 3	0,435	0,000	1,000	1,000	0,000	0,478	4.	0,516	3.
Varianta 4	0,565	1,000	0,765	0,000	0,000	0,593	2.	0,606	1.
Varianta 5	0,000	0,000	0,877	1,000	0,000	0,300	5.	0,359	5.

$u(A_i)$ = agregovaná funkce užitku

Nejhorší hodnotě j -tého kritéria (d_j) přiřadíme hodnotu 0 a nejlepší hodnotě (h_j) užitek 1.