



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VLASTNOSTI POVRCHŮ KLUZNÝCH LOŽISEK

FEATURES OF SLIDE BEARINGS SURFACES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR DOBROVOLNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ MARŠÁLEK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Dobrovolný

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vlastnosti povrchů kluzných ložisek

v anglickém jazyce:

Features of slide bearings surfaces

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Detailně zmapovat vlastnosti a charakteristiky povrchů (nejen) moderních kluzných ložisek s cílem vytvořit ucelený přehled těchto vlastností tak, aby závěry z této práce následně mohly být použity pro tvorbu sofistikovaných výpočetních modelů kluzných ložisek.

Cíle bakalářské práce:

- Úvodní vpravení do problematiky
- Základní rozdělení a popis kluzných ložisek
- Přehled používaných materiálů spolu s jejich materiálovými charakteristikami
- Přehled charakteristik drsností povrchů dosažených v důsledku použití jednotlivých druhů povrchových úprav či obrábění
- Závěrečné zhodnocení

Seznam odborné literatury:

- [1] Nilsson B, Rosen B-G, Thomas TR, Wiklund D, Xiao L. Oil pockets and surface topography: mechanism of friction reduction. In: Proceedings of the XI international colloquium on surfaces. 2004. Chemnitz (Germany), Addendum.
- [2] Blatter A, Maillat M, Pimenov SM, Shafeev GA, Simakin AV, Loubnin AN. Lubricated sliding performance of laser-patterned sapphire. Wear 1999;232:226–30.
- [3] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components. Tribol Trans 2002;45/4:444–9.
- [4] Duffet G, Sallamand P, Vannes AB. Improvement in friction by cw Nd: YAG laser surface treatment on cast iron cylinder bore. Appl Surf Sci 2003;205:289–96.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Maršálek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Základní rozdělení kluzných ložisek spolu s materiály a jejich charakteristikami. Vyhodnocení vlastností povrchů kluzných ložisek, jejich metody obrábění a povrchové úpravy s přehledem dosahovaných drsností a vybraných 3D parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

kluzná ložiska, mazání, drsnost povrchu, materiály kluzných ložisek

ABSTRACT

Elementary compartmentalization of plain bearings, materials and their characteristics. Evaluation of plain bearing surface properties, their methods of machining and finishing. Overview of achieved surface roughness and selected 3D parameters.

KEYWORDS

plain bearings, lubrication, surface roughness, material of plain bearings

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOBROVOLNÝ, P. *Vlastnosti povrchů kluzných ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Maršálek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Maršálka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2014

.....

Petr Dobrovolný

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu panu Ing. Ondřeji Maršálkovi za věcné připomínky a odborné vedení bakalářské práce. Rodině za psychickou a finanční podporu, rovněž za pomoc během celé délky mého studia.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Struktura povrchu	12
1.1 Obecné termíny.....	13
1.2 Parametry profilu povrchu.....	15
1.2.1 Střední aritmetická úchylka profilu povrchu.....	15
1.2.2 Průměrná kvadratická úchylka profilu povrchu	16
1.2.3 Největší výška profilu	16
1.2.4 Celková výška profilu	17
1.2.5 Šikmost profilu povrchu (skewness)	17
1.2.6 Špičatost profilu povrchu (kurtosis).....	18
1.3 Parametry 3D povrchu.....	20
1.3.1 Základní pojmy	20
1.3.2 Výškové parametry	21
1.3.3 Hybridní parametry	23
1.3.4 Parametry pojmenovaného prvku.....	23
1.4 Měření drsnosti povrchu.....	24
2 Tribologie kluzných uložení.....	25
2.1 Tření.....	25
2.1.1 Suché tření.....	26
2.1.2 Kapalinné tření	27
2.1.3 Mezní tření	27
2.2 Procesy opotřebení	27
2.2.1 Adhezivní opotřebení	28
2.2.2 Abrazivní opotřebení.....	28
2.2.3 Erozivní opotřebení.....	28
2.2.4 Korozivní opotřebení.....	29
2.2.5 Únavové opotřebení	29
2.2.6 Kavitační opotřebení	30
2.2.7 Vibrační opotřebení.....	30
2.3 Mazání	30
2.3.1 Maziva.....	30
2.3.2 Základní vlastnosti maziv.....	31
2.3.3 Režimy mazání	32
2.3.4 Texturování povrchu pomocí laseru.....	34
3 Kluzná ložiska.....	36

3.1	Základní rozdělení kluzných ložisek	36
3.2	Další konstrukce kluzných ložisek	39
3.2.1	Víceplochá ložiska	39
3.2.2	Ložiska se spirálními drážkami	40
3.2.3	Fóliová ložiska	41
3.2.4	Magnetická ložiska	42
3.2.5	Segmentová kluzná ložiska	42
3.2.6	Sférická, kloubová ložiska	43
4	Materiály kluzných ložisek	44
4.1	Základní kovové materiály	44
4.1.1	Cínové a olověné kompozice	44
4.1.2	Materiály ze slitin mědi	45
4.1.3	Slitiny hliníku	49
4.1.4	Šedé litiny	50
4.1.5	Spékané materiály	51
4.2	Nekovové materiály	52
4.2.1	Plasty	52
4.2.2	Uhlík	54
4.3	Moderní materiály pro kluzná ložiska	54
4.3.1	Kompozit PTFE (DU, KU pouzdra)	54
4.3.2	Kompozit POM (DX, KX pouzdra)	55
4.3.3	Kompozit s nerezovým pouzdem	56
4.3.4	SKF ložisko z vinutých vláken	56
4.3.5	Bronz s grafitem	57
4.3.6	Keramika	58
4.4	Speciální materiály kluzných ložisek	59
4.4.1	Berylliová měď	59
4.4.2	Acube 100	59
4.4.3	Slitiny toughmet	60
4.4.4	Nitronic 60	60
5	Přehled dosahovaných drsností	61
5.1	Konvenční metody obrábění	61
5.2	Nekonvenční metody obrábění	65
5.3	Dokončovací metody třískového obrábění	67
5.4	Beztrískové dokončovací metody	74
5.5	Chemicko-tepelné úpravy povrchu	77
5.6	Úprava povrchu pomocí konverzní vrstvy	79

OBSAH

Závěr.....	81
Použité informační zdroje.....	84
Seznam použitých zkratek a symbolů	94
Seznam obrázků	96
Seznam tabulek	101

Úvod

Vznik kluzného ložiska se datuje již do starověku, kdy člověk vymyslel kolo a ukotvil jej v dřevěném pouzdru. S postupem času, jak člověk začal zpracovávat nové kovy, vznikala bronzová i ocelová kluzná ložiska. V té době ložiska pracovala převážně v oblasti suchého tření, neboť na ztráty a opotřebení nebyl kladen větší důraz. To se změnilo s příchodem průmyslové revoluce. Nastalý technický boom a výroba složitých strojních zařízení si vyžádaly prudký rozvoj ložisek, jež získaly na významu a dodnes se řadí mezi nejdůležitější strojní součásti. Snaha minimalizovat ztráty, opotřebení a zvýšit životnost nejen ložiska, vedly k nutnosti kvalitního mazání, ale také k důkladnému zkoumání procesů působících v uložení.



Obr. 1 Dřevěné kluzné ložisko z katapultu trebuchtet [142] Obr. 2 Bronzové kluzné ložisko s kapsami vyplněnými grafitem [136]

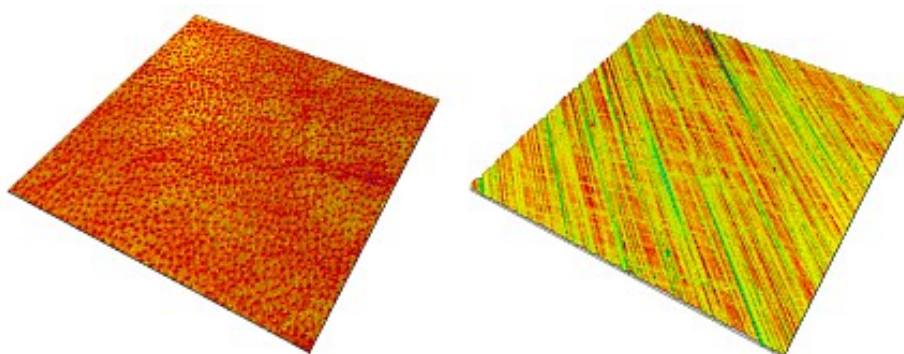
Nejdůležitějšími negativními procesy jsou tření a opotřebení. Jejich velikost lze snižovat pomocí již zmíněného mazání, spolu s vhodně přizpůsobenou strukturou povrchu či vhodným materiálem.

1 STRUKTURA POVRCHU

Každá vyrobená součást má povrch a jeho struktura je ovlivněna technologií obrábění a povrchovým zpracováním. Povrch součásti má výrazný vliv na vlastnosti a celkovou funkčnost součásti. Komplexní souhrn vlastností a problematiky povrchu je odborně nazýváno termínem integrita povrchu.

Obrobený povrch není dokonalá rovina. Skutečný povrch je tvořen výstupky a prohlubněmi a vlastnosti povrchu jako jsou plocha dotyku, adhezní síla, tření, kontaktní tlak atd., budou nabývat jiných hodnot než pro dokonalou rovinu. Z tohoto důvodu je třeba skutečný povrch popsat, vyhodnotit nebo zkontrolovat tak, aby se daly zjistit skutečné vlastnosti takového povrchu a případně vhodnou technologií je přizpůsobit.

Nejvýraznější vliv na strukturu povrchu má drsnost, stopa po nástroji. Podle výraznosti stopy a směru rozdělujeme povrch na anizotropní a izotropní. Anizotropní povrchy (soustružení, frézování atd.) vykazují výraznou a prostorově orientovanou stopu po nástroji, proto jejich vlastnosti jsou závislé na směru měření. Izotropní povrchy jsou bez výrazné stopy po nástroji, dosahují stejných vlastností povrchu ve všech směrech. V technické praxi se dokonalé izotropní povrchy téměř nevyskytují, ale kováním, litím, lapováním atd., se jim můžeme přiblížit.[4][111]

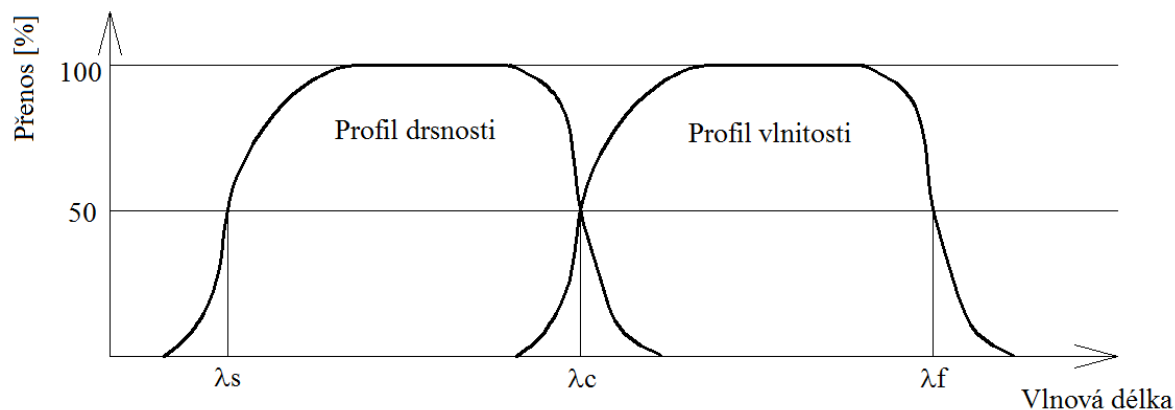


Obr. 3 Izotropní povrch (nalevo) a anizotropní povrch (napravo) [111]

Kontrola povrchu součásti je definována normou ČSN EN ISO 4287 (Geometrické požadavky na výrobky, GPS), kde se struktura povrchu řeší pomocí základního profilu povrchu (2D).[2][44]

1.1 OBECNÉ TERMÍNY

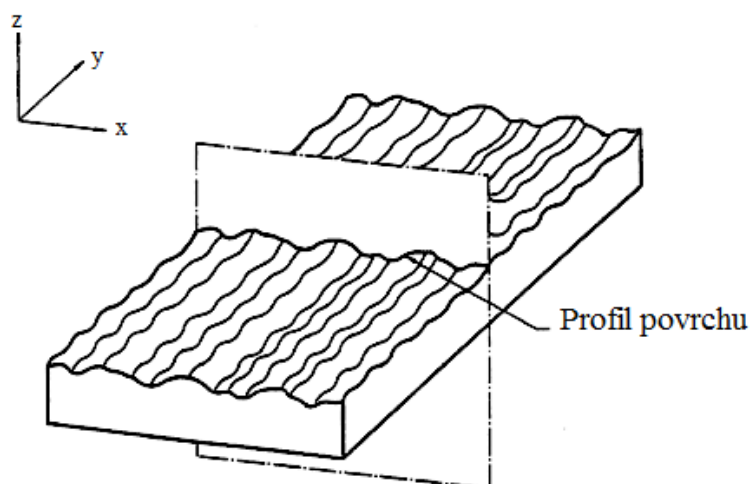
Filtr profilu „(profile filter) – filtr rozdělující profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky“.[44] Dnešní měřicí přístroje provádí filtraci automaticky pomocí výpočetní jednotky a obsahují tři základní filtry: drsnosti, vlnitosti a základního profilu.[1][44]



Obr. 4 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [44]

Profil povrchu „(surface profile) – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny“.[44]

Základní profil „(primary profile) – úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s “.[43]

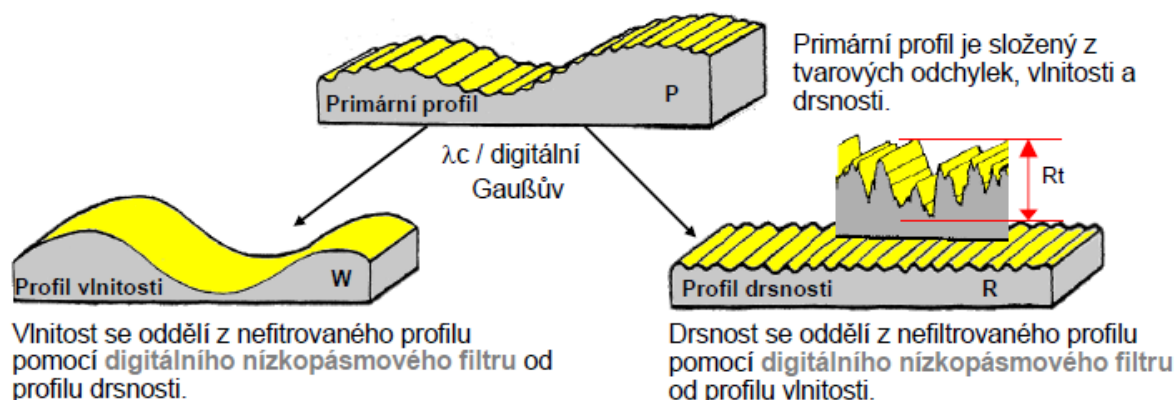


Obr. 5 Profil povrchu v rovině XZ [44]

Profil drsnosti „(roughness profile) – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c ; profil je úmyslně pozměněn. Parametr vypočítaný z profilu drsnosti je **R-parametr**“.[44] Drsnost vzniká interakcí mezi obrobkem a nástrojem. Je to stopa po nástroji charakteristická pro každý druh obrábění. Drsnost patří mezi mikrogeometrickou nerovnost povrchu.[4][48]

Profil vlnitosti „(waviness profile) – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c ; profil je záměrně pozměněn. Parametr vypočítaný z profilu vlnitosti se nazývá **W-parametr**“.[44] Vlnitost je způsobena nízkou tuhostí stroje,

vzniká chvění nebo zpevněním materiálu, nepřesným či nedostatečným upnutím. Vlnitost patří mezi makrogeometrickou nerovnost povrchu, na které je nabalena drsnost. [4][48]



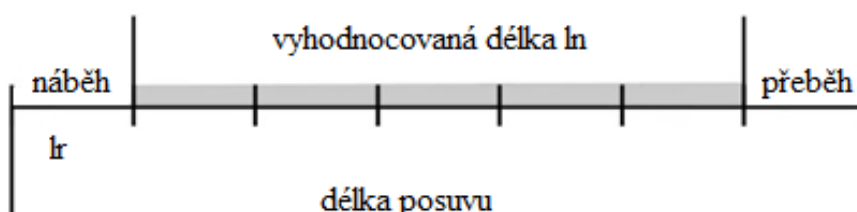
Obr. 6 Vztah mezi profilem základním, vlnitosti a drsnosti [48]

Střední čára profilu drsnosti „(mean line for the roughness profile) – čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_c “.[44]

Střední čára profilu vlnitosti „(mean line for the waviness profile) – čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_f “.[44]

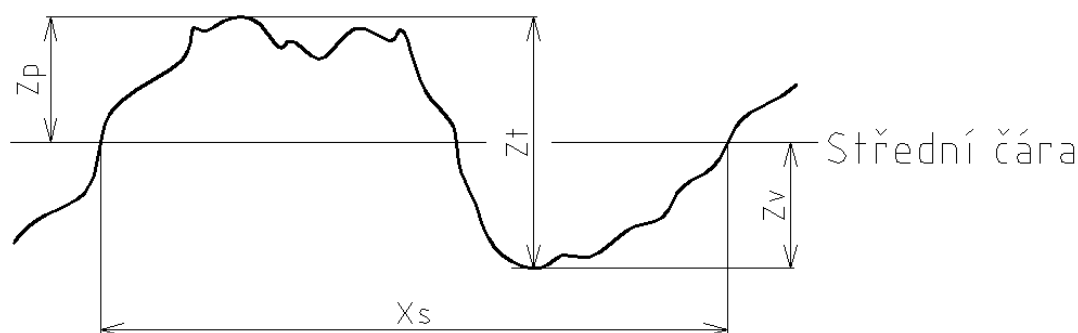
Základní délka „ l_r (sampling length) – délka ve směru osy X , použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. Základní délka pro drsnost a pro profil vlnitosti, jsou číselně rovné charakteristické vlnové délce profilového filtru λ_c , případně λ_f . Základní délka pro základní profil se rovná vyhodnocované délce“.[44]

Vyhodnocovaná délka „ l_n (evaluation length) – délka ve směru osy X , použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu nebo více základních délek“.[44]



Obr. 7 Příklad vyhodnocované délky [48]

Prvek profilu „(profile element) – výstupek profilu a přilehlá prohlubeň. Kladná nebo záporná část posuzovaného profilu na začátku nebo konci základní délky by byly vždy považovány za výstupek profilu nebo prohlubeň profilu. Určuje-li se počet prvků profilu na délce několika po sobě jdoucích základních délek, výstupky a prohlubně posuzovaného profilu na začátku nebo na konci každé základní délky jsou brány v úvahu jen jednou na začátku každé základní délky“.[44]



Obr. 8 Prvek profilu [44]

Výška výstupku profilu „ Z_p (profile peak height, Z_p) – vzdálenost mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku profilu“.[44] (viz obr. 8)

Hloubka prohlubně profilu „ Z_v (profile valley depth, Z_v) – vzdálenost mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu“.[44] (viz obr. 8)

Výška prvku profilu „ Z_t (profile element height, Z_t) – součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu“.[44] (viz obr. 8)

Šířka prvku profilu „ X_s (profile element width, X_s) – délka úseku osy X protínající prvek profilu“.[44] (viz obr. 8)

1.2 PARAMETRY PROFILU POVRCHU

Parametry profilu povrchu lze vyhodnotit pro všechny druhy geometrických parametrů P , R , W . Dále bude popsán pouze parametrem drsnosti R , neboť je nejdůležitější a používaný pro posouzení kvality povrchu.

1.2.1 STŘEDNÍ ARITMETICKÁ ÚCHYLKA PROFILU POVRCHU

„Střední (průměrná) aritmetická úchylka posuzovaného profilu, R_a (arithmetical mean deviation, R_a) – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky“.[44]

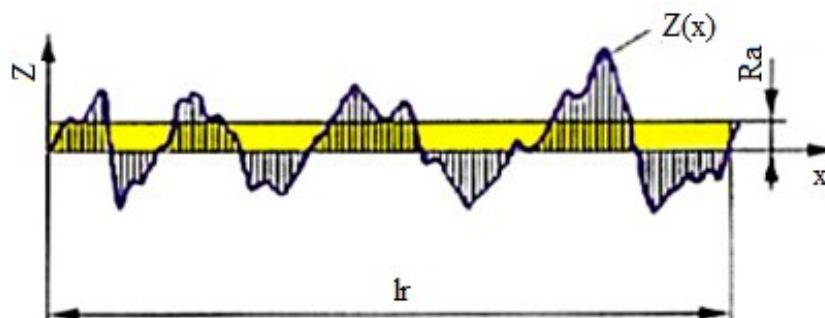
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx, \quad (1)$$

kde:

R_a [μm]...střední aritmetická úchylka,

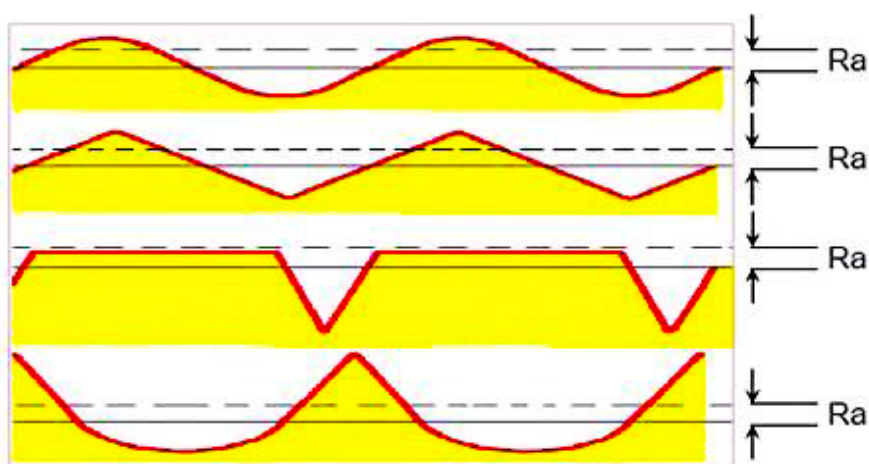
l [-].....počet výstupků a prohlubní na základní délce,

Z [μm].... vzdálenosti výstupků a prohlubní od střední čáry.



Obr. 9 Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a [84]

Je základním parametrem pro popis drsnosti povrchu, avšak nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi, tudíž pro různé struktury povrchu může R_a nabývat stejných hodnot. I přes všechny nedostatky, se hodnota drsnosti R_a předepisuje na výkresy.[4][48]



Obr. 10 Různé tvary povrchů se stejným R_a [48]

1.2.2 PRŮMĚRNÁ KVADRATICKÁ ÚCHYLKA PROFILU POVRCHU

„Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu, R_q (root mean square deviation of the assessed profile, R_q) – kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky“.[44]

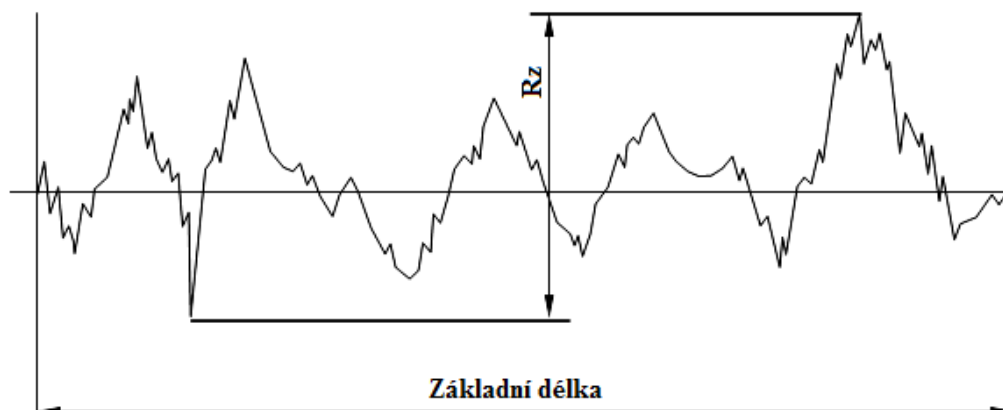
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}, \quad (2)$$

kde:

R_q [μm]...průměrná kvadratická úchylka.

1.2.3 NEJVĚŠÍ VÝŠKA PROFILU

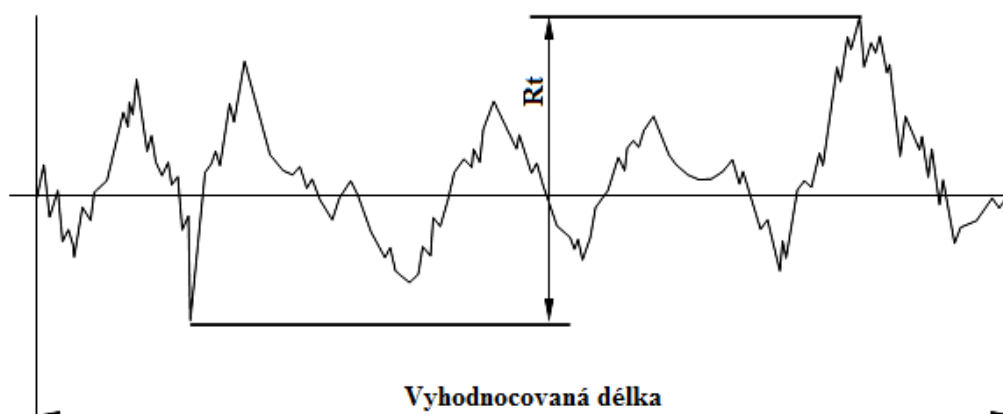
„Největší výška profilu, R_z (maximum height of profile, R_z) – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. V ISO 4287 – 1:1984 byla použita značka pro udání „výšky nerovností z deseti bodů“.[44] Je třeba rozlišovat tyto dva parametry, jelikož ne vždy je jejich rozdíl zanedbatelný.[44]



Obr. 11 Schématické vyjádření největší výšky profilu R_z [2]

1.2.4 CELKOVÁ VÝŠKA PROFILU

„Celková výška profilu, R_t (total height of profile, R_t) – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky“.[44]
Celkovou výšku profilu je třeba znát např. u návrhu mazání kluzného ložiska, kdy musíme stanovit minimální tloušťku olejového filmu tak, aby nedošlo ke styku povrchů ani v nejvyšších bodech profilu povrchu.[1]



Obr. 12 Schématické vyjádření celkové výšky profilu R_t [2]

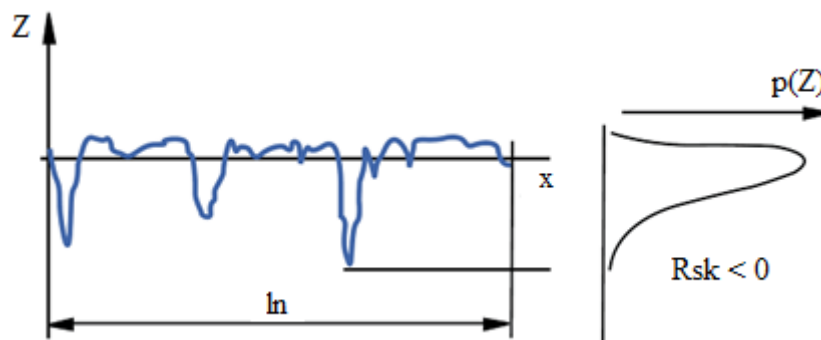
1.2.5 ŠIKMOST PROFILU POVRCHU (SKEWNESS)

„Šikmost posuzovaného profilu, R_{sk} (skewness of the assessed profile, R_{sk}) – podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky. R_{sk} je mírou symetrie a hustoty pravděpodobnosti hodnot pořadnic“.[44]

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l |Z^3(x)| dx \right], \quad (3)$$

kde:

R_{sk} [-]...šikmost profilu.



Obr. 13 Šikmost profilu [47]

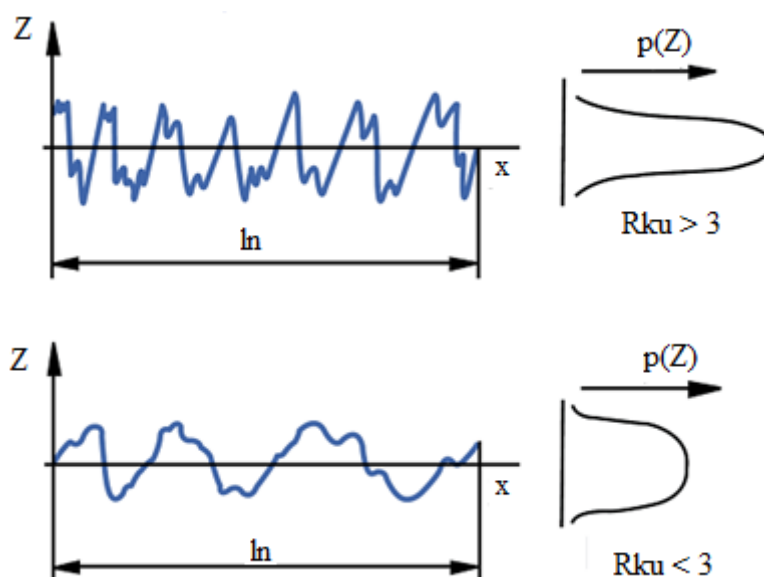
1.2.6 ŠPIČATOST PROFILU POVRCHU (KURTOSIS)

„Špičatost posuzovaného profilu, Rku (kurtosis of the assessed profile, Rku) – podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky. Rku jsou mírou špičatosti hustoty pravděpodobnosti hodnot pořadnic“.[44]

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{l} \int_0^l |Z^4(x)| dx \right], \quad (4)$$

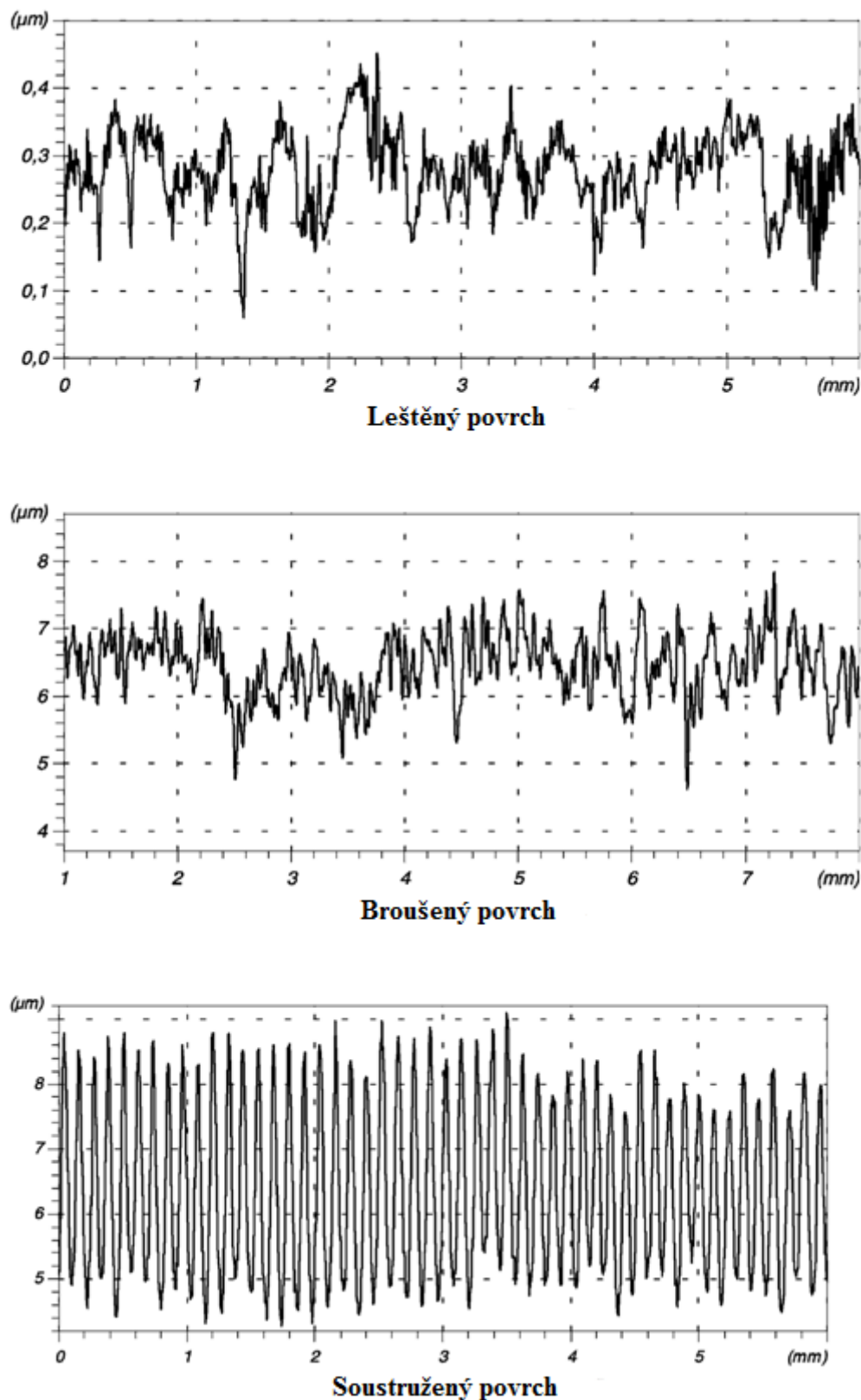
kde:

Rku [-]...špičatost profilu.



Obr. 14 Špičatost profilu [47]

Šikmost a špičatost nám zobrazují pravděpodobnost výskytu bodů profilu v závislosti na výšce profilu. Šikmost udává polohu maxima souřadnic těchto bodů a počet bodů udává špičatost. Křivky Rsk a Rku nám charakterizují rozdělení bodů skutečného povrchu, při porovnání s neutrálním Gaussovým rozdělením ($Rsk = 0$, $Rku = 3$), nám dávají detailnější přehled o členitosti povrchu a umožňují tak rozlišit dvě různé struktury povrchu se stejným Ra . Negativní šikmost ($Rsk < 0$) popisuje povrch s větším výskytem prohlubní, při pozitivní šikmosti ($Rsk > 0$) převažuje členitost výstupků. Špičatost pak udává počet těchto nerovností, pozitivní ($Rku > 3$) větší a negativní ($Rku < 3$) menší členitost výstupků a prohlubní.[47] [76][107]



Obr. 15 Struktura povrchu tří různých technologií [92]

Povrchy s negativní šikmostí a špičatostí, představují vhodnou alternativu pro nosnou plochu. Struktura povrchu je tvořena málo výstupky, které se rychle opotřebí a vznikne nosná plocha, jež bude vykazovat nízký koeficient tření. Na obr. 15 je zřejmé, že ze zobrazených technologií, se pro nosnou plochu hodí nejlépe povrch po leštění či broušení. Naopak

soustružený povrch vykazuje vysokou členitost výstupků, které budou zvyšovat přilnavost. Takové povrchy jsou ideální pro nanášení nátěrů a povlaků.[47][76][107]

Šikmostí nelze popsat vysoce pórovité povrchy např. po lití či spékání materiálů, pro tyto povrchy dosahuje šikmost vysokých hodnot a obecně platí, že přesahuje-li šikmost hodnotu ± 2 , hodnota R_a již nezahrnuje reálné vlastnosti povrchu a musíme pro popis struktury použít jiný parametr. Nevýhodou taktéž tvoří vzájemná závislost šikmosti a špičatosti i citlivost na výskyt náhodných výstupků.[47][107]

1.3 PARAMETRY 3D POVRCHU

Hodnocení povrchu ve 3D využívá poznatků z 2D měření. Zavádí nové parametry, některé obdobné, avšak nyní aplikované na 3D povrch. Nutno brát v potaz, že parametry naměřené ve 2D nenabývají stejných hodnot ve 3D. Příkladem může být ultrazvukem soustružená plocha tab. 31, kde $R_a = 0,89 \pm 0,25 \mu\text{m}$, zatímco prostorový parametr nabývá hodnoty $S_a = 1,21 \pm 0,28 \mu\text{m}$.

1.3.1 ZÁKLADNÍ POJMY

Pík „(peak) – bod na povrchu, který je vyšší než všechny ostatní body v jeho okolí“.[41]

Údolí „(dale) – oblast okolo prohlubně taková, že směr všech maximálních cest končí v prohlubni“.[41] Je oblast v okolí prohlubně taková, kde všechny strmé křivky povrchu ústí do prohlubně.

Primární povrch „(primary surface) – část povrchu získaného z části povrchu popsaného matematickým modelem“.[41]

S – filtr „(S – filter) – filtr povrchu, který odstraní malou laterální stupnici z primárního povrchu“.[41] Jinými slovy je to filtr, který odstraňuje malé a nevýznamné prvky povrchu.

L – filtr „(L – filter) – filtr povrchu, který odstraní velkou laterální stupnici z primárního povrchu nebo S – F povrchu“.[41] Filtr, odstraňující velké prvky povrchu, které by při měření působily jako šum.

F – operace „(F – operation) – operace, která vyloučí vliv tvaru z primárního povrchu“.[41]

S – F povrch „(S – F surface) – povrch odvozený z primárního povrchu pomocí vyloučení vlivu tvaru použitím F – operace“.[41]

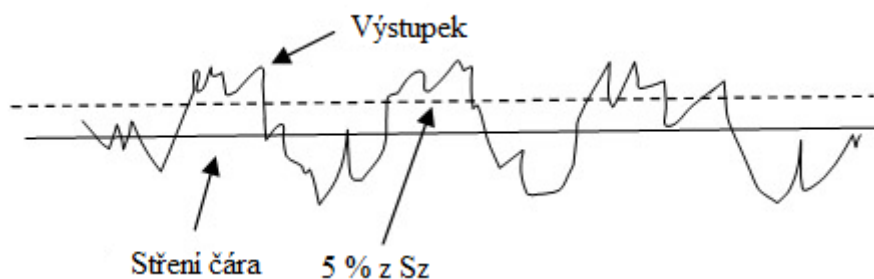
S – L povrch „(S – L surface) – povrch odvozený od S – F povrchu vyloučením vlivu velké stupnice, při použití L – filtru“.[41]

Omezení stupnice povrchu „(scale-limited surface) – S – F nebo S – L povrch“.[41]

Hodnota koordinace „(ordinate value $Z(x, y)$) – výškové omezení stupnice povrchu v poloze x, y “.[41]

Povrch jádra „(core surface) – omezení stupnice povrchu, kromě vystupujících jader vrchů a údolí“.[41]

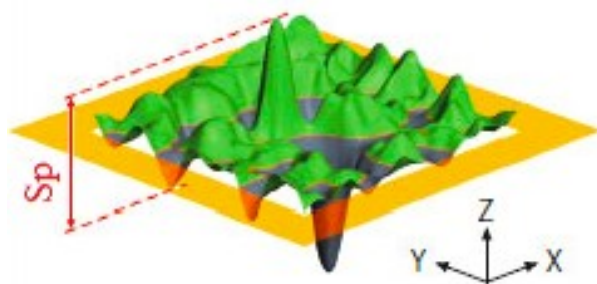
Wolfovo pročištění „(Wolf pruning) – pročištění, kde přímky povrchu jsou odstraněny od piku/prohlubně s nejmenší místní výškou/hloubkou piku/prohlubně, až do piku/prohlubně se specifikovanou místní výškou piku/prohlubně“.[41]
Jedná se vlastně o vytvoření nové roviny vhodně vzdálené od základní tak, aby došlo k vyloučení vlivu nedůležitých piků a prohlubní.



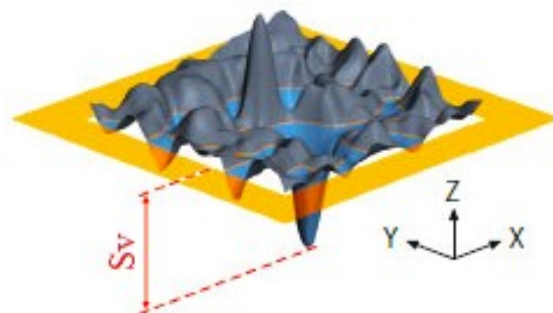
Obr. 16 Zobrazení posunutí střední roviny ve 2D [128]

1.3.2 VÝŠKOVÉ PARAMETRY

Sp – „maximální výška piku omezené stupnice povrchu (maximum peak height of the scale-limited surface), největší hodnota výšky piku uvnitř určené plochy“.[41]



Obr. 17 Grafické znázornění parametru Sp [135]



Obr. 18 Grafické znázornění parametru Sv [135]

Sv – „maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu (maximum pit height of the scale-limited surface), hloubka prohlubně uvnitř určené plochy zmenšená o její nejmenší hodnotu“.[41]

Sa – „aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu (arithmetical mean height of the scale-limited surface), aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy (A)“.[41]

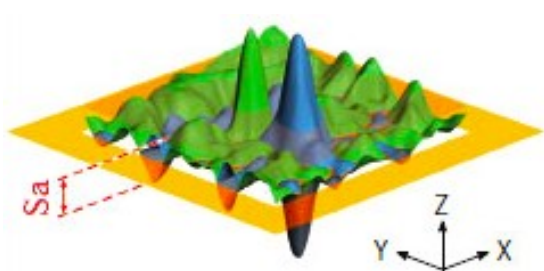
$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy, \quad (5)$$

kde:

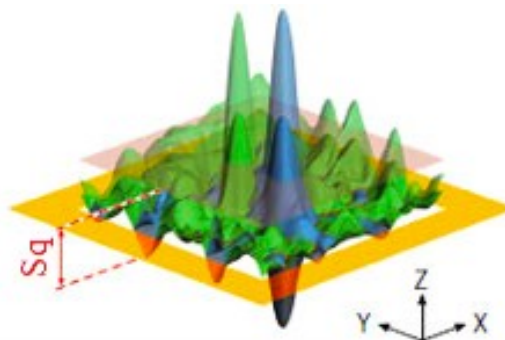
Sa [μm]....aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu,

A [-].....počet piků a prohlubní na měřené ploše,

Z [μm].....vzdálenosti piků a prohlubní od střední roviny.



Obr. 19 Grafické znázornění parametru Sa [135]



Obr. 20 Grafické znázornění parametru Sq [135]

Sq – „základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu (root mean square height of the scale-limited surface), vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř plochy definice (A)“.[41]

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy}, \quad (6)$$

kde:

Sq [μm]...základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu.

Sz – „maximální výška omezené stupnice povrchu (maximum pit of the scale-limited surface), součet maximální hodnoty výšky piku a maximální hloubky prohlubně uvnitř určené plochy“.[41]

Ssk – „šikmost omezené stupnice povrchu (skewness of the scale-limited surface), kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot krychle Sq uvnitř určené plochy (A)“.[41]

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^3(x, y) dx dy \right], \quad (7)$$

kde:

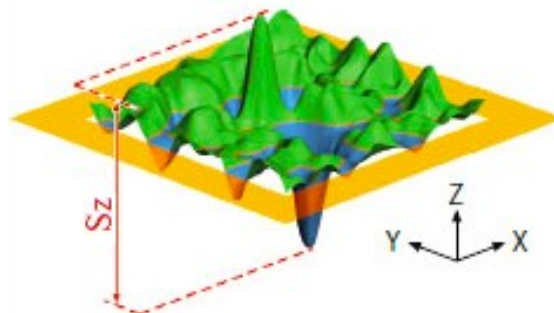
Ssk [-]...šikmost omezené stupnice povrchu.

Sku – „špičatost omezené stupnice povrchu (kurtosis of the scale-limited surface), kvocient průměrné čtvrté mocniny hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny Sq uvnitř určené plochy (A)“.[41]

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^4(x, y) dx dy \right], \quad (8)$$

kde:

Ssk [-]...špičatost omezené stupnice povrchu.



Obr. 21 Grafické znázornění parametru Sz [135]

1.3.3 HYBRIDNÍ PARAMETRY

Sdq – „základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu (root mean square gradient of the scale-limited surface)“.[41] Sklon povrchu v prostoru.[81]

Sdr – „poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu (developed interfacial area ratio of the scale-limited surface)“.[41]

Smr – „poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu (areal material ratio)“.[41]
Plošný materiálový poměr, odráží odolnost povrchu proti tření a opotřebení. Materiály s vysokým objemovým poměrem umožňují snadný záběh a vykazují menší opotřebení.[45]

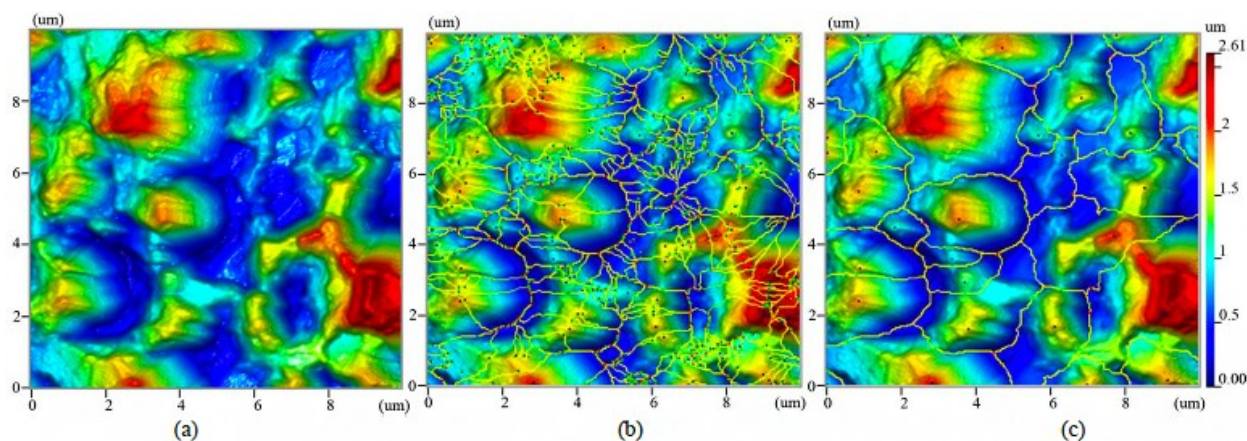
Spk – „redukovaná výška piku (reduced peak height), průměrná výška vystupujících piků nad povrch jádra“.[41]

Svk – „redukovaná hloubka údolí (reduced dale height), průměrná hloubka vystupujících údolí pod povrchem jádra“.[41] Vyšší hodnota umožňuje u mazaných povrchů lépe zadržovat tekutinu (mazivo).[105]

1.3.4 PARAMETRY POJMENOVANÉHO PRVKU

S_{10Z} – „deset bodů výšky povrchu (ten-point height of surface), průměrná hodnota výšky pěti piků s největší globální výškou piku, přidáno k průměrné hodnotě hloubky pěti údolí s největší globální hloubkou“.[41]

Spd – „hustota piků (density of peaks), počet piků na jednotku plochy“[41] „po Wolfově pročištění 5 % Sz“.[42]



Obr. 22 Wolfovo pročištění: a) 2D pohled na plochu, b) členitost výstupků před Wolfovým pročištěním a c) po Wolfově pročištění [81]

Spc – „aritmetický průměr zakřivení piku (arithmetic mean peak of curvature), aritmetický průměr principu zakřivení piku uvnitř definované plochy“[41] „po Wolfově pročištění 5 % Sz“.[42]

Sds – hustota piků (density of peaks), počet piků na jednotku plochy, kde se započítává každý pik převyšující osm sousedních.[45]

Ssc – aritmetický průměr zakřivení piku (arithmetic mean peak of curvature), kde se započítává zakřivení každého piku vybraného metodou Sds.[45]

Jsou prováděny i další experimenty v určování hustoty piků. Například daný pik je započítán převyšuje-li tři, čtyři nebo devět sousedních výstupků atd. V praxi však nenašli uplatnění a norma ISO 25 178 – 2 definuje jako základní parametr Spd.

1.4 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU



Obr. 23 Profiloměr Surtronic S při měření drsnosti povrchu dutiny součásti [80]

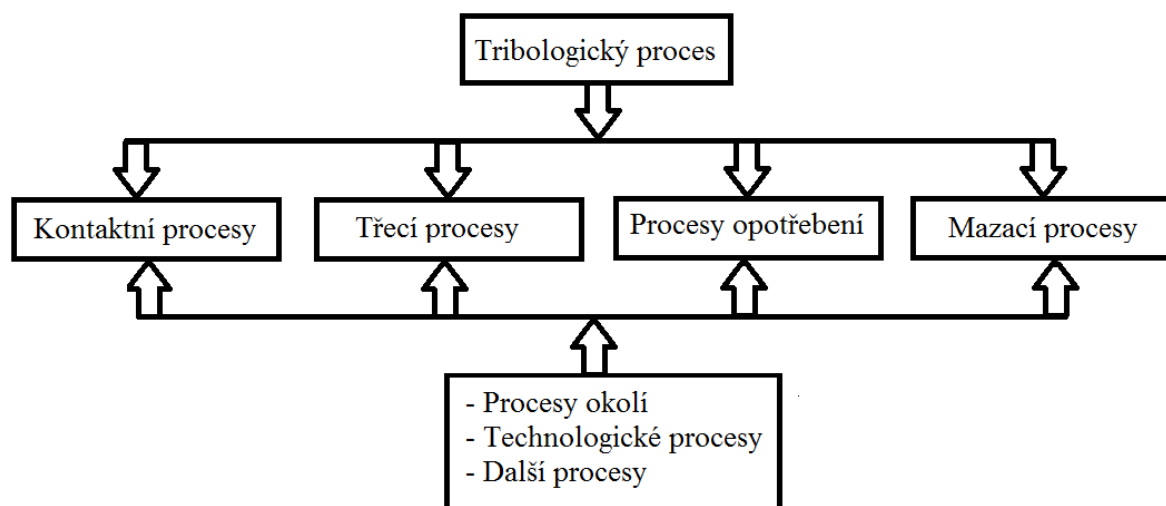
Měření drsnosti povrchu se provádí pomocí 2D nebo 3D profilometrů. Dnešní profilometry jsou vysoce sofistikované přístroje poskytující ucelený měřicí systém splňující technickou úroveň, ale i praktické požadavky uživatelů. Trh obsahuje celou škálu těchto přístrojů, lišícími se v rozsahu a přesnosti měření. Většina těchto profilometrů je nenáročná na obsluhu a umožňuje automatické vyhodnocení měření již použitým přístrojem. Pro lepší zpracování výsledků firmy poskytují softwarovou podporu, která poskytuje komplexnější vyhodnocení povrchu, včetně tvarového a frekvenčního vyhodnocení nebo hustoty pravděpodobnosti souřadnic. [83]

Snímáním povrchu do 3D obrazu získáme skutečný náhled na povrch, což umožňuje lépe odlišit dva povrchy se stejným R_a a směr nerovností. To je zejména důležité např. u kluzných ložisek, kde při montáži ložisek ve špatném směru nerovností může dojít k vážné provozní poruše. 3D sken povrchu lze také použít pro simulaci funkce součásti. Je tedy

zdrojem informací pro zpětnou vazbu nebo případnou změnu geometrických parametrů, jenž by zajistily lepší podmínky součásti v provozu. Měření povrchu ve 3D nám dává lepší přehled o snímaném povrchu i rozsáhlejší možnosti pro hodnocení oproti 2D. Navzdory tomuto předpokladu stále platí, že 2D hodnocení pomocí profilu povrchu, zůstává nejčastěji používanou metodou kontroly jakosti povrchu, neboť technická nadřazenost prostorového snímání je drahá a časově náročná. Příkladem může být 3D snímek poškozeného díku ventilu o rozsahu 2000 profilů a rozměrech 2 x 0,5 mm, kdy celková doba snímání byla 90 minut. Navíc pro zjištění hloubky trhliny bylo třeba vytvořit 2D řez.[80][86]

2 TRIBOLOGIE KLUZNÝCH ULOŽENÍ

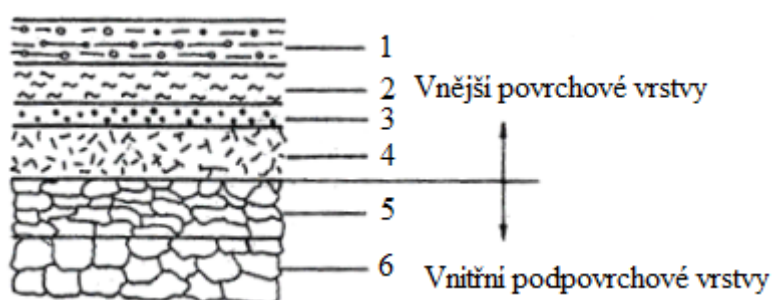
Věda, zabývající se chováním dotýkajících se povrchů a vzájemným pohybem těchto ploch, se nazývá tribologie. Tribologický proces tedy tvoří interakce zatížených těles, mezilátky (maziva) a okolí. Při tomto působení dochází k přeměně energií, materiálovým a třecím ztrátám a opotřebení. Snahou je minimalizovat tyto ztráty a předcházet opotřebení pomocí mazání, jehož účinek lze umocnit úpravou vlastních třecích povrchů či přidáním mazivostních přísad.[11][97]



Obr. 24 Tribologický proces [11]

2.1 TŘENÍ

Tření je odpor proti pohybu, vznikající v místě dotyku povrchů dvou k sobě přitlačovaných těles. Způsobuje ztráty energie, změny geometrie a struktury materiálu nejen na povrchu třecích ploch, ale i v podpovrchových vrstvách.[11]



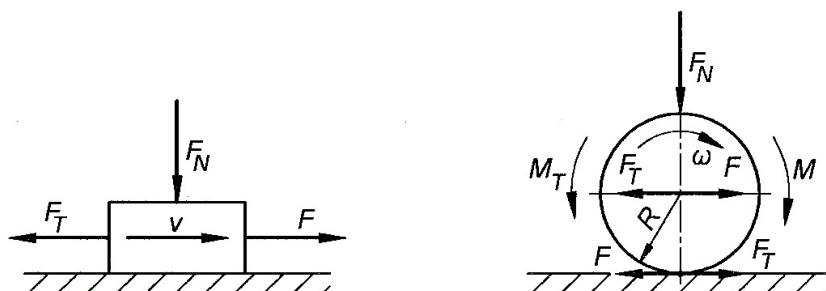
Obr. 25 Schématické znázornění povrchových a podpovrchových vrstev:

1 – vrstva maziva, 2 – vrstva vysrážených vodních par,
3 – vrstva absorbovaných plynů, 4 – vrstva oxidů, 5 – vrstva
vzniklá opracováním, 6 – původní základní materiál [11]

Rozeznáváme dva základní typy tření, kluzné a valivé.

KLUZNÉ TŘENÍ

Kluzné (smykové) tření vzniká mezi nepohyblivými a pohyblivými plochami součástí, které po sobě kloužou. Pohyblivé součásti mohou konat posuvný nebo rotační pohyb.[6][10]



Obr. 26 Kluzné tření [6]

Na kluzném tření jsou založena kluzná uložení jako [6]:

- kluzná ložiska,
- uložení hřídelí,
- uložení ojnic a čepů,
- kluzná vedení,
- třecí spojky,
- brzdy atd.

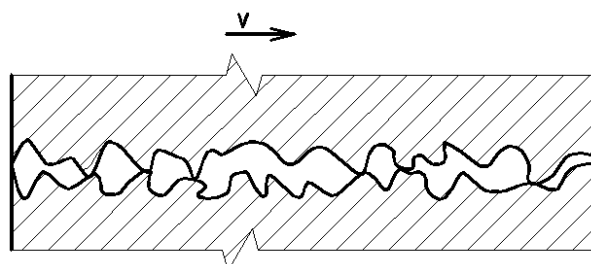
V technické praxi nastávají tyto hlavní oblasti kluzného tření [10]:

- suché tření,
- kapalinné tření
- mezní tření.

2.1.1 SUCHÉ TŘENÍ

Je třecí proces, při kterém jsou kluzné plochy bez maziva, popřípadě jsou mazána pouze tuhým (práškovým) mazivem. Mezi kluznými plochami dochází k přímému styku ploch, avšak pouze na vrcholcích nerovností povrchu. Skutečná velikost dotykové plochy je proto velmi malá a závisí na drsnosti povrchu a charakteristických stopách nástroje, použité technologie.[10]

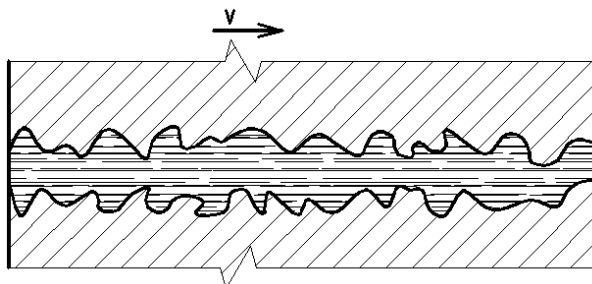
Již při malém zatížení vznikají velké kontaktní tlaky a plastické deformace. Tvrdší materiál se zatlačuje do měkčího a dochází k abrazivnímu opotřebení, vzniku svarů, jež mohou způsobit i zadření.[10]



Obr. 27 Suché tření [10]

2.1.2 KAPALINNÉ TŘENÍ

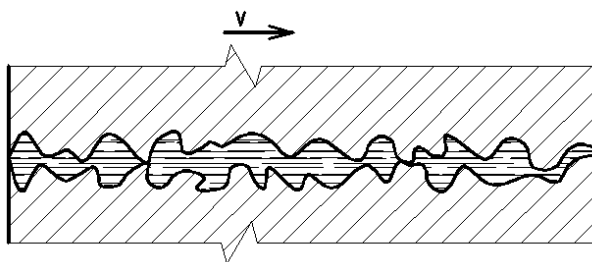
Při kapalinném tření dokonale oddělíme kluzné plochy souvislou vrstvou kapalného nebo plastického maziva. Nedochozí k opotřebení kluzných ploch, proces tření probíhá pouze ve vrstvě maziva. Únosnost je zajištěna hydrodynamickým či hydrostatickým mazáním.[10]



Obr. 28 Kapalinné tření [10]

2.1.3 MEZNÍ TŘENÍ

Mezi kluznými plochami se vytvořila vrstva maziva, které však nemá dostatečnou tloušťku, proto dochází v některých místech ke styku. Oproti suchému tření, však i při tomto styku lpí na povrchu molekuly maziva, které brání přímému kovovému styku a vzniku studených svarů.[10]



Obr. 29 Mezní tření [10]

2.2 PROCESY OPOTŘEBENÍ

Opotřebení se projevuje jako nevratná změna rozměrů a povrchu součástí. Tato změna je způsobena buď interakcí třecích povrchů, nebo třecího povrchu a média.[10][11]

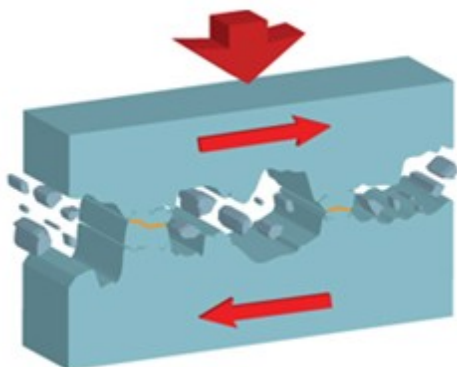
Základními druhy opotřebení jsou [11]:

- adhezivní,
- abrazivní,
- erozivní,
- korozivní,
- únavové,
- kavitační,
- vibrační.

V praxi se základní druhy opotřebení vyskytují osamocená jen zřídka, mnohem častější jsou jejich kombinace nebo jeden druh opotřebení přechází v jiný.[10][10][11]

2.2.1 ADHEZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

Nastává při čistém kovovém styku. Dochází k bodovým svarům, které jsou následně usmýknuty. Usmýknutí může být v rovině svaru nebo pod touto rovinou. Důsledkem je nalepování jednoho materiálu na druhý či vznik abrazivních částic, zvětšování drsnosti povrchu, nárůst tření a teploty. Dosáhne-li jeden z materiálů teploty tání, dojde k natavení kluzné plochy a následnému zadření. [10][11]



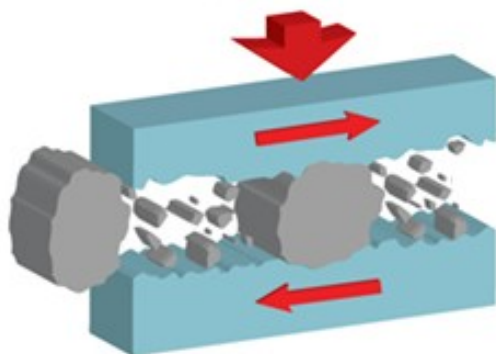
Obr. 30 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [141]



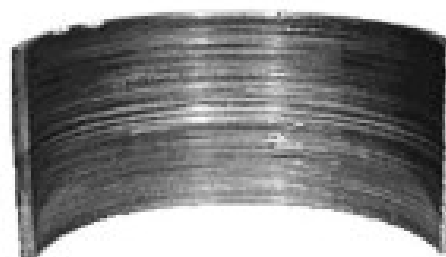
Obr. 31 Adhezivní opotřebení opotřebení kluzného ložiska [85]

2.2.2 ABRAZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

Výsledkem tohoto opotřebení jsou rýhy na povrchu. Ty jsou způsobeny vyřezáním materiálu z měkčího tělesa, částicemi o vysoké tvrdosti obsaženými v materiálu tvrdšího tělesa. Abrazivní opotřebení vzniká i při působení volných částic mezi kluznými povrchy, přivedenými z okolí (např. špatnou filtrací maziva) nebo oddělenými z jednoho z interagujících povrchů. [10][11]



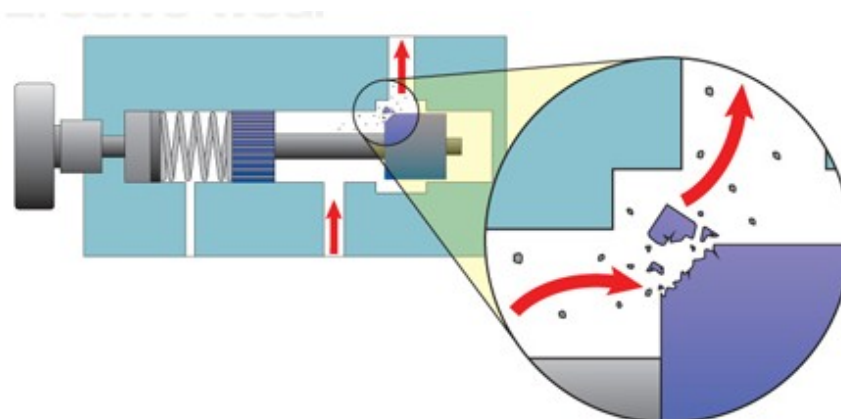
Obr. 32 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení [141]



Obr. 33 Abrazivní opotřebení ložiska [85]

2.2.3 EROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

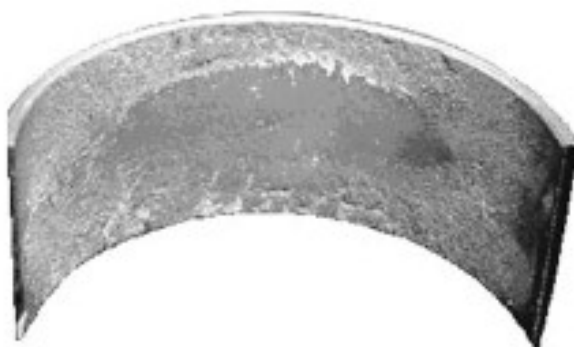
Je způsobeno vířením proudícího maziva, nejčastěji za povrchovými nerovnostmi (hrany, zvlnění atd.). Účinek erozivního opotřebení je umocňován obsahem nečistot v mazivu. U erozivního opotřebení ubývá materiál na nejnižších místech povrchu. [10][11]



Obr. 34 Schéma mechanismu erozivního opotřebení [141]

2.2.4 KOROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

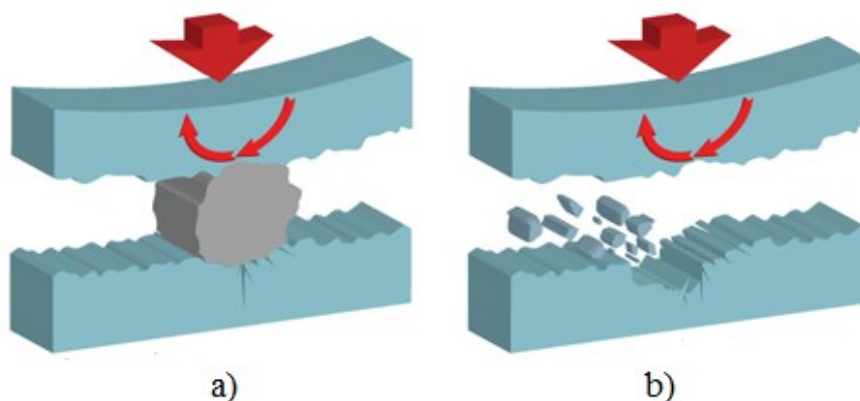
Poškození povrchu materiálu chemickými a elektrochemickými vlivy nazýváme korozivní opotřebení. Vzniká při stárnutí maziva či vniknutí kyslíku z okolí.[11][119]



Obr. 35 Korozivní opotřebení kluzného ložiska [85]

2.2.5 ÚNAVOVÉ OPOTŘEBENÍ

Při cyklickém namáhání vznikají v podpovrchové vrstvě materiálu mikroskopické trhliny. Dochází k růstu trhlín materiálem příčně i směrem k povrchu, kde se později spojí do pavučiny, začnou se drolit částice materiálu a vznikají pro toto opotřebení charakteristické důlky (pitting). Únavové opotřebení je nebezpečné zvláště u výstelkových materiálů, kde při dosažení opěrné ocelové vrstvy způsobí odlupování výstelky.[10][11]



Obr. 36 Schéma mechanismu únavového opotřebení: a) vznik a šíření únavových trhlín b) uvolňování částic z povrchu [141]



Obr. 37 Příklad poškození kluzného ložiska únavou materiálu [85]

2.2.6 KAVITAČNÍ OPOTŘEBENÍ

Kavitace je nežádoucí děj vyskytující se v kapalinách. V tlakově mazaných ložiscích kavitace vzniká v místech (změna průtočného průřezu, nevhodný tvar ložiskové vůle atd.), kde tlak klesne pod tlak nasycených par a vytvoří se kavitační bublina, která při svém zániku způsobuje hydrodynamické rázy, jež rozrušují povrch.[10][119]

2.2.7 VIBRAČNÍ OPOTŘEBENÍ

Konají-li součásti vůči sobě kmitavý nebo vratný relativní pohyb s malou amplitudou kmitání, může dojít k vibračnímu opotřebení. Při vibračním opotřebení otěrové částice oxidují (roste tvrdost) a způsobují abrazivní opotřebení. Oxidy barví poškozená místa typickou hnědočervenou barvou, v praxi hovoříme o „krvácení materiálu“.[11][119]

2.3 MAZÁNÍ

Je jedním z nejdůležitějších faktorů, jímž snižujeme tření, opotřebení a chráníme kluzné plochy před korozi. Mazání má velký vliv i na ekonomičnost, snižuje energetické ztráty, snižuje riziko poruch a zvyšuje celkovou životnost součástí. Jen z průzkumu ložisek vyplynulo, že 36 % poruch způsobí špatné mazání.[9][96]

2.3.1 MAZIVA

Maziva se dělí na tyto základní skupiny [9]:

- plynné,
- kapalně,
- plastické,
- pevné.

PLYNNÁ MAZIVA

Používají se ve vysokootáčkových vřetenech obráběcích a textilních strojů, ložiska s velkými kluznými rychlostmi, mazání čerpadel reaktorů a v dalších speciálních případech. Snášejí vysoké teploty (nad 300 °C), nepodléhají radioaktivnímu záření apod. Mezi plynná maziva patří např. technicky upravený vzduch, helium, dusík nebo oxid uhličitý.[7][9]

KAPALNÁ MAZIVA

Díky svým vlastnostem jsou nejpoužívanějším druhem maziv. Chemická stálost, snadné vylepšení vlastností pomocí přísad, široký rozsah viskozit, ale hlavně jejich skupenství, které umožňuje tvořit oběhy a tím snadný odvod tepla a nečistot.[7][9]

Existuje široký výběr kapalných maziv, avšak nejčastěji používané jsou mazací oleje. Ty rozdělujeme na [7][9]:

- minerální oleje
 - bez přísad,
 - maštěné oleje (živočišné přísady),
 - zušlechtěné oleje (chemické přísady),
- polysyntetické oleje,
- syntetické oleje.

PLASTICKÁ MAZIVA (MAZACÍ TUKY)

Po olejích druhá nejpoužívanější maziva jsou plastická. Plastické mazivo má vlastnost nenewtonské kapaliny. Za normálních provozních podmínek je to tuhá látka, která se začne chovat jako kapalina (teče) způsobí-li zatížení kritické napětí. Po snížení napětí dostává opět vlastnosti tuhé látky. Výhody vůči olejům jsou menší vytékání z ložiska a odstřík, lepší těsnost proti nečistotám.[9][7]

PEVNÁ MAZIVA

Pevná maziva využíváme při mezním tření za velmi vysokých teplot, kde nelze použít maziv jiných. Nejznámější je grafit, který snáší teplotu až 800 °C nebo sirník molybdeničitý.[9][7]

2.3.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MAZIV

O správné funkci maziva rozhodují jeho vlastnosti, dané základními složkami a přísadami použitými při výrobě.[9]

MAZACÍ SCHOPNOST

Zahrnuje vlastnosti maziva přilnout k mazanému povrchu a vytvořit mazací vrstvu, souvislou s dostatečnou únosností. Nelze ji udávat číslem, neboť záleží na celkových parametrech povrchu a provozních podmínkách.[7][9]

VISKOZITA

Jde o měřitelnou veličinu udávající míru vnitřního tření v oleji, jež zároveň zajišťuje únosnost mazací vrstvy v oblasti kapalinového tření.[7]

MAZNOST

Brání opotřebením, zmenšuje tření a slouží k posouzení olejové vrstvy, v oblasti mezního tření.[9]

CHEMICKÁ STÁLOST

Je odolnost vůči stárnutí oleje. Časem se v oleji tvoří pryskyřičnaté látky, které ucpávají mazací otvory a zanáší filtry.[9]

PENETRACE

Penetrace neboli konzistence se vyskytuje u tuhých maziv a je to míra tuhosti maziva.[9]

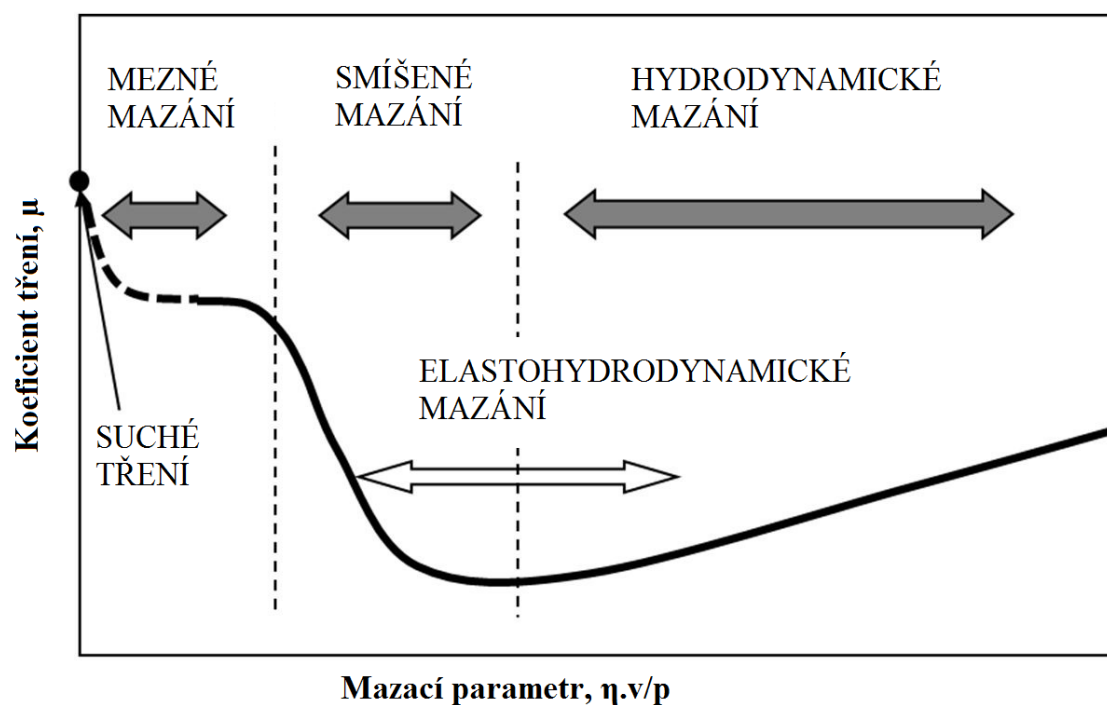
BOD SKÁPNUTÍ

Stanovuje teplotu, při které mazací tuk přechází do stavu tekutého.[9]

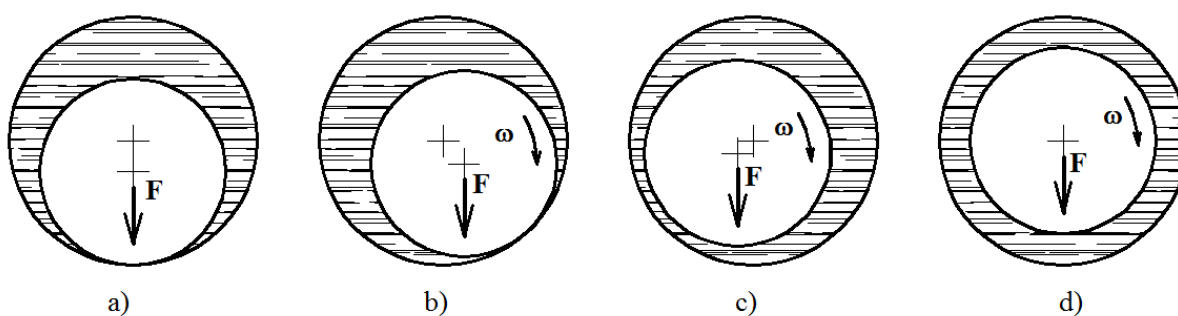
2.3.3 REŽIMY MAZÁNÍ

Podle vzniku a tloušťky mazací vrstvy, rozlišujeme režimy mazání na [8]:

- hydrodynamické,
- hydrostatické,
- elastohydrodynamické,
- mezní.



Obr. 38 Stribeckova křivka a oblasti mazání: η – dynamická viskozita maziva, v – relativní rychlost součástí, p – výpočtový tlak mezi stykovými plochami [61]



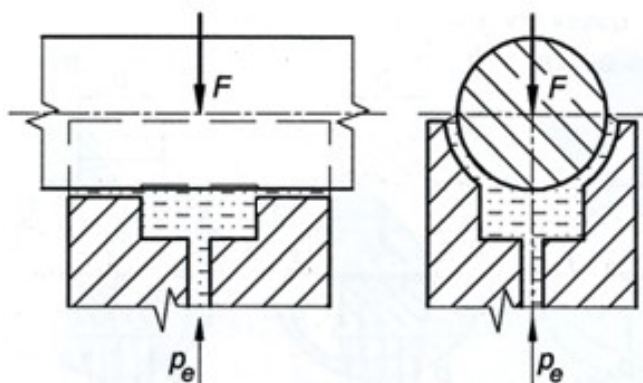
Obr. 39 Hydrodynamické mazání: a) $\omega = 0$ b) ω je velmi malé (mezní mazání) c) hydrodynamické mazání d) $\omega = \infty$ [10]

HYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

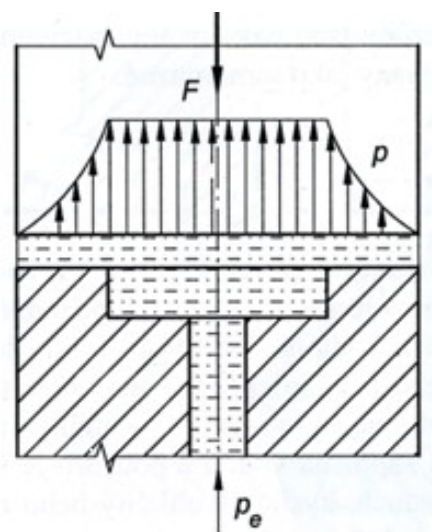
Vzniká při dostatečné relativní rychlosti kluzných součástí a nepřetržité dodávce maziva. Mazivo je stlačováno mezi třecí povrchy a vytvoří vrstvu maziva, která dokonale oddělí kluzné plochy (viz obr. 39). Únosnost vrstvy maziva závisí na velikosti dosaženého tlaku, jehož velikost ovlivňuje hlavně rychlost pohybu. U hydrodynamického mazání působí kapalinné tření. Typickým příkladem hydrodynamického mazání je mazání vřeten obráběcích strojů při vysokých otáčkách.[8][74]

HYDROSTATICKÉ MAZÁNÍ

U hydrostatického mazání je zapotřebí pro dosažení stabilní vrstvy maziva, která oddělí kluzné povrchy a umožní kapalinné tření, zajistit dodávku maziva z vnějšího zdroje o určitém tlaku. Velikost tlaku závisí na viskozitě maziva, požadované tloušťce vrstvy maziva a přenášeném zatížení. Hydrostatického mazání používáme u kluzných vedení a ložisek s nízkou kluznou rychlostí.[6][8]



Obr. 40 Radiální kluzné ložisko s hydrostatickým mazáním [6]



Obr. 41 Axiální kluzné ložisko s hydrostatickým mazáním [6]

ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

Při vzájemném odvalování těles pod vysokým zatížením dochází k přitlačení a zploštění jejich stykových ploch, ale nedochází ke styku kovů. Vzroste viskozita maziva, která se po převalení valivého tělesa vrací do původního stavu, stejně jako tvar stykových ploch. Elastohydrodynamické mazání se vyskytuje např. u valivých ložisek či ozubených kol.[8][74]

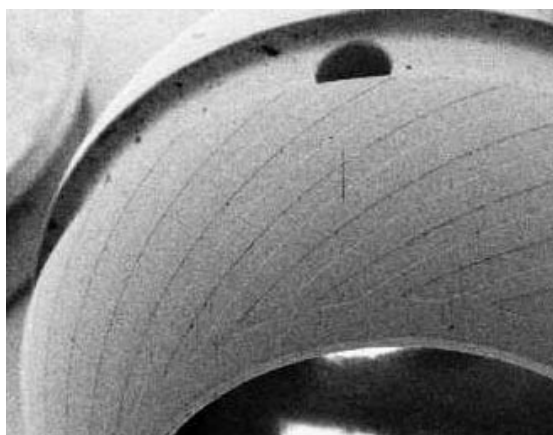
MEZNÉ MAZÁNÍ

Je-li tloušťka mazací vrstvy nedostatečná nebo dojde k protržení mazacího filmu, dochází k přímému styku kluzných ploch a meznímu tření, hovoříme o mezním mazání. Ztrátu tloušťky mazacího filmu způsobu zvýšení zatížení, pokles rychlosti, nízká viskozita maziva způsobená vrůstem teploty. Příkladem mezního mazání jsou kluzná ložiska při rozběhu a doběhu stroje, kdy rychlost není dostatečná pro vytvoření hydrodynamické vrstvy maziva (viz obr. 39 - b).[8][74]

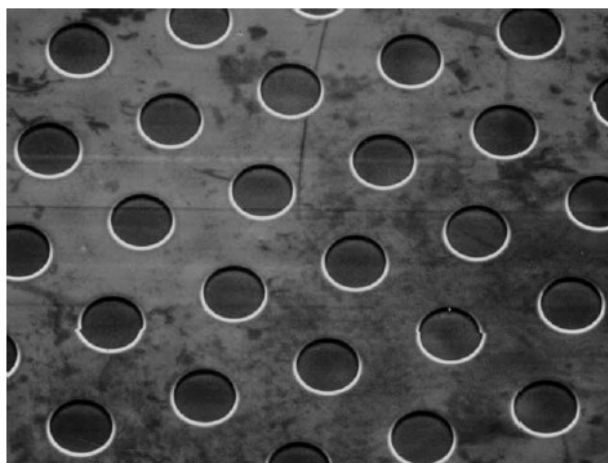
2.3.4 TEXTUROVÁNÍ POVRCHU POMOCÍ LASERU

Neustálá snaha o snižování tření a moderní technologie, daly za vznik úpravě povrchu pomocí laseru. U kluzných ploch se snažíme o co nejhladší povrch s minimální drsností Ra, jež spolu s hydrodynamickým režimem mazání zajistí nízké tření mezi kluznými plochami a s tím spojené malé opotřebení a dlouhou životnost součásti. Výzkum však prokázal, že vytvořením pravidelných mikrostruktur pomocí laseru na povrchu součásti, lze dosáhnout ještě lepších provozních parametrů, než u netexturovaného povrchu a v některých případech několikanásobně zvýšit životnost součásti.[50][65]

Textura povrchu se vyrábí ve formě drážek nebo důlků. Tyto mikro vzory slouží jako mazací kapsy, snižují abrazivní opotřebení (abrazivní částice uvízne v důlku) a působí jako hydrodynamické kapsy, čímž usnadňují vznik mazacího filmu či rozvod maziva.[50][54][65]



Obr. 42 Drážky na kulovém ložisku [65]



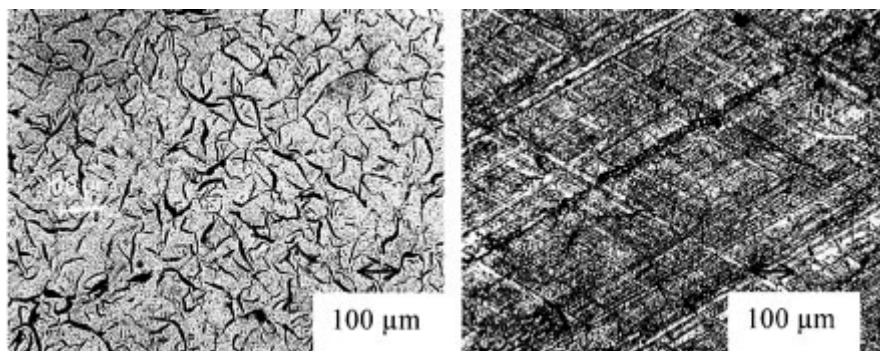
Obr. 43 Půlkulové důlky na povrchu ložiska [65]

O správné funkci mikro vzorů rozhoduje jejich geometrie a rozložení. Příliš velký rozměr vtisku může narušit kluzné podmínky při zvyšujících se rychlostech. Nedochází k rozložení oleje po celé ploše povrchu, nýbrž dochází k hromadění oleje v blízkosti důlků.[50][54]

Velký význam může úprava povrchu pomocí laseru nabýt v automobilovém průmyslu, texturováním pístního kroužku nebo vložky válce. Snížením tření v soustavě píst – válec, snížíme spotřebu paliva a otěr.[52][93]

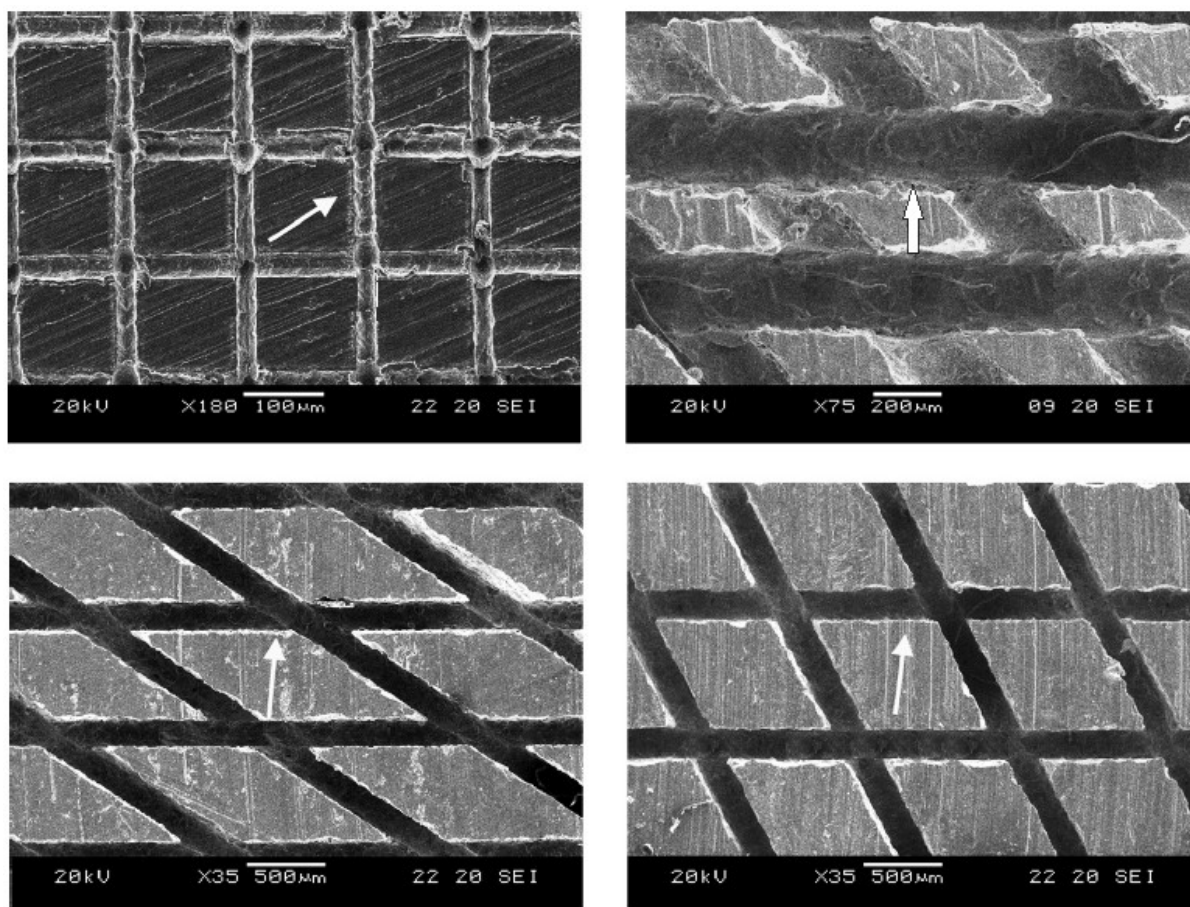
Rychlost pístního kroužku se v horní a dolní úvrati blíží k nule a tloušťka olejového filmu se u nových motorů pohybuje kolem 1 μm . V horní a dolní úvrati dochází k nedostatečnému zásobování mazivem (hladovění) a dochází ke zvýšenému tření, opotřebení a může dojít k zadření. V literatuře [93] bylo použito texturování na povrch pístního kroužku. Poté byly simulovány podmínky motoru. Při ošetření plochy texturou dojde k výraznému snížení tření až o 40 %, optimální hloubka mazací kapsy byla stanovena na 10 – 11 μm . [93]

Při druhém experimentu [52] byl ošetřen přímo povrch válce v inkriminovaných místech a byla využita heterogenita litiny. Laserem dochází k odpařování kovu, aby výsledný povrch měl vysokou hustotu uhlíkových lamel. Uhlík je dobré mazivo a izolant. Vzniklé otvory jsou vyplněny olejem a oblast blízko otvorů se stává tvrdší a odolnější proti opotřebení. Výsledkem je větší hydrodynamický režim, olej zůstává po delší čas v kontaktu s plochou, naměřená hodnota tření je nižší a zvýšila se i celková životnost součástí.[52]



Obr. 44 Struktura povrchu litiny a struktura povrchu otvoru po laserovém ošetření [52]

Úprava povrchu texturováním pomocí laseru je nová progresivní metoda, díky níž lze dosáhnout lepších hodnot tření a zvýšit životnost a únosnost kluzných součástí. Lze ji aplikovat na jakýkoli materiál: tvrzené oceli, polymery, krystalické struktury či keramiku. Texturování se provádí pomocí CO₂ nebo Nd: YAG laserů, na infračervené bázi. Součást je vystavována nadměrnému tepelnému účinku, a proto následuje žíhání nebo obrábění laserem probíhá v absorpčním prostředí. Tepelnému účinku laseru se lze vyhnout použitím laseru na ultrafialové bázi.[50][65]



Obr. 45 Další vzory textury povrchu: šipky znázorňují směr tření povrchu [68]

3 KLUZNÁ LOŽISKA

Stejně jako valivá ložiska i kluzná ložiska jsou strojní součásti, umožňující přenos rotačního pohybu z hřídelí a čepů a zajišťující jejich uložení. Využívají kluzného tření a oproti valivým ložiskům mají své výhody i nevýhody[8][9]:

- + jednodušší výroba,
- + levnější,
- + menší průměr ložisek,
- + lépe snáší změnu zatížení, otřesy, prach, vibrace atd.,
- + umožňují vyšší přesnost uložení,
- + přenáší vyšší zatížení,
- + možnost oprav,
- + tichý chod,
- vyšší součinitel tření,
- menší únosnost při rozběhu a nízkých kluzných rychlostech,
- vyšší nároky na mazání a vyšší spotřeba maziva,
- potřeba záběhu.

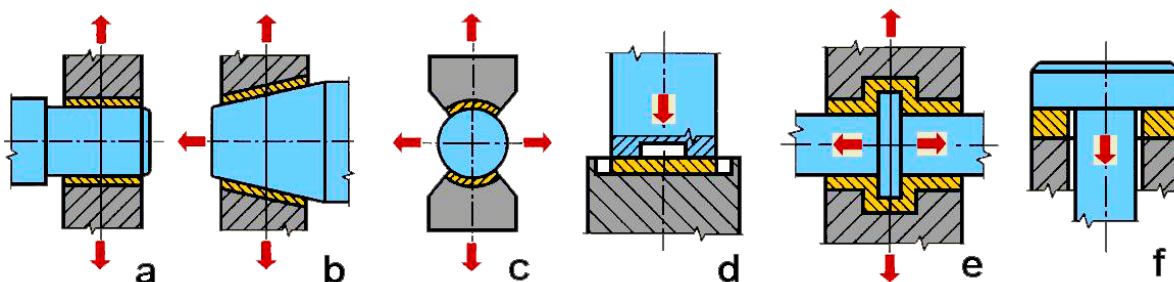
3.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ KLIZNÝCH LOŽISEK

Kluzná ložiska lze rozdělit podle různých hledisek do několika skupin.

Rozdělení kluzných ložisek dle směru působící síly [66]:

- radiální,
- axiální,
- radiálně-axiální (kombinovaná).

Radiální kluzná ložiska přenáší zatížení pouze v radiálním směru (kolmo k ose ložiska). Axiální ložiska jsou schopna přenášet zatížení v axiálním směru (ve směru osy ložiska). Pro přenos zatížení v obou směrech se používá ložisek kombinovaných (kulové, kuželové, hřebenové).[66][67]



Obr. 46 Kluzná ložiska: a) válcové, b) kuželové, c) kulové, d) patní, e) hřebenové, f) prstencové [66]

Rozdělení podle konstrukce [7]:

- pouzdra (nedělená),
- pánve (dělené).

Pouzdro je jeden z nejrozšířenějších druhů kluzných ložisek. Jedná se o nedělené ložisko válcového tvaru. Toto ložisko je jednoduché konstrukce, snadno vyrobitelné. Nevýhodou je montáž, pro niž je potřeba použít lisovací zařízení a zajistit dobrý přístup k ložiskovým domkům.[7]



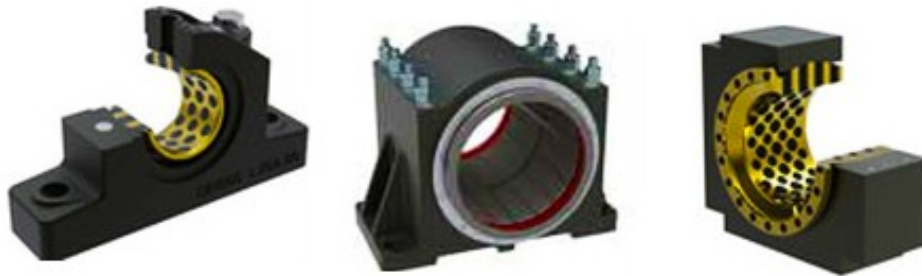
Obr. 47 Kluzná pouzdra [134]

Pánev je část kluzného ložiska, úplné kluzné ložisko se skládá ze dvou a více pánví. Rozdělení umožňuje snazší montáž ložiska, ložisková tělesa jsou dělená. Pánve se používají pro těžko přístupná místa, spalovací motory, kompresory, válcovací stolice atd. Po demontáži lze pánev znovu použít, což se u pouzder nedoporučuje.[7]



Obr. 48 Ložiskové pánve [125]

Montáž kluzných pouzder a pánví se provádí do ložiskových domků (těles).[66]

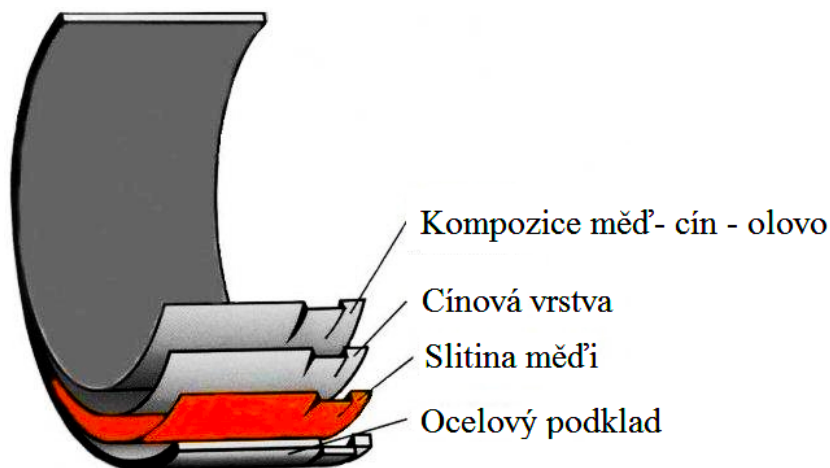


Obr. 49 Ložiskové domky [124]

Rozdělení podle provedení [7]:

- bez výstelky (jednovrstvá),
- s výstelkou (vícevrstvá).

Kluzná ložiska bez výstelky jsou celá vyrobená z kluzného materiálu. Vícevrstvá ložiska se skládají nejméně ze dvou vrstev, tvořených různými materiály. Základní vrstva je z ocelového materiálu, která zaručí mechanické vlastnosti. Na ní je nanesená výstelka z materiálu zaručující kluzné vlastnosti, mosazi, bronzy, slitiny hliníku, teflon atd. Výstelka díky své tloušťce 0,3 – 1 mm snižuje množství použitého drahého kluzného materiálu a vzhledem k použití ocelového podkladu umožňuje použití kluzných materiálů, které se pro jednovrstvá ložiska nehodí. Výstelka se vyrábí odléváním na ocelový podklad nebo zakružováním z bimetalových plechů.[7]



Obr. 50 Čtyřvrstvá pánev [117]

Rozdělení podle způsobu mazání [7]:

- samomazná
 - s tuhým mazivem,
 - pórovitá (sycená mazivem),
- s omezeným mazáním,
- hydrostatické nebo aerostatické,
- hydrodynamické nebo aerodynamické.

Samomazná kluzná ložiska obsahují mazivo ve svojí struktuře v tuhé nebo tekuté formě. Tato ložiska se vyrábí práškovou metalurgií nebo leptáním povrchu materiálu kyselinou a následným mořením v oleji.[7]

Ložiska s omezeným mazáním potřebují pro svou funkci většinou pouze počáteční mazání či vyžadují-li to provozní podmínky, mazání po určitých časových intervalech. Pro omezené mazání se používají zejména ložiska obsahující plasty.[7]

Hydrostatické mazání je zajištěno pomocí čerpadla, jež zajistí dostatečný tlak v kapalině, pro vytvoření olejové vrstvy. Při hydrodynamickém mazání zajistí vrstvu olejového filmu dostatečná rychlost kluzných součástí.[7]

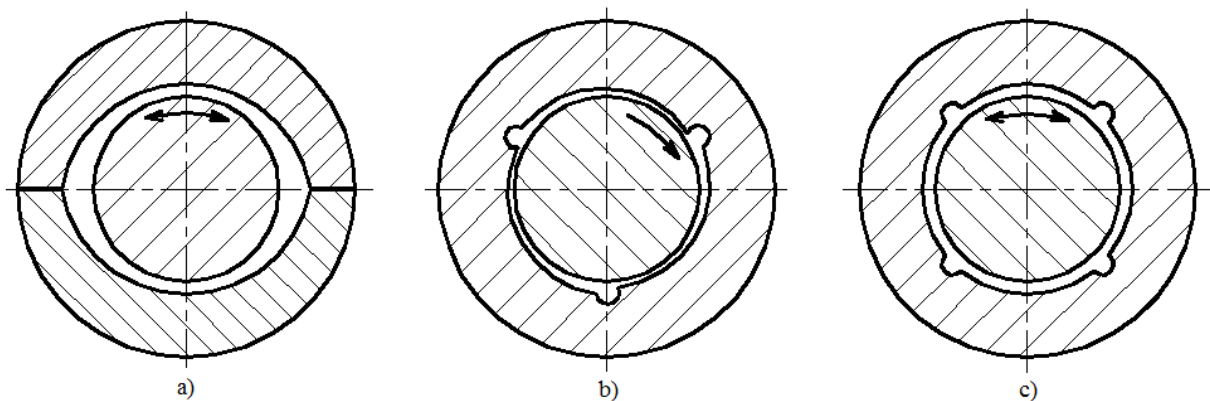
Rozdělení podle technologie výroby [7]:

- spěkaná,
- odlévaná,
- tvářená,
- obráběná.

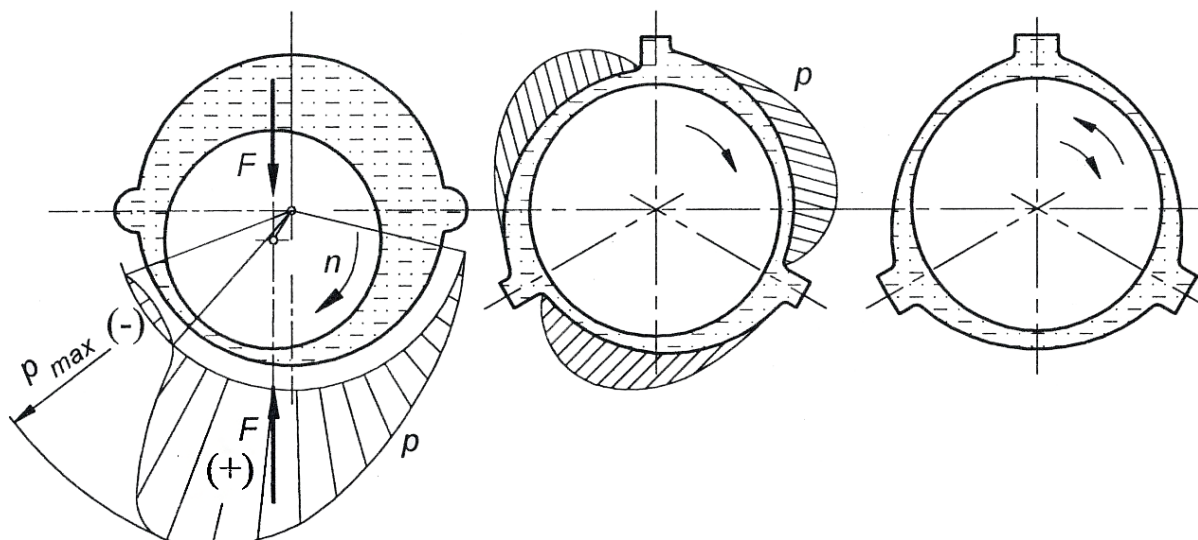
3.2 DALŠÍ KONSTRUKCE KLIZNÝCH LOŽISEK

3.2.1 VÍCEPLOCHÁ LOŽISKA

Mají po svém obvodu dvě, tři nebo více drážek, zajišťujících tlakové předpětí. To má za účinek vznik více hydrodynamických vrstev, rozložení tlaku a větší stabilitu čepu v ložisku. Používají se hlavně u ložisek pro vysoké rychlosti nebo u ložisek, kde by hůře vznikala hydrodynamická vrstva.[6][10]

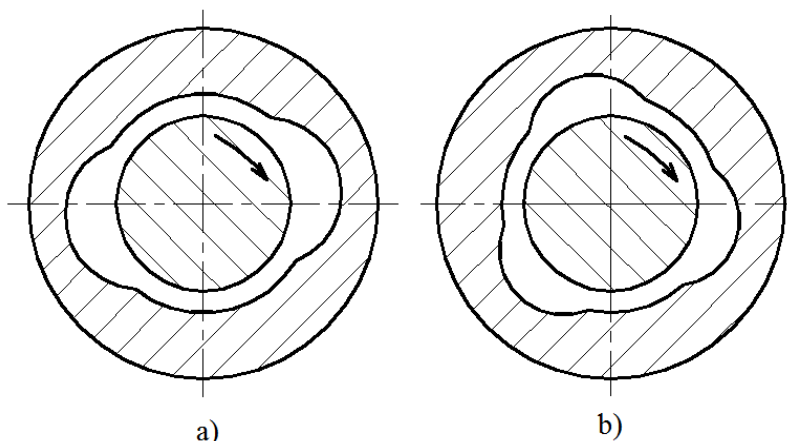


Obr. 51 Víceplochá ložiska: a) citronové, b) tříploché pro jeden směr otáčení, c) čtyřploché pro obousměrné otáčení [10]



Obr. 52 Víceplochá radiální ložiska a jejich rozložení hydrodynamického tlaku [6]

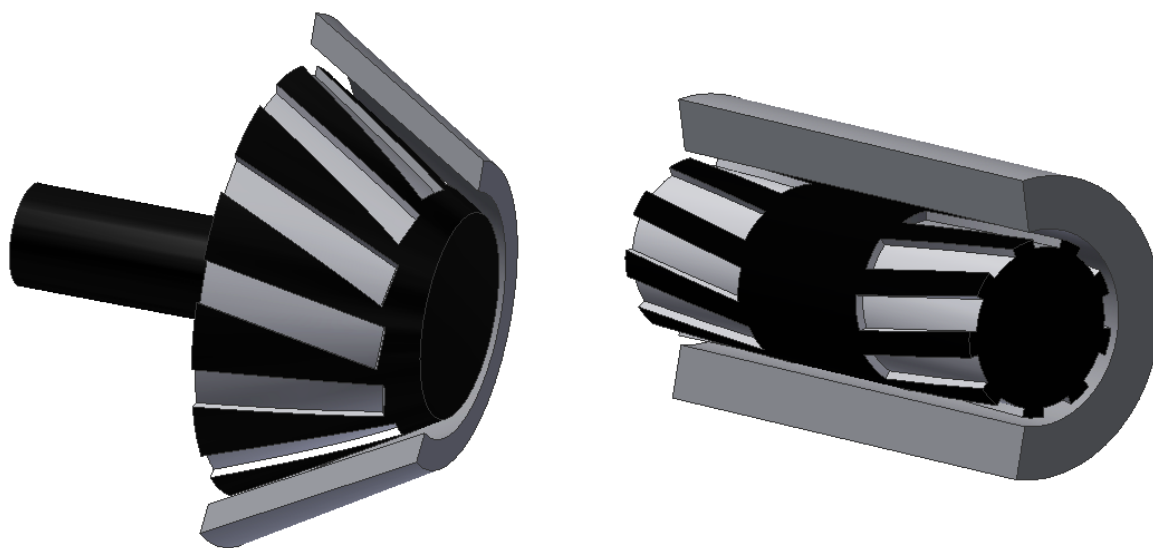
U aerodynamických ložisek je použití více ploch nutností, neboť plyny mají mnohem nižší dynamickou viskozitu než kapaliny. Drážky aerodynamických ložisek mají větší poloměr, oproti hydrodynamickým a jejich úkolem je vracet čep při běhu zpět do středu, zajistit jeho stabilitu.[139]



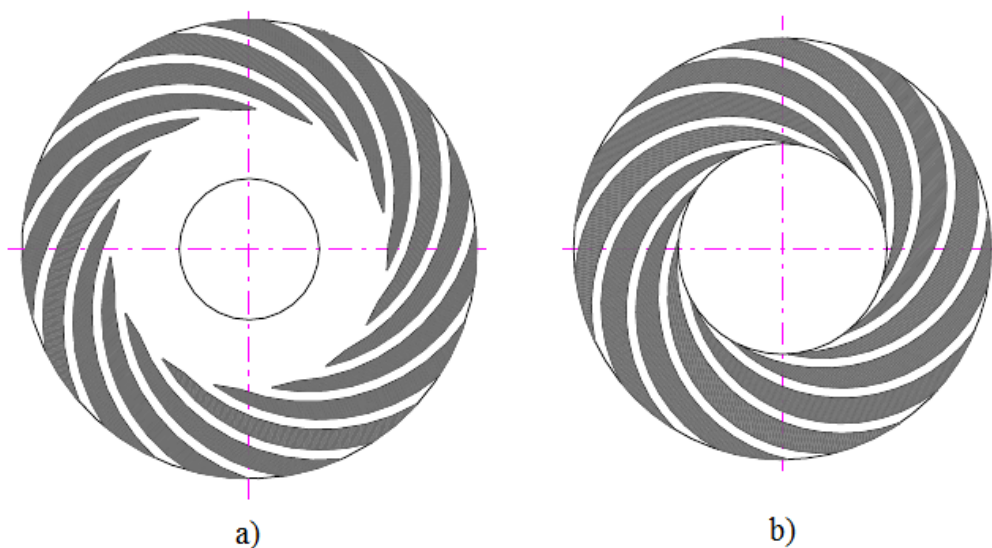
Obr. 53 Radiální aerodynamické víceploché ložiska:
a) s dvěma kapsami b) se třemi kapsami [139]

3.2.2 LOŽISKA SE SPIRÁLNÍMI DRÁŽKAMI

Nachází uplatnění hlavně u vzduchem mazaných ložisek. U radiálních ložisek jsou do hřídelového čepu vyrobeny drážky ve tvaru spirály nebo šípu, u axiálních ložisek se drážky aplikují častěji na pouzdro. Drážky zajišťují přívod média přímo mezi kluzné plochy, vytváří tlak, který zvyšuje únosnost ložiska a stabilitu čepu. Nevýhodou je vyšší přesnost uložení a malá vůle, takže je nutno dát pozor na teplotní dilatace.[77][139]



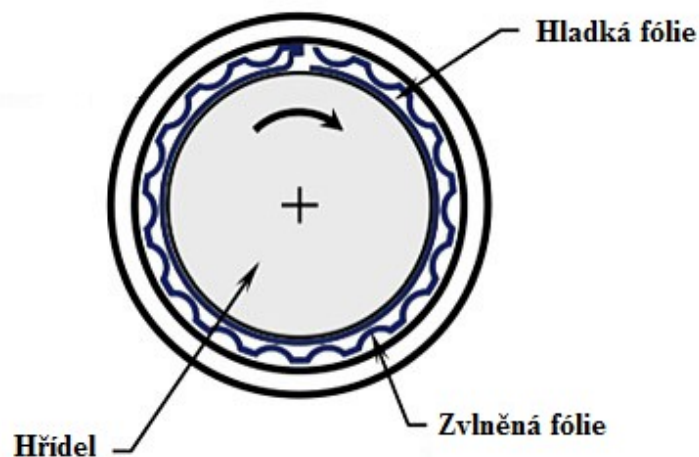
Obr. 54 Radiální ložiska se spirálními drážkami [77]



Obr. 55 Axiální ložiska se spirálními drážkami: a) s otvorem pro hřídel b) s uzavřeným středem [139]

3.2.3 FÓLIOVÁ LOŽISKA

Skládají se ze dvou fólií. Zvlněná fólie se z vnější strany dotýká pouzdra, bývá z materiálů s větší tuhostí. Vnitřní stranou je v kontaktu s druhou fólií, hladkou s dobrými kluznými vlastnostmi, neboť bude v kontaktu s hřídelí. Při běhu ložiska dochází vlivem tlaku (v olejovém nebo plyném filmu) k deformaci obou fólií tak, že vzniká mezera s optimální geometrií pro vznik hydrodynamického mazání. Vzniknou-li při provozu vibrace či chvění, dochází ke tření vlnité fólie o pouzdro a zároveň ke vzájemnému tření obou fólií, čímž dojde k útlumu vibrací. Pro svou vlastnost tlumit vibrace se fóliová ložiska hojně používají pro turbokompresory, mikroturbíny, plynové turbíny nebo jiné vysokorychlostní stroje.[88][139]



Obr. 56 Schéma radiálního fóliového ložiska [129]

3.2.4 MAGNETICKÁ LOŽISKA

Pracují na podobném principu jako elektromotor. Stator tvoří pouzdro z několika oddělených segmentů složených ze dvou pólů, na kterých je navinuta cívka. Rotor tvoří konec hřídele z feromagnetického kovu. Při průchodu proudu vzniká v ložisku síla, která nadnáší hřídel a umožňuje tak jeho otáčení na vzduchové mezeře. Aby nedošlo k dotyku hřídele s ložiskem a hřídel byl stále ve středu osy rotace, je proud regulován řídicí jednotkou na základě informací poskytnutými snímači polohy hřídele. Pro případ výpadku proudu či selhání řízení, musí být stroj opatřen kuličkovými ložisky pro nouzové zachycení rotoru.[70][139]



Magnetická ložiska nacházejí uplatnění hlavně u strojů pracujících při nízkých teplotách nebo vysokých otáčkách (až 250 m.s^{-1}) např. vřetena obráběcích strojů.[70]

Obr. 57 Radiální magnetické ložisko [70]

3.2.5 SEGMENTOVÁ KLUZNÁ LOŽISKA

Jsou ložiska, kde kluzná plocha je tvořena z více částí tzv. segmentů. Konstrukce pomocí segmentů se nejčastěji používá pro axiální ložiska. Segmenty mohou být v provedení napevno nebo jako naklápěcí. Segmenty umožňují vznik hydrodynamické vrstvy, ta vzniká pod každým segmentem, což má za následek rozložení tlaku podobně jako u víceplochých ložisek. Naklápěcí segmenty navíc mohou reagovat na aktuální podmínky provozu a přizpůsobit se jim. Segmentová ložiska se používají pro přenos velkých zatížení a vysoké rychlosti.[9]



Počet segmentů pro radiální ložiska se pohybuje od tří do šesti, přičemž tři se používají pro ložiska mazaná vzduchem. U axiálních ložisek je z důvodu snadnější montáže povolen větší počet. Pro normální řadu až osmnáct a až dvanáct segmentů pro rozměrově velká a vysoce zatížená ložiska.[46]

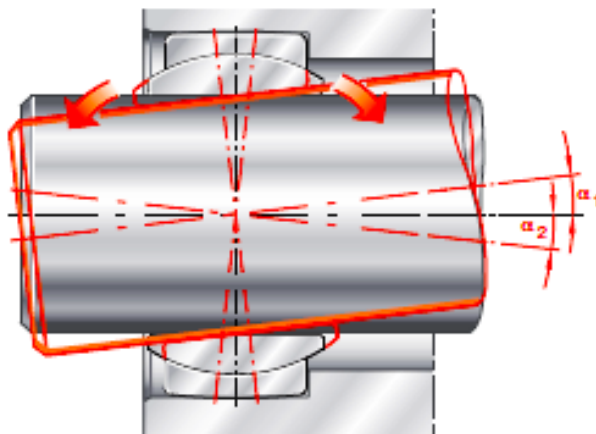
Obr. 58 Axiální segmentové ložisko [131]

3.2.6 SFÉRICKÁ, KLOUBOVÁ LOŽISKA

Skládají se z vnitřního kroužku s konvexní kulovou plochou a vnějšího kroužku s otvorem tvaru koule. Při montáži je vnitřní kroužek vsazen do vnějšího. Díky kulovým plochám lze vnitřní kroužek během rotace naklápět, čímž ložisko získává vysokou prostorovou pohyblivost. Modifikací sférického ložiska jsou kloubové hlavice, používané nejčastěji v hydraulice.[94]



Obr. 59 Sférické ložisko [133]



Obr. 60 Naklápění hřídele ve sférickém ložisku [94]



Obr. 61 Kloubové hlavice [138]

4 MATERIÁLY KLUZNÝCH LOŽISEK

Volba materiálu kluzného ložiska závisí zejména na provozních a nouzových podmínkách. Nouzovými podmínkami se rozumí stav při nízkých otáčkách (hlavně rozběh a doběh stroje), kdy dochází k meznímu tření a ložisko je více náchylné k zadření. Kvalitní materiál tedy musí mít vysokou únavovou pevnost a pevnost v tlaku, jenž zajistí dostatečnou únosnost ložiska a zároveň se dobře přizpůsobovat povrchovým nerovnostem, mít nízkou teplotní roztažnost a schopnost pohltit volné částice, jež by způsobili abrazivní opotřebení. To znamená nízký bod tání a modul pružnosti a dostatečnou měkkost. Mimo tyto základní vlastnosti je dále vyžadována dobrá smáčivost mazivem, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení, co nejnížší koeficient tření, snadná obrobitelnost a samozřejmě nízká cena. Některé tyto výše uvedené vlastnosti jsou protichůdné a ložisko z jednoho materiálu je nemůže splnit, a proto se používá výstelek či vícevrstvých ložisek. Při tomto konstrukčním řešení je třeba použít materiál s dobrou zabíhavostí, aby došlo k pevnému spojení mezi základním materiálem a výstelkou.[8][9] [72]

4.1 ZÁKLADNÍ KOVOVÉ MATERIÁLY

4.1.1 CÍNOVÉ A OLOVĚNÉ KOMPOZICE

Cínové kompozice (slitiny cínu, antimónu, mědi a případně olova) a olověné kompozice (slitiny olova, antimónu, cínu a mědi) se vyznačují měkkostí a velmi dobrými kluznými vlastnostmi i při nouzových podmínkách. Ovšem kvůli ceně a nízké pevnosti v tahu se používají jako výstelkový materiál. Tloušťka výstelky by neměla překročit 0,1 mm, aby nedošlo ke snížení odolnosti proti opotřebení. Výstelka se provádí nejčastěji pomocí odstředivého lití, které zajistí dokonalé metalurgické spojení styčných ploch.[7][10]

Do kluzného ložiska z cínové či olověné kompozice, patří broušený čep s drsností povrchu $Ra \leq 0,2$. [10]

Charakteristické vlastnosti [9][10][72]:

- + velmi dobrá kluznost,
- + nízký součinitel tření,
- + pro oblasti mezního tření i vysokých otáček,
- + odolnost proti rázům,
- + korozivzdorné (cínové kompozice),
- + pohlcují abrazivní částice,
- + nízká tvrdost a přizpůsobivost hřídelovému čepu,

- nízká pevnost v tahu (50 – 100 MPa),
- nízká mez únavy,
- provozní teplota (max. 110 °C),
- vyšší součinitel teplotní roztažnosti,
- nutnost antikoročních aditiv v oleji (olověné kompozice).

Tab. 1 Informativní hodnoty vybraných fyzikálních vlastností a tvrdosti pro olověné kompozice [35][36][37]

Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Interval tavení [°C]	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]	Tvrdost dle Brinella [HB]
PbSn6Sb6 (ČSN 42 3730)	9,8	240 – 280	24,0	20,934	20
PbSn6Sb14CuAs (ČSN 42 3721)	9,8	245 – 420	22,0	27,214	24
PbSn10Sb15Cu1 (ČSN 42 3720)	9,2 – 9,4	235 – 380	24,5	25,121	-

Tab. 2 Informativní hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických vlastností pro cínové kompozice [38]

Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Interval tavení [°C]	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]	Tvrdost dle Brinella [HB]
SnSb10Cu3Ni (ČSN 42 3753)	7,4	235 - 350	22	35,588	26
Modul pružnosti $E \cdot 10^{-3}$ [MPa]	Max. zatížitelnost [MPa]	Max. přípustná teplota [°C]			
48	24	110			

4.1.2 MATERIÁLY ZE SLITIN MĚDI

Slitiny mědi se nejčastěji používají jako výstelky, ale díky vysoké pevnosti a mezi únavy mohou tvořit i celé ložisko. Tyto materiály se hodí pro kluzné rychlosti do 10 m.s⁻¹ a vysoké provozní teploty, kde horní hranice většinou bývá omezena až maximální přípustnou teplotou maziva.[7]

Materiály ze slitin mědi lze rozdělit na [10][7]:

- cínové bronzy,
- olověné a cínolověné bronzy,
- hliníkové bronzy,
- mosazi.

Ložiska vyrobená z bronzů jsou velice tvrdá, proto by měla mít velmi kvalitní povrch, $R_a \leq 0,3$. Také čep hřídele musí být broušený s $R_a \leq 0,2$ a tvrdostí alespoň o 100 HB větší než materiál pouzdra.[10]

CÍNOVÉ BRONZY

Dodávají se ve formě trubek, pro jednovrstvá ložiska nebo je lze také odlévat jako výstelky. Ložiska z cínových bronzů mají vysokou mez pevnosti a tvrdost. Při provozu musí mít dostatečné mazání, neboť při mezním tření způsobí jejich tvrdost opotřebení čepu.[7]

Charakteristické vlastnosti [7][9][72]:

- + vysoká mez pevnosti (300 – 600 MPa),
- + dovolený tlak 25 MPa (krátkodobě 52 MPa),
- + maximální přípustná teplota 250 °C,
- + výborné protiúnavové vlastnosti,
- + dobrá korozivzdornost,
- nouzové vlastnosti,
- vysoká tvrdost,
- nutnost kvalitního mazání,
- nízká odolnost proti rázům,
- vysoká cena mědi.

Tab. 3 Informativní hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických vlastností pro cínové bronzy [16][17][18][19][22]

Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Modul pružnosti v tahu $E \cdot 10^{-3}$ [MPa]	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
CuSn6 (ČSN 42 3016)	8,8	98 – 108	17,7	54,4
CuSn8 (ČSN 42 3018)	8,8	98 – 118	18,2	46,1
CuSn10 (ČSN 42 3119)	8,8	93,2	18,9 – 20,0	62,8
CuSn10Zn2 (ČSN 42 3138)	8,8	103,9	17,6	58,6
CuSn10P1 (ČSN 42 3120)	8,6	118,7	19,0	62,8
CuSn12 (ČSN 42 3123)	8,8	103,9	18,0	58,6

Tab. 4 Informativní hodnoty mechanických vlastností materiálů z cínového bronzu [18][19][22][25]

ČSN	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Minimální tažnost A_5 [%]	Tvrdost dle Brinella [HB]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]
42 3119	250	8	80	160
42 3138	250	8	75	140
42 3120	250	4	90	150
42 3123	280	5	85	170

Tab. 5 Informativní hodnoty mechanických vlastností materiálu 42 3016 a 42 3018 po různé tepelné úpravě [16][17]

ČSN	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Minimální tažnost A_{10} [%]	Tvrdość dle Brinella [HB]
42 3016.01	300	45	70 – 120
42 3016.21	390	20	120 – 160
42 3016.31	490 – 590	10	150 – 180
42 3018.01	410	45	80 – 130
42 3018.21	490	20	120 – 170
42 3018.31	540 – 640	10	160 – 190

OLOVĚNÉ A CÍNOOLOVĚNÉ BRONZY

Tyto materiály se vyznačují velmi dobrými kluznými vlastnostmi a vysokou mezí únavy. Přidáním cínu mez únavy ještě vzroste, materiál má lepší korozivzdornost, zároveň roste i tvrdost. Olověné a cínoolověné bronzy jsou vhodné pro vícevrstvá ložiska.[7]

Charakteristické vlastnosti [7][9][72]:

- + výborné protiúnavové vlastnosti,
- + dovolený tlak 18 MPa (krátkodobě 36 MPa),
- + přípustná teplota 220 °C (olověný bronz 160 °C),
- + dobrá odolnost proti rázům,
- + vysoká tepelná vodivost,
- průměrné nouzové vlastnosti,
- průměrná korozivzdornost,
- neekologické (olovo).

Tab. 6 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z cínoolověných bronzů [23][24][20][21]

ČSN	Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
42 3135	CuSn5Pb5Zn5	8,6	18,8	79,5
42 3137	CuSn8Pb3Zn6	8,8	18,0	58,6
42 3121	CuSn10Pb5	8,9	18,0	62,8
42 3122	CuSn10Pb10	8,9	20,0	54,4
Tvrdość dle Brinella [HB]	Modul pružnosti v tahu $E \cdot 10^{-3}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Minimální tažnost A_5 [%]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]
65	101,0	180	6	130
70	103,9	190	5	110
65	98,1	200	12	140
65	97,1	180	8	120

Tab. 7 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z olověných bronzů [27][28][29][30][31]

ČSN	Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Součinitel teplotní rotažnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
42 3182	CuPb20	9,6	18,4	159,1
42 3183	CuPb22Sn3	9,6	18,4	71,2
42 3184	CuPb30	9,6	18,4	142,4
42 3187	CuPb30Ag1,5Sn	9,6	19,2	96,3
42 3188	CuPb30Ag3	9,6	19,8	117,2
Tvrdość dle Brinella [HB]	Modul pružnosti v tahu $E \cdot 10^{-3}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]		
30 – 45	82,4	-		
50 – 60	82,4	820		
28 – 45	73,5	-		
34	73,5	70		
33	73,5	70		

HLINÍKOVÉ BRONZY

Vyznačují se velmi vysokou tvrdostí, která zajišťuje větší měrné zatížení. Avšak na kluzných plochách vzniká oxid hliníkový (Al₂O₃), jenž působí jako brusivo. Z tohoto důvodu se hliníkové bronzы používají pro nižší kluzné rychlosti, vyžadují kvalitní mazání a použití velmi tvrdého hřídelového čepu.[10]

Charakteristické vlastnosti [7][10]:

- + velmi vysoká tvrdost,
- + vysoké tlakové zatížení (až 98 MPa),
- špatné kluzné vlastnosti,
- žádné nouzové vlastnosti,
- pro nízké kluzné rychlosti,
- na kluzných plochách vzniká Al₂O₃,
- nutnost použít velmi tvrdý hřídelový čep.

Tab. 8 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiál 42 3146 [26]

ČSN	Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Součinitel teplotní rotažnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
42 3146	CuAl10Fe3Mn1,5	7,3	20	50,2
Tvrdość dle Brinella [HB]	Modul pružnosti v tahu $E \cdot 10^{-3}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Minimální tažnost A_5 [%]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]
min.120	117,7	500	20	200

MOSAZI

Mosazi jsou slitiny mědi a zinku. Stejně jako hliníkové bronzy se vyznačují vysokou tvrdostí a pevností, ale mají mnohem lepší kluzné vlastnosti i v oblasti mezného tření. Zde dokonce převyšují cínové bronzy. Další výhodou oproti hliníkovým bronzům je i menší opotřebení hřídelového čepu.[7][10]

Charakteristické vlastnosti [7][10]:

- + vysoká tvrdost,
- + velmi dobré kluzné vlastnosti,
- + velká měrná zatížení,
- + přípustná teplota až 250 °C,
- + odolnost proti rázům,
- horší nouzové vlastnosti,
- opotřebení ložiskového čepu.

Tab. 9 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z mosazi [32][33][34]

ČSN	Označení	Hustota $\gamma \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
42 3231	CuZn40Mn3Al1	8,6	19	83,7
42 3226	CuZn45Pb3Mn3Fe	8,1	-	58,6
42 3326	CuZn45Mn4Pb3Fe1	8,3	21	125,6
Tvrdost dle Brinella [HB]	Modul pružnosti v tahu $E \cdot 10^{-3}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Minimální tažnost A_5 [%]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]
120	98,0	490	11 ¹⁾	245
100	95,0	490	20	147
130	95,1	400	9	100

1) Tažnost A_{10}

4.1.3 SLITINY HLINÍKU

Jsou vhodné pro kluzná ložiska s velmi vysokým zatížením. Mají výborné kluzné vlastnosti a jsou korozivzdorné. Velkou nevýhodou je teplotní roztlačnost, jejíž hodnoty jsou největší ze všech kovových materiálů. Právě kvůli teplotní roztlačnosti, ložiska ze slitin hliníku (zvláště tlustostěnná), jsou náročnější na montáž. Musí být stanoven dostatečný přesah uložení tak, aby za vyšších teplot byla optimální vůle, nedošlo k plastickým deformacím a současně také pootočení či dokonce uvolnění pouzdra.[10]

Z hlediska uložení se doporučuje drsnost povrchu pouzdra $R_a \leq 0,5$ a současně součet drsností povrchu R_a (pouzdra a čepu), by neměl překročit hodnotu 0,8. Doporučená tvrdost čepu hřídele je stanovena na $HB \geq 250$. [10]

Charakteristické vlastnosti [10][72]:

- + dovolený tlak 30 MPa (krátkodobě 50 MPa),
- + výborné kluzné vlastnosti,
- + velmi nízká hustota,
- + velmi dobrá korozivzdornost,
- + velmi dobrá zatížitelnost v oblasti mezného tření,
- vysoký součinitel teplotní roztažnosti,
- náročnější zalisování pouzdra,
- přípustná teplota 120 °C.

Tab. 10 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály ze slitin hliníku [39][40]

ČSN	Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
42 4261	AlCu8Fe1Si	2,80	24,0	159,0
42 4361	AlCu8FeSi	2,86	23,4	96,3
Tvrdost dle Brinella [HB]	Modul pružnosti v tahu $E \cdot 10^{-3}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Minimální tažnost A_5 [%]	
90 – 110	69,65	320	10	
50	70,00	180	1	

4.1.4 ŠEDÉ LITINY

Význačné vlastnosti této skupiny materiálů jsou tvrdost a s ní spojená otěruvzdornost a zatížitelnost. Vysoká tvrdost, ale způsobuje křehkost a materiál je náchylný vůči rázům.[10]

Při použití šedé litiny musíme zajistit spolehlivý přívod čistého maziva, součet drsnosti povrchu pouzdra a čepu $R_a < 0,5$. Tvrdost čepu volíme alespoň o 100 HB větší.[10][140]

Charakteristické vlastnosti [10]:

- + vysoká tvrdost,
- + vysoká zatížitelnost,
- + přípustná teplota více než 250 °C,
- + výborná únavová pevnost,
- + kluzné rychlosti (0,5 – 5 m.s⁻¹)
- + nízká cena,
- + nízká teplotní roztažnost,
- náchylné na rázy,
- nutnost spolehlivého mazání,
- mizerné nouzové vlastnosti,
- vysoké požadavky na kluzné plochy čepu i pouzdra,
- špatná korozivzdornost.

Tab. 11 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z šedé litiny [14][15]

ČSN	Hustota $\rho \cdot 10^3 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$	Měrná tepelná vodivost $\lambda \text{ [W.(m.K)}^{-1}\text{]}$
42 2415	7,03	12,6	49,4
42 2456	7,31	12,3	49,4
Tvrdost dle Brinella [HB]	Modul pružnosti $E \cdot 10^{-3} \text{ [MPa]}$	Mez pevnosti v tahu $R_m \text{ [MPa]}$	
200	97,3	150	
190 – 240	143,4	560	

4.1.5 SPÉKANÉ MATERIÁLY

Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Počáteční surovinou je kovový prášek o žádaném složení, který je při vysoké teplotě a tlaku slisován. Následuje slinování a kalibrace, při níž dosáhneme požadovaných mechanických vlastností a tvaru. Materiál vyroben práškovou metalurgií má vysokou pórovitost, póry zabírají až 30 % celkového objemu. Při moření v oleji jsou póry vyplněny mazivem. Mazivo bude vzlínat k povrchu a mazat kluzné plochy, vlivem zahřátí. Po ochlazení ložiska dojde vlivem kapilárních sil k nasátí oleje zpět. Ložiska ze spékaných materiálů tak mohou pracovat jako samomazná. Dalšími výhodami jsou konstantní koeficient tření, nízká hustota. Spékané materiály se používají i pro vícevrstvá ložiska.[57][95]

Tab. 12 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro spékané materiály [12][13]

ČSN	Označení	Hustota $\rho \cdot 10^3 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$	Pórovitost [%]	Min.hmotnostní podíl oleje při tloušťce stěny [%]	
				do 4 mm	nad 4 mm
41 8280	18 280	5,8 – 6,2	21 – 26	2,4	2,3
41 8344	18 344	6,3 – 6,6	21 – 27	2,3	2,2
Tvrdost dle Brinella [HB]	Min. pevnost v tlaku [MPa]	Kluzná rychlost v $[\text{m.s}^{-1}]$	Únosnost v trvalém provozu, při kluzné rychlosti v $[\text{MPa}]$		
			$< 0,15 \text{ m.s}^{-1}$	$0,25 - 0,5 \text{ m.s}^{-1}$	
25 – 45	150	3	8	2,8	
min. 25	100	4	6 – 8	3,5	

4.2 NEKOVOVÉ MATERIÁLY

4.2.1 PLASTY

Nachází uplatnění v provozech, kde by mazání mohlo způsobit dekontaminaci výrobku (textilní a potravinářský průmysl) nebo pro méně zatížená ložiska. Díky progresivnímu rozvoji těchto materiálů a jejich nízké hmotnosti nachází plastová ložiska stále větší uplatnění, např. i v odvětvích automobilového či leteckého průmyslu. Mezi jejich největší nevýhody patří špatná tepelná vodivost, jež určuje použitelnost ložisek pro kluzné rychlosti nepřesahující 2 m.s^{-1} . Tuto nevýhodu zmírňuje použití plastů s uhlíkovými vlákny, které navíc zvýší i zatížitelnost ložiska.[49][58]

Charakteristické vlastnosti [49]:

- + nízká hustota,
- + nepodléhají korozi,
- + chemická stálost,
- + samomazná,
- + velmi dobré kluzné vlastnosti,
- + výborné nouzové vlastnosti,
- + tlumí rázy,
- + velmi nízká cena,

- špatná tepelná vodivost,
- kluzné rychlosti do 2 m.s^{-1} ,
- vysoká tepelná roztažnost.

PA (POLYAMID)

Vyrábějí se z něj celoplastová ložiska, ale i výstelky. Vyznačuje se dobrou houževnatostí, tvrdostí a pevností, a proto je nejpoužívanější plastový materiál. Polyamidová pouzdra se vyrábí vstřikováním nebo slinováním, pórovitě PA či PA obohacené plnivý (grafit, bronzový prášek, skelná vlákna atd.). Plniva poskytují lepší kluzné a mechanické vlastnosti.[49][122]

PTFE (TEFLON)

Polytetrafluoretylen má mimořádné kluzné vlastnosti a třetí nejnižší koeficient tření mezi pevnými látkami (0,05 – 0,1). Mechanické vlastnosti jako nízká pevnost a vysoký otěr, předurčují PTFE k použití pouze s plnivý (epoxidová pryskyřice, grafit, bronzový a koksový prášek atd.). Takové materiály si uchovají kluzné vlastnosti, dojde ke zvýšení pevnosti, odolnosti proti otěru a stárnutí. Teflon také získal potravinářský atest. Teflonu se používá jako výstelky ložisek. Výrobek ve formě fólií slouží např. jako třecí vrstva ve dveřních pantech osobních automobilů.[49][100][122]

POM – ERTACETAL (DERLIN, TECAFORM)

Stejně jako polyamid má polyoxymetylén vysokou houževnatost, tuhost, avšak lepší rozměrovou stabilitu a nižší koeficient tření. Nehodí se pro suché tření, jedná se o materiál pracující v režimu omezeného mazání.[49][122]

Tab. 13 Tabulka používaných plniv spolu s jejich význačnými vlastnostmi [101]

Plnivo	Vlastnosti	Obvyklé použití
sklo	zvýšená odolnost proti otěru zvýšená chemická odolnost	sedla ventilů, těsnění, ložiska pro práci v nízkých teplotách
grafit	extrémně nízký koeficient tření dobrá pevnost v tlaku dobrá odolnost proti otěru	ložiska pro tvrdé povrchy a vysoké kluzné rychlosti
uhlík	dobrá tepelná vodivost dobrá odolnost proti deformaci	sedla ventilů, static. ztrátová ložiska pro vysoké rychlosti, pružné pásy pro nemazané kompresory
molybdendisulfid	snížená přilnavost, nízký statický koeficient tření, dobrá odolnost proti deformaci	vodící pásy, odolné součásti
bronz	zvýšená pevnost v tlaku, dobrá odolnost proti otěru, vysoká tepelná vodivost	těsnící kroužky, nemazaná ložiska pro vysoké rychlosti a měkkí povrchy

TEXTIT

Je kompozitní plastový materiál, výztuž tvoří bavlněná tkanina zalitá krezolformaldehydovou živicí. Vysoká únosnost, dobré kluzné a mechanické vlastnosti jej předurčují k výrobě pouzder pro velká zatížení s rázy. Textit lze velice dobře obrábět.[49][122]

Tab. 14 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro plastové materiály [120]
[122]

Název	Hustota $\rho \cdot 10^3 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$	Mez pevnosti v tahu $R_m \text{ [MPa]}$	Průtažnost [%]	Modul pružnosti v tahu $E \text{ [MPa]}$
PA 6	1,14	min. 65	40	min. 2 450
PTFE	2,20	25	300	400 – 700
POM C	1,41	68	35	3 100
TEXTIT J	1,40	80	-	-
	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$	Měrná tepelná vodivost $\lambda \text{ [W.(m.K)}^{-1}\text{]}$	Bod tání $[\text{°C}]$	Pracovní rozsah teplot $[\text{°C}]$
	100	0,33	215 – 235	-30 až 90
	130 – 170	0,23	327	-200 až 260
	125	0,31	165	-50 až 140
	20 – 40	0,20	-	až 120

4.2.2 UHLÍK

Význačnými vlastnostmi uhlíku jsou zejména nízký koeficient tření, vysoká tepelná odolnost a nízký otěr. Dále jeho široká škála použití, ať už jako uhlíkového ložiska nebo jako výztuže jiných materiálů ve formě uhlíkových vláken či přísady pro zlepšení kluzných vlastností. Uhlíkových ložisek se používá hojně u čerpadel, protože ve většině případů odpadá potřeba mazání olejem, neboť mazání zajišťuje čerpaná kapalina. V opačném případě fungují jako samomazná: textilní stroje, potravinářské dopravníky, v ocelářských strojích atd.[78]

Charakteristické vlastnosti [78]:

- + nízké opotřebení,
- + vysoká pevnost v ohybu,
- + chemická odolnost,
- + rozměrová stálost,
- + výborné kluzné vlastnosti,
- + samomazný,
- + nízký modul pružnosti,
- + snáší vysoké teploty,
- + vysoká tepelná vodivost,
- nad 500 °C vytváří oxidy,
- vysoká jakost povrchu hřídele,
- vysoká cena.

Tab. 15 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností uhlíku [71][126]

Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
1,9	2 500	240	5,6	139

Z uhlíku se také vyrábí DLC (diamond – like carbon) povlaky, které se vyznačují vysokou tvrdostí a nízkým součinitelem tření. Povlak se nanáší ve vrstvě několika mikrometrů na hřídel nebo ložisko, popřípadě na oba kluzné povrchy. Ložiska ošetřené DLC povlaky vykazují v provozu menší koeficienty tření, opotřebení a mají delší životnost.[104]

4.3 MODERNÍ MATERIÁLY PRO KLUZNÁ LOŽISKA

4.3.1 KOMPOZIT PTFE (DU, KU POUZDRA)

Jedná se o kluzné pouzdro, složené ze tří vrstev. Základní je ocelový plech, který zajistí mechanické vlastnosti a tvarovou stabilitu. Plech je z vnější strany pocínován, aby odolával korozi. Druhou vrstvu tvoří porézní cínový bronz, nanášen zevnitř na ocelový základ. Jeho úkolem je umožnit lepší odvod tepla z ložiska a zajistit pevné spojení s ocelovým podkladem a kluznou povrchovou vrstvou. Ta vznikne naválcováním PTFE a tvrzením při teplotě 327 °C. Pro lepší kluzné vlastnosti je teflon plněn olovem.[59][60]

Přednosti [59]:

- + pracují i bez maziva,
- + snášejí vysoké teploty,
- + malá provozní vůle,
- + nízký koeficient tření,
- + nízká cena.

Použití [60]:

- automobilový průmysl,
- manipulátory,
- textilní průmysl,
- domácí spotřebiče.



Obr. 62 Ložiska z kompozitu PTFE [59]

Tab. 16 Informativní hodnoty vybraných vlastností pro kompozit PTFE [59][60]

Přípustné zatížení [N.mm ²]		Kluzná rychlost v [m.s ⁻¹]	Součinitel tření μ [-]	Teplotní rozsah [°C]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
Statické	Dynamické				
250	80	2	0,03 – 0,08	- 200 až 250	42

Tab. 17 Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z PTFE kompozitu [60]

Tolerance hřídele	Tolerance tělesa	Drsnost povrchu Ra [μ m]	Tvrдость hřídele [HB]
f6 – h7	H7	$\leq 0,4$	300 – 600

4.3.2 KOMPOZIT POM (DX, KX POUZDRA)

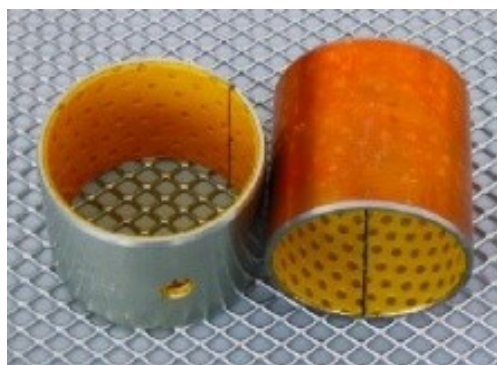
Kluzná ložiska z kompozitu POM jsou stejná jako z kompozitu PTFE, až na složení třetí vrstvy, kde namísto PTFE je použit materiál POM. Pro zlepšení kluzných podmínek při nízkých rychlostech, jsou do vrstvy POM vytlačeny jamky kruhového tvaru, které tvoří zásobníky maziva a lapače nečistot.[59][60]

Přednosti [60]:

- + minimální údržba,
- + vysoce namáhaná uložení,
- + pro nízké kluzné rychlosti,
- + pohlcují abrazivní částice,
- + nízký koeficient tření.

Použití [60]:

- stavební a zemědělské stroje,
- manipulátory,
- domácí spotřebiče.



Obr. 63 Ložiska z kompozice POM [59]

Tab. 18 Informativní hodnoty vybraných vlastností pro kompozit POM [59][60]

Připustné zatížení [N.mm ²]		Kluzná rychlost v [m.s ⁻¹]	Součinitel tření μ [-]	Teplotní rozsah [°C]	Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]
Statické	Dynamické				
250	120	2	0,04 – 0,12	- 40 až 110	4

Tab. 19 Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z POM kompozitu [60]

Tolerance hřídele	Tolerance tělesa	Drsnost povrchu Ra [μm]	Tvrдость hřídele [HB]
h7 – h8	H7	≤ 0,8	150 – 600

4.3.3 KOMPOZIT S NEREZOVÝM POUZDREM

Základ tvoří plech z nerezové oceli, která se potáhne tkaninou tvořenou PTFE a ocelovými vlákny. Ocelová vlákna slouží pro přitavení na základní kov, kluznou plochu tvoří pouze teflonová vlákna. Aby nedocházelo ke shrnování tkaniny je vše zalito pryskyřicí.[60]

Přednosti [60]:

- + korozivzdornost,
- + vysoká únosnost,
- + malá provozní vůle,
- + nízký koeficient tření.



Obr. 64 Nerezová kluzná ložiska [60]

Použití [60]:

- vrtné plošiny,
- ventily a čerpadla,
- zdravotnické zařízení,
- tiskařské stroje,
- potravinářské a papírenské stroje.

Tab. 20 Informativní hodnoty vybraných vlastností pro kompozit z nerezové oceli [60]

Připustné zatížení [N.mm ²]		Kluzná rychlost v [m.s ⁻¹]	Součinitel tření μ [-]	Teplotní rozsah [°C]
Statické	Dynamické			
300	80	1,5	0,03 – 0,08	- 150 až 150

Tab. 21 Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z nerez kompozitu [60]

Tolerance hřídele	Tolerance tělesa	Drsnost povrchu Ra [μm]	Tvrдость hřídele [HB]
g6 – f7	H7	≤ 0,4	300 – 600

4.3.4 SKF LOŽISKO Z VINUTÝCH VLÁKEN

Je moderním ložiskem navrženým do těžkých provozních podmínek a pro velká zatížení. Ložisko je vytvořeno navíjením různých vláken materiálu. Skelná vlákna pro mechanické vlastnosti, teflonová a polyesterová vlákna umožní nízký koeficient tření i bez maziva. Ukotvení vláken zajistí epoxidová pryskyřice.[60]

Přednosti [60]:

- + vysoká únosnost,
- + odolnost vůči rázům a vibracím,
- + vyrovnává nesouososti,
- + nízký koeficient tření.



Obr. 65 Řez kluzným ložiskem z vinutých vláken [60]

Použití [60]:

- těžební zařízení,
- ropné plošiny,
- obráběcí stroje,
- dopravníkové pásy,
- stavební, lesnická a zemědělská technika.

Tab. 22 Informativní hodnoty vybraných vlastností pro ložiska z vinutých vláken [60]

Přípustné zatížení [N.mm ²]		Kluzná rychlost v [m.s ⁻¹]	Součinitel tření μ [-]	Teplotní rozsah [°C]
Statické	Dynamické			
200	140	0,5	0,03 – 0,08	- 50 až 140

Tab. 23 Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z vinutých vláken [60]

Tolerance hřídele	Tolerance tělesa	Drsnost povrchu Ra [μm]	Tvrdost hřídele [HB]
h7 – h8	H7	≤ 0,08	200 – 600

4.3.5 BRONZ S GRAFITEM

Kostra ložiska je odlita z bronzu, do kterého se vsadí grafitové kapsy. Grafit slouží jako zásobník tuhého maziva, proto ložisko může pracovat při nízkých rychlostech i bez mazání. Zásobníky tvoří 20 – 30 % z celkového povrchu ložiska.[59]



Obr. 66 Bronzové ložisko s grafitovými kapsami [59]

Přednosti [59]:

- + velmi vysoká únosnost,
- + velký teplotní rozsah použití,
- + korozivzdornost,
- + chemická odolnost,
- + pro velmi nízké kluzné rychlosti.

Použití [59]:

- lodě,
- turbíny,
- ocelové válce,
- slévárenské stroje.

Tab. 24 Charakteristika bronzových odstředivě litých kluzných pouzder s grafitovými hnízdy [59]

Materiál (označení Midol)	M 1	M 2	M 3	M 4	M 6
Hustota $\zeta \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	8,0	8,8	7,6	8,8	8,0
Tvrdość dle Brinella [HB]	> 210	> 70	> 150	> 80	> 250
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	> 750	> 200	> 500	> 360	> 800
Mez pevnosti v kluzu R_e [MPa]	> 350	> 90	> 260	> 150	> 450
Součinitel tření μ [-]	0,03 – 0,20	0,03 – 0,18	0,03 – 0,20	0,03 – 0,18	0,03 – 0,20
Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]	60	60	60	60	60
Max. přípustná teplota [°C]	300	400	400	400	300
Přípustné zatížení [N.mm ²]	100	60	50	70	150
Max. kluzná rychlost v [m.min ⁻¹]	15	10	20	10	10

4.3.6 KERAMIKA

Keramika je moderním materiálem používaným ve všech odvětvích průmyslu. Použití keramiky pro kluzná ložiska předurčují její vlastnosti: pevnost v tlaku, tvrdost, nízká tepelná roztažnost, vysoká tepelná odolnost a odolnost vůči tepelným šokům. Korozivzdornost s biokompatibilitou umožňují její použití i pro potravinářské a zdravotnické zařízení. Typickým produktem jsou ložiska čerpadel, chlazená čerpaným médiem, automobilový průmysl, sférická ložiska včetně kloubních implantátů a povlaky kluzných ložisek.[113][123]



Obr. 67 Kluzná pouzdra z keramiky [113]

Tab. 25 Informativní průměrné hodnoty vybraných vlastností pro ložiska z keramiky[91][110][113]
[127][130]

Materiál	Oxid hlinitý (Al ₂ O ₃)	Aluminutitanát (Al ₂ TiO ₅)	Oxid zirkoničitý (ZrO ₂)	Karbid křemíku (SiSiC)	Nitrid křemíku (Si ₃ N ₄)
Hustota $\rho \cdot 10^3$ [kg.m ⁻³]	3,96	3,70	5,68	3,10	3,21
Tvrdost dle Vickerse [GPa]	13,39	5,00	10,00	21,58	15,69
Mez pevnosti v tahu R _m [MPa]	300	-	500	-	700
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	370	20	200	400	320
Pevnost v tlaku [MPa]	3 000	-	1 900	2 000	-
Součinitel teplotní roztlačnosti $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	8,4	1,0	11,0	3,6	3,1
Měrná tepelná vodivost λ [W.(m.K) ⁻¹]	24,2	1,5	2,5	120,0	-
Max. přípustná teplota [°C]	1 000	1 000	1 500	1 400	1 300

4.4 SPECIÁLNÍ MATERIÁLY KLUZNÝCH LOŽISEK

Do této skupiny patří materiály pro vojenské, vesmírné, letecké a důlní odvětví, specifické především nároky na mechanické vlastnosti, mez pevnosti a kluzu, max. zatížitelnost, ale také schopnost pracovat v náročném prostředí, např. v mořské vodě.

4.4.1 BERYLLIOVÁ MĚĎ

Měď s přídavkem 2 % beryllia. Beryllium umožní tepelné vytvrzení a měď tak dostává vysoké mechanické vlastnosti. Berylliová měď se používá k výrobě leteckých komponent a těžce namáhaných součástí. Beryllium je silně toxické, což vyžaduje při výrobě i zpracování zvláštní bezpečnostní opatření.[99][51]

4.4.2 ACUBE 100

Vznikl z požadavku vyvinout vysokopevnostní materiál, jež by neobsahoval nebezpečné beryllium. Jedná se o nemagnetický materiál s vysokou korozivzdorností a pevností. Pevnost se liší podle způsobu zpracování. Slitina se taví ve vakuové indukční peci, poté je elektrostruskově přetavena, proběhne homogenizace, po které následuje válcování nebo

rotační kování. Pro tento materiál obecně platí mechanické vlastnosti $R_{p0,2} = 965 \text{ MPa}$, $R_m = 1\,310 \text{ MPa}$. Při použití rotačního kování hodnoty vzrostou $R_{p0,2} = 1\,220 \text{ MPa}$, $R_m = 1\,500 \text{ MPa}$. Vysoké hodnoty pevnosti jsou vykoupeny vysokou cenou a špatnou obrobiteľnosťou a často se používá nekonvenčních metod obrábění. Acube 100 nachází uplatnění pro ložisková pouzdra letadel, zejména námořní (F – 35) a vysoce namáhané chirurgické implantáty.[99]

4.4.3 SLITINY TOUGHMET

Jsou vyráběny kontinuálním litím s následným spinodálním vytvrzením. Může následovat i tváření za studena, kterým získáme pevnost až $R_m = 1\,100 \text{ MPa}$. Slitiny se vyznačují vysokou pevností, nízkým koeficientem tření (podobný cínovým bronzům), tepelná vodivost (dvojnásobná oproti hliníku), výborná obrobiteľnosť. Použití nacházejí v letectví (kluzná ložiska platform a podvozků), rejdové čepy důlních vozidel, ropné plošiny.[69]

4.4.4 NITRONIC 60

Výborné kluzné vlastnosti, vyšší pevnost, odolnost proti vysokým teplotám, ořezuvzdornost i odolnost proti korozi. Jedná se o austenitickou nerezovou ocel posílenou dusíkem. Kluzná ložiska z této slitiny pracují i bez maziva.[132]

Tab. 26 Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro vybrané materiály ze speciálních slitin [51][109][112][116][130][132]

Materiál	Beryliová měď (CuBe2)	Acube 100 (CoCr28Mo6)	Toughmet T3 CX90	Toughmet T2 CX90	Nitronic 60
Hustota $\rho, 10^3 [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	8,360	8,276	8,94	8,91	7,62
Tvrdość dle Rockwella	HRB 45 – 78	HRC 42	HRC ≥ 27	HRC ≥ 27	HRB ≤ 100
Mez pevnosti v tahu $R_m [\text{MPa}]$	410 – 1 520	1 351 ¹⁾ (1 427) ²⁾	≥ 724	≥ 724	min. 724
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2} [\text{MPa}]$	190 – 1 420	958 ¹⁾ (1 069) ²⁾	≥ 621	≥ 621	min. 379
Modul pružnosti v tahu $E [\text{GPa}]$	130	241	128	117	181
Součinitel teplotní roztahnosti $\alpha \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$	17,00	13,25	16,40	16,20	15,80
Měrná tepelná vodivost $\lambda [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	100,00	14,53	38,00	51,90	-

1) Platí pro válcovaný materiál

2) Materiál je rotačně kován

5 PŘEHLED DOSAHOVANÝCH DRSNOSTÍ

5.1 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

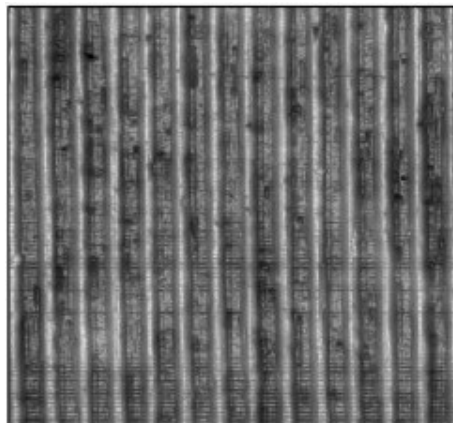
Konvenční metody obrábění představují nejpoužívanější aplikace pro strojírenskou výrobu. Stroje pracují s nástroji s definovanou geometrií břitu a řezné podmínky volíme podle mechanických vlastností materiálu.[3]

SOUSTRUŽENÍ

Soustružením nazýváme výrobní technologii třískového obrábění, kterou se zhotovují součásti rotačních tvarů. Je jednou z nejpoužívanějších obráběcích metod ve strojírenství. Nástroj, většinou jednobřitý koná posuvný pohyb. Hlavní pohyb je rotační a vykonává jej obrobek.[3]



Obr. 68 Soustružení [56]



Obr. 69 Vzhled soustružené plochy [63]

PARAMETRY POVRCHU PO SOUSTRUŽENÍ

Označení vyhodnocovaných povrchů je S1 – S4.

S1:

Obráběný materiál ocel AISI 5140, zušlechtěná na tvrdost 57 ± 1 HRC. Materiál byl soustružen na CNC soustruhu bez chlazení procesní kapalinou, při řezné rychlosti $150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a šířce záběru ostří $0,15 \text{ mm}$. Nástroj byl z CBN, celé označení CB7015 od Sandvik Coromat. Soustružený povrch byl dále dokončován vyhlazováním kuličkou nebo superfinišováním. Parametry pro výsledný povrch lze najít v tab. 41, resp. tab. 34.[56]

S2, S3:

Soustružený materiál ocel AISI 52100 s tvrdostí povrchu 61 – 62 HRC. Obě obrábění proběhla bez použití procesní kapaliny, za posuvu $0,0254 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a šířce záběru ostří $0,254 \text{ mm}$. Při soustružení S2 byla stanovena řezná rychlost na $1,78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a

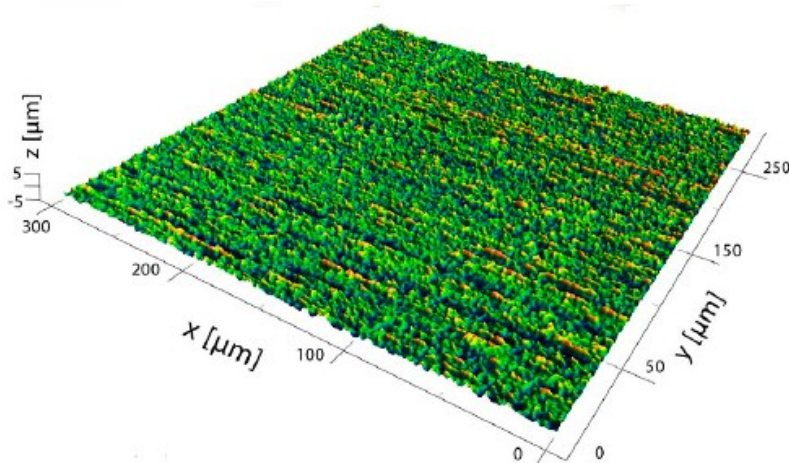
Tab. 27 Naměřené parametry povrchu po soustružení [56][63][105]

	S1	S2	S3	S4
Sa [μm]	0,460	0,229	0,175	0,908
Sq [μm]	-	0,280	0,219	1,040
Sz [μm]	2,38	1,35	1,30	5,46
Sp [μm]	-	0,980	0,773	3,030
Sv [μm]	-	0,653	0,715	3,200
Svk [μm]	0,0906	-	-	-
Ssk [-]	0,139	0,530	0,228	0,308
Sku [-]	-	2,88	2,89	1,91
Smr [%]	43,6	48,9	85,2	-
Sdq [$\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]	0,0375	0,0942	0,109	0,0544
Sdr [%]	0,0703	0,442	0,588	0,148
Sds [mm^2]	581	3 996	4 504	799
Ssc [μm^{-1}]	0,005	0,298	0,363	0,0056

použitý nástroj GE BZN 8100 (0,015/15° zkosení; 6,35 mm rádius). Pro S3 proběhla změna nástroje na povlakovaný GE BZN 8100 (VB 0,5 mm) (0,015/15° zkosení; 6,35 mm rádius) a řezná rychlost byla zvýšena na $2,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Soustružené plochy se dokončovali broušením, viz tab. 33.[105]

S4:

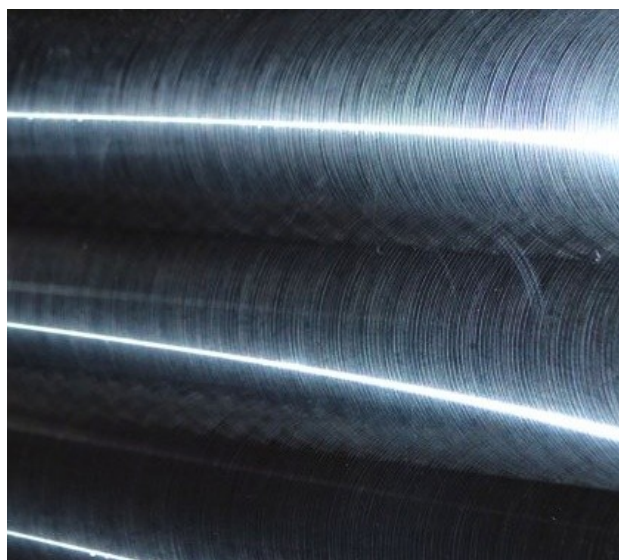
Soustružený materiál AZ91, což je hořčíková slitina s mezí pevnosti $R_m = 235 \text{ MPa}$, mezí kluzu $R_{p0,2} = 175 \text{ MPa}$ a tvrdostí povrchu 83 HB.[63]



Obr. 70 3D struktura povrchu po soustružení [98]

FRÉZOVÁNÍ

Používáme pro výrobu deskovitých součástí, ojnic, kluzných vedení atd. Vícebřitý nástroj při obrábění rotuje. Posuvný pohyb koná obrobek, nejčastěji ve směru kolmém na osu nástroje.[3]



Obr. 71 Vzhled frézované plochy [137]

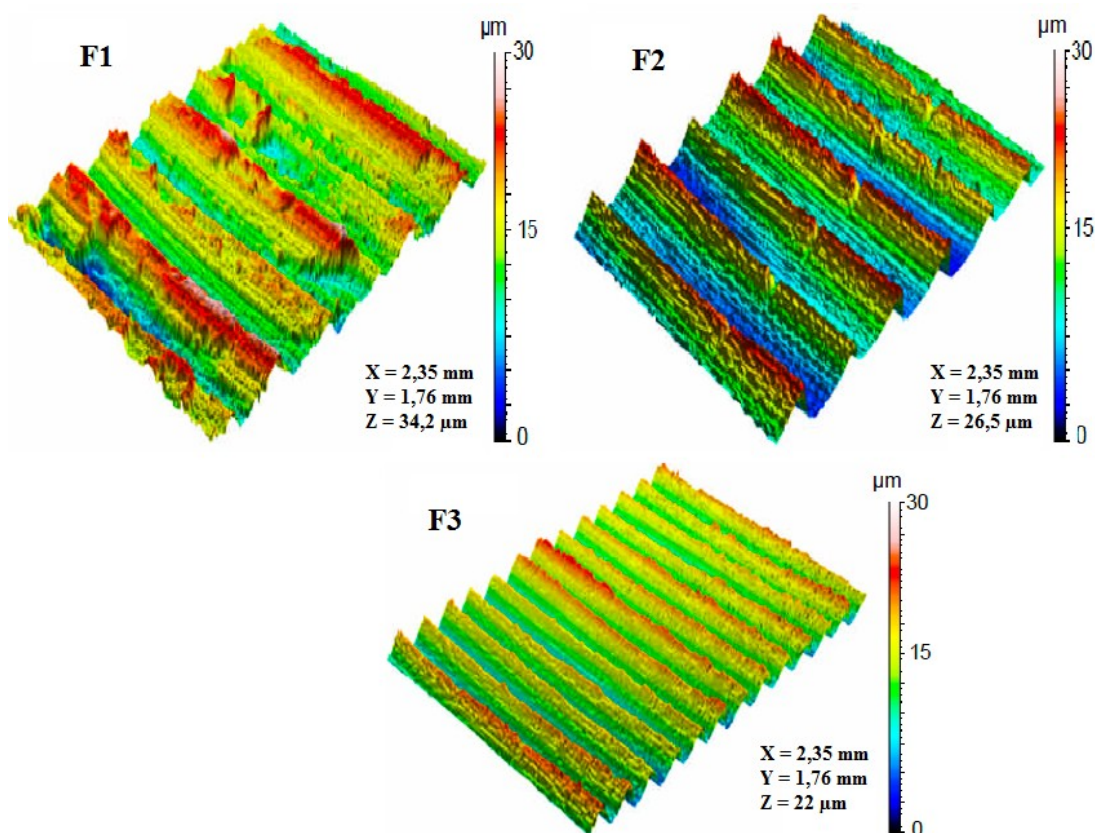
PARAMETRY POVRCHU PO FRÉZOVÁNÍ

Vyhodnocované povrchy jsou označeny F1 – F4.

Tab. 28 Parametry povrchu po frézování [64][87]

	Sa [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]	S _{10Z} [μm]	Ssk [-]	Sku [-]	Sds [mm^{-2}]	Spd [mm^{-2}]
F1	0,92	1,1	4,79	-	0,47	2,33	606,38	-
F2	4,09	-	-	511	-	2,51	-	129
F3	4,15	-	-	326	-	2,59	-	79
F4	3,62	-	-	748	-	1,99	-	148

Pro F2-F4 byl frézovaný materiál ocel AISI 1034.[64]



Obr. 72 Struktura frézovaných povrchů F1- F3 [64]

VRTÁNÍ A VYVRTÁVÁNÍ

Vrtáním zhotovujeme otvory do plného materiálu. Rotační i posuvný pohyb vykonává nástroj. Vyvrtáváním rozšiřujeme předhotovené otvory. Používané nástroje jsou vyvrtávací tyče nebo hlavy.[3]

VYHRUBOVÁNÍ, VYSTRUŽOVÁNÍ

Jsou výrobní operace, které následují po vrtání a slouží ke zvyšování přesnosti vyráběného otvoru. Výhrubníky i výstružníky se liší pouze počtem zubů a přesností.[3]

Tab. 29 Parametry jakosti ploch dosahované konvenčními metodami obrábění [3]

Metoda obrábění			Přesnost rozměrů IT		Drsnost plochy Ra [μm]	
			Střední	Rozsah	Střední	Rozsah
Vnější rotační plochy	Soustružení	Hrubování	13	11 – 14	25,0	12,5 – 50,0
		Dokončování	10	9 – 11	3,2	1,6 – 12,0
		Jemné slinutým karbidem	8	7 – 9	0,8	0,4 – 1,6
		Jemné diamantem	6	5 – 7	0,4	0,2 – 0,8
Vnitřní rotační plochy	Soustružení	Hrubování	12	11 – 13	25,0	12,5 – 50,0
		Dokončování	10	9 – 12	3,2	1,5 – 12,5
	Vrtání	Bez vedení	13	12 – 14	6,3	6,3 – 25,0
		S vedením	12	10 – 13	3,2	3,2 – 25,0
	Vyhrubování		9	9 – 11	3,2	1,6 – 3,2
	Vystružování		8	7 – 9	0,8	0,8 – 3,2
	Zahlubování	Hrubování	12	11 – 14	3,2	1,6 – 12,5
		Dokončování	9	7 – 10	1,6	1,6 – 6,3
	Vývrtávání	Hrubování	12	11 – 14	25,0	12,5 – 50,0
		Dokončování	10	9 – 11	3,2	1,6 – 6,3
		Jemné slinutým karbidem	6	5 – 8	0,8	0,4 – 1,6
		Jemné diamantem	5	4 – 7	0,4	0,2 – 0,8
Rovinné plochy	Frézování	Hrubování válcovou frézou	12	10 – 13	25,0	12,5 – 50,0
		Dokončování válcovou frézou	10	9 – 11	3,2	1,6 – 6,3
		Hrubování nožovou hlavou	11	10 – 13	25,0	12,5 – 50,0
		Dokončování nožovou hlavou	9	8 – 9	3,2	0,8 – 6,3
		Jemné slinutým karbidem	6	5 – 7	0,8	0,4 – 1,6

5.2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

S vývojem materiálů rostou jejich vlastnosti jako pevnost, tvrdost houževnatost atd. Pro některé materiály by použití klasických obráběcích metod bylo složité nebo neekonomické. Takové materiály obrábíme nekonvenčními metodami.[3]

Nekonvenční metody obrábění mají tyto přednosti [3]:

- řezné podmínky nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- nástroj nemusí být tvrdší než obrobek,
- lze je většinou plně automatizovat,
- umožňují řízenou změnu vlastností povrchové vrstvy (korozivzdornost, únavová pevnost a další.).

ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Společným znakem pro elektroerozivní obrábění je úběr materiálu pomocí opakujícího se elektrického výboje. Obrábění probíhá v dielektrické kapalině mezi dvěma elektrodami, z nichž anodu (+) tvoří obrobek. Charakteristickou stopou na obrobeném povrchu jsou mikrokrátery. Nejpoužívanější metodou z této skupiny je elektrojiskrové obrábění.[3]

PARAMETRY POVRCHU DOSAHOVANÉ ELEKTROEROZIVNÍM OBRÁBĚNÍM

V tab. 30 jsou uvedeny hodnoty nastavení obrábění a dosaženého povrchu pro nástrojovou ocel (0,38 % C, 16 % Cr) a úběr materiálu 0,5 mm, pro všechny měřené vzorky.[89]

Tab. 30 Nastavení a parametry povrchu dosažené pro elektroerozivní obrábění [89]

Impulz [μs]	Proudové nastavení [A]	Plocha katody [mm ²]	Čas obrábění	Sq [μm]	Sds [mm ⁻²]
750	22,85	30 x 25	11 min 30 s 46 ms	26,865	176,60
750	11,18	30 x 100	2 h 6 min 2 s 56 ms	13,090	382,80
120	11,18	30 x 25	40 min 6 s	13,730	277,05

OBRÁBĚNÍ PAPSKEM PLAZMY

Materiál se odtaví pomocí plazmového paprsku. Ten dopadá na povrch obrobku vysokou rychlostí a vyvolává teplotu 10 000 – 30 000 °C. Plazmový paprsek je vysoce ionizovaný plyn, nejčastěji vzduch, argon, vodík, dusík nebo jejich směsi. Po obrábění dostáváme velice jemný povrch. Plazmou nejčastěji obrábíme slitiny neželezných kovů a rotační plochy.[3]

OBRÁBĚNÍ LASEREM

Využíváme pro výrobu přesných otvorů a obrábění nekovových nebo elektricky nevodivých materiálů. Úběr materiálu probíhá pomocí monochromatického soustředěného světla působícího malou plochu. V místě dopadu vzniká teplota až 10⁴ °C.[3]

OBRÁBĚNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ

Při této metodě dopadá na materiál vysokou rychlostí svazek elektronů. Při dopadu vzniká vysoká teplota a materiál je odtaven. Elektronovým paprskem vyrábíme přesné otvory, opracováváme nekovové materiály i tvarově složité součásti.[3]

ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ

Obrobek ponořený do elektrolytu slouží jako anoda (+), nástroj je katoda (-). Mezi obrobkem a nástrojem je ponechána mezera, kterou proudí elektrolyt. Při průchodu proudu o nízkém napětí elektrolytem, dochází k chemické reakci a následně k rozpouštění materiálu obrobku. Elektrochemické obrábění používáme pro tvrdé a kalené materiály, žárupevné slitiny, hluboké díry či tvarové plochy.[3]

CHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ

Využívá se chemické reakce mezi obrobkem a pracovním prostředím, obvykle kyselina nebo hydroxid. Obrobek je ponořen do pracovního prostředí a vlivem chemické reakce dochází k odebrání materiálu. Místa, která nemají být obráběna jsou pokryta speciální pastou bránící reakci.[3]

OBRÁBĚNÍ ULTRAZVUKEM

Materiál je obráběn vibrujícím nástrojem, jehož vibrace způsobují ultrazvukové vlny. Ultrazvukem obrábíme tvrdé i křehké, kovové i nekovové materiály. Nejpoužívanější metody jsou ultrazvukové nárazové broušení a rotační obrábění ultrazvukem.[3]

PARAMETRY DOSAHOVANÝCH POVRCHŮ POMOCÍ ULTRAZVUKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

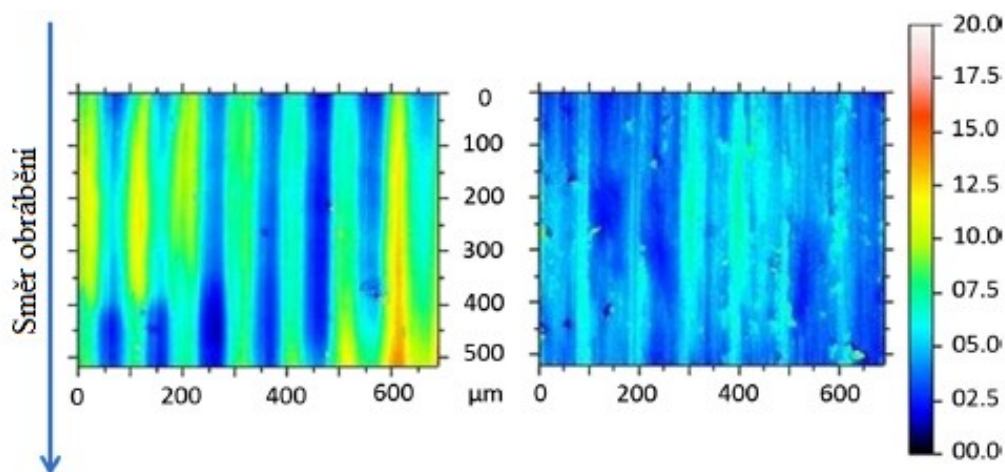
Tab. 31 obsahuje porovnání konvenčního soustružení a ultrazvukového soustružení pro titanový materiál Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn. Titanový materiál má vysokou mez pevnosti $R_m = 1\,200\text{ MPa}$, nízký koeficient tepelné vodivosti $\lambda = 8,1\text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$. [73]

Řezné podmínky jsou následující [73]:

- ultrazvukové soustružení,
 - řezná rychlost $10 - 70\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,
 - posuv $0,1\text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$,
 - šířka záběru ostří $50 - 500\text{ }\mu\text{m}$,
 - frekvence vibrací $17,9\text{ kHz}$,
 - tangenciální vibrační amplituda $10\text{ }\mu\text{m}$,
 - bez procesní kapaliny,
- konvenční soustružení,
 - řezná rychlost $10 - 70\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,
 - posuv $0,1\text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$,
 - šířka záběru ostří $50 - 500\text{ }\mu\text{m}$,
 - bez procesní kapaliny.

Tab. 31 Dosažené parametry povrchu pro ultrazvukové a konvenční soustružení titanu [73]

Metoda obrábění	Ra [μm]	Rq [μm]	Sa [μm]	Sq [μm]	Rsk [-]	Rku [-]	Spd [mm^{-2}]	Spc [mm^{-1}]
Ultrazvukové Soustružení	0,89 $\pm 0,25$	1,17 $\pm 0,35$	1,21 $\pm 0,28$	1,56 $\pm 0,34$	0,73 $\pm 0,54$	3,92 $\pm 1,58$	764 ± 335	1,82 $\pm 2,64$
Konvenční soustružení	1,73 $\pm 0,33$	1,98 $\pm 0,33$	2,14 $\pm 0,27$	2,58 $\pm 0,36$	0,11 $\pm 0,24$	1,94 $\pm 0,48$	140 ± 53	1,05 $\pm 0,26$



Obr. 73 Interferometrický sken povrchu soustruženého konvenčně (vlevo) a ultrazvukem (napravo) [73]

Tab. 32 Parametry jakosti ploch dosahované nekonvenčními metodami obrábění [3]

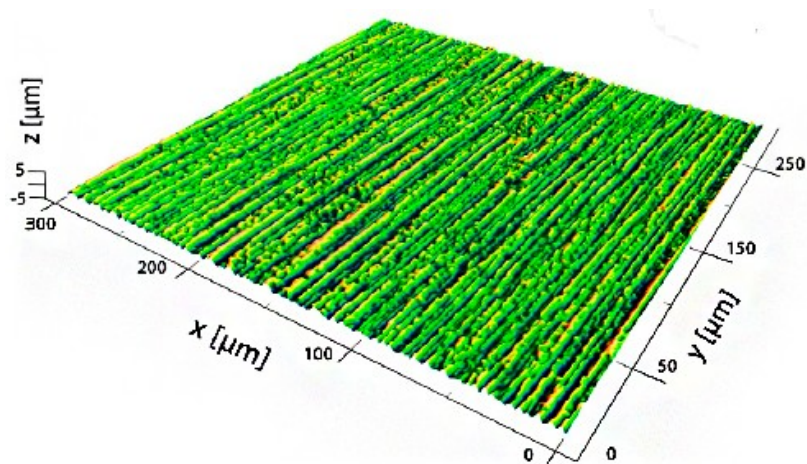
Metoda obrábění	Drsnost obrobené plochy Ra [μm]	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovlivněné vrstvy [μm]	Úběr [cm ³ .min ⁻¹]	Měrná spotřeba energie [kWh.cm ⁻³]
Elektrojiskrové obrábění	50,0 – 0,2	6 – 12	10 – 300	10 ⁻⁴ – 0,6	0,1 – 1,0
Plazmový paprsek	-	-	500 – 800	100,0	-
Laserový paprsek	50,0 – 6,3	-	100	10 ⁻⁴	8,0 – 13,0
Elektronový paprsek	50,0 – 6,3	-	Beze změny	10 ⁻² – 0,4	-
Elektrochemické obrábění	2,5 – 1,6	9 – 12	Beze změny	0,05 – 0,5	0,1 – 0,3
Elektrochemické broušení	0,8 – 0,2	6 – 9	Beze změny	10 ⁻²	0,04 – 0,08
Chemické frézování	6,3 – 0,4	-	Beze změny	-	-
Ultrazvukové obrábění	6,3 – 0,4	7 – 9	Beze změny	10 ⁻² – 10,0	0,07 – 0,8

5.3 DOKONČOVACÍ METODY TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

Slouží pro zvýšení jakosti povrchu a geometrie rozměrů. Jejich specifikem je použití nástrojů s nedefinovanou geometrií.[3]

BROUŠENÍ

Je třísková dokončovací metoda, kde obrobek koná vedlejší posuvný pohyb a hlavní rotační pohyb vykonává nástroj, brusný kotouč složený z brusných zrn. Broušení se používá zejména pro dokončovací práce, neboť jím dosahujeme vysokou přesnost rozměrů a jakost povrchu. Broušení probíhá při vysokých rychlostech (30 – 100 m.s⁻¹) a malých úběrech materiálu, průřez třísky 10⁻³ až 10⁻⁵ mm². [3]



Obr. 74 Struktura povrchu ve 3D po broušení [98]

PARAMETRY DOSAHOVANÝCH POVRCHŮ BROUŠENÍM

Vyhodnocované povrchy jsou označeny B1 – B7.

B1, B2:

Broušený materiál ocel AISI 52100. Nástrojem byl brusný kotouč průměru 254 mm složený ze zrn Al_2O_3 . [105]

Řezné podmínky [105]:

	B1	B2
– rychlost kotouče	$23,94 \text{ m.s}^{-1}$	$23,94 \text{ m.s}^{-1}$,
– posuv stolu	$15,24 \text{ m.min}^{-1}$	$16,62 \text{ m.min}^{-1}$,
– příčný posuv	$1,14 \text{ mm. (průchod kot.)}^{-1}$	$1,14 \text{ mm. (průchod kot.)}^{-1}$,
– šířka záb. ostří (hrub.)	$12,7 \text{ μm. (průchod kot.)}^{-1}$	$12,7 \text{ μm. (průchod kot.)}^{-1}$,
– počet průchodů kotouče	2	2,
– šířka záb. ostří (dokonč.)	$5,08 \text{ μm. (průchod kot.)}^{-1}$	$26,0 \text{ μm. (průchod kot.)}^{-1}$,
– počet průchodů	1	1,
– procesní kapalina	ano	ne.

B3:

Povrch B3 vznikl broušením chrom-molybdeničité slitiny, označení 42CrMo4. [62]

B4, B5:

Broušený materiál ocel 100Cr6 zušlechťená na $63 \pm 2 \text{ HRC}$. [79]

B6:

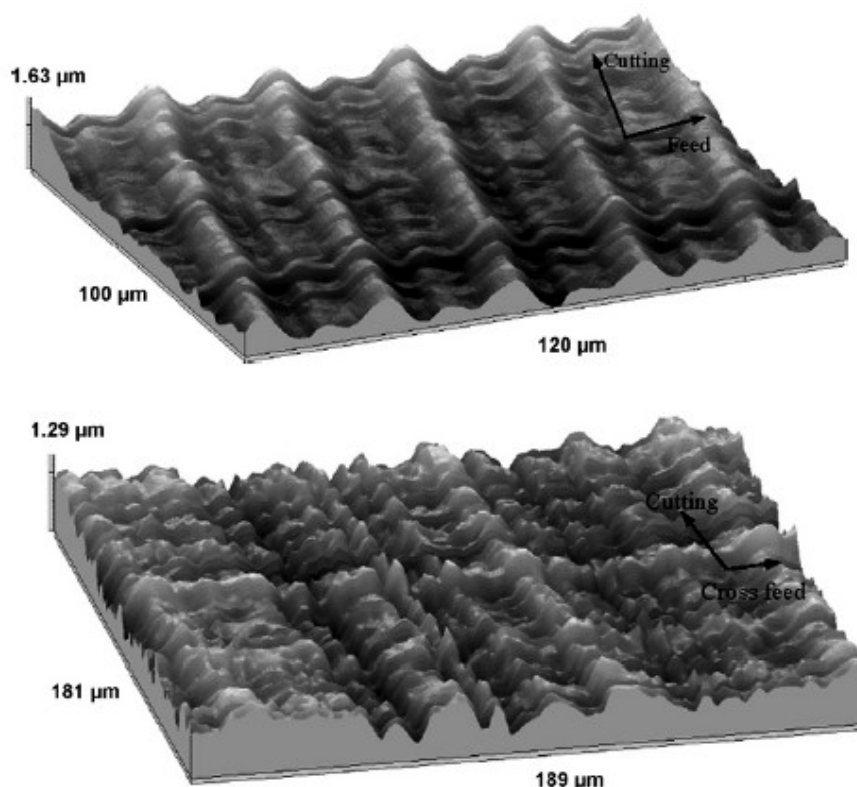
Ozubené kolo z oceli ASM 6308 zušlechťené na 35 – 45 HRC. [75]

B7:

Broušený materiál ocel AISI 5140, tvrdost povrchu $57 \pm 1 \text{ HRC}$ a počáteční $S_a = 0,4 \text{ μm}$. Materiál byl broušen kotoučem z Al_2O_3 , který se otáčí rychlostí $11,9 \text{ m.s}^{-1}$, šířka záběru ostří $0,025 \text{ mm}$ a posuv obrobku $3,5 \text{ m.min}^{-1}$. Broušení proběhlo při použití procesní kapaliny. [55]

Tab. 33 Parametry povrchů po broušení [55][62][75][79][105]

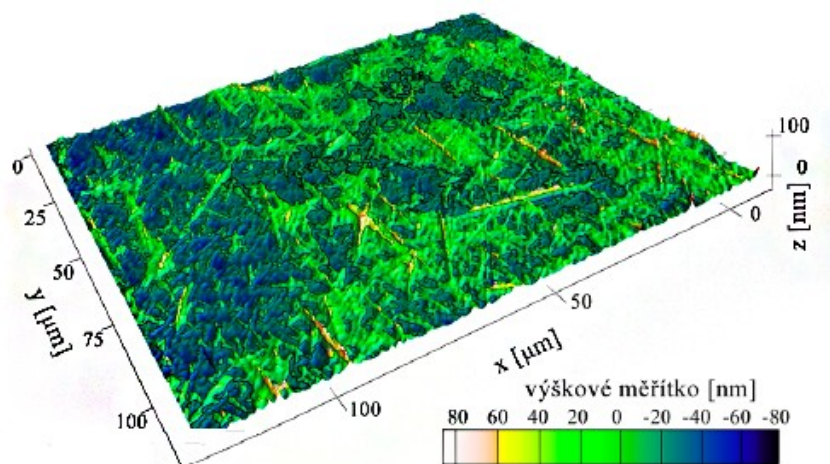
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Sa [μm]	0,158	0,202	0,638	79,6	57,2	1,3	0,28
Sq [μm]	0,196	0,256	0,642	104	72,4	1,6	-
Sz [μm]	1,25	1,8	6,06	749	538	11,7	1,6
Sp [μm]	0,612	1,11	3,71	-	-	6,09	-
Sv [μm]	0,679	1,01	3,43	-	-	5,61	-
Svk [μm]	-	-	0,714	-	-	1,63	-
Ssk [-]	- 0,127	0,427	- 0,28	- 1,27	- 0,818	- 0,05	-0,2
Sku [-]	2,79	3,19	3,59	4,63	3,91	2,71	4,1
Smr [%]	97,3	30,9	-	-	-	-	-
Sdq [$\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]	0,0897	0,277	0,0421	3,23	2,6	0,082	-
Sdr [%]	0,402	3,68	0,0885	324	217	0,335	-
Sds [mm^{-2}]	8 762	47 815	313	189	166	-	1 305,6
Ssc [μm^{-1}]	0,172	1,15	0,0032	0,193	0,163	-	0,018
Spd [μm^{-2}]	-	-	-	-	-	867	-
Spc [μm^{-1}]	-	-	-	-	-	0,012	-



Obr. 75 Porovnání soustruženého povrchu SI (nahore) dokončeného broušením B1(dole) [105]

SUPERFINIŠOVÁNÍ

Superfinišování lze charakterizovat jako zvláštní druh broušení. Obrobek koná rotační pohyb ($10 - 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). Kolmo na pohyb obrobku vykonává nástroj, superfinišovací hlava složená z jednoho až čtyř brusných kamenů, kmitavý pohyb o frekvenci $500 - 3\,000 \text{ kmitů} \cdot \text{min}^{-1}$. [3]



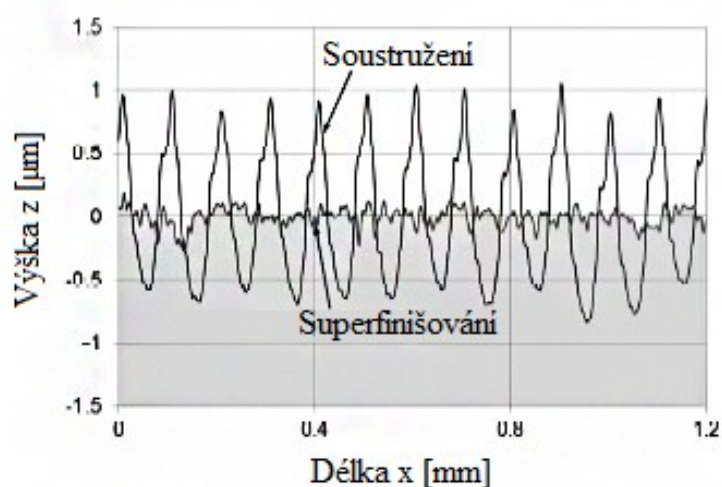
Obr. 76 3D struktura povrchu po superfinišování [98]

PARAMETRY POVRCHU DOSAHOVANÉHO SUPERFINIŠOVÁNÍM

Vzorek SP1 je z oceli AISI 5140 s tvrdostí povrchu $57 \pm 1 \text{ HRC}$, byl nejprve soustružen (S1 v tab. 27). Po soustružení následuje superfinišování. Použita je superfinišovací hlava s 99A320N10V kamenem. Obrobek se otáčí rychlostí $26 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, hlava pracuje s kmitočtem $680 \text{ cyklů} \cdot \text{min}^{-1}$ a posouvá se o $0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Superfinišování trvalo 45 min. [56]

Tab. 34 Parametry povrchu naměřené po superfinišování [56]

	Sa [μm]	Sz [μm]	Spk [μm]	Svk [μm]	Ssk [-]	Smr [%]	Sdq [μm·μm ⁻¹]	Sdr [%]
SP1	0,057	1,2	0,039	0,0935	- 1,03	100	0,0193	0,0186
Sds [mm ⁻²]	Ssc [μm ⁻¹]							
3 421	0,007							



Obr. 77 Porovnání 2D profilu povrchu po soustružení a superfinišování [56]

HONOVÁNÍ

Honováním získáváme velmi kvalitní povrch a můžeme odstraňovat i geometrické nepřesnosti jako kuželovitost, soudkovitou či osovou křivost díry. Řezný nástroj se nazývá honovací hlava a tvoří ji kameny z velmi jemného brusiva. Řezný pohyb je složený šroubovitý (rotační a posuvný vratný ve směru osy honování), vykonává jej nástroj a zanechává na obrobeném povrchu typickou křížovou stopu.[3]

PARAMETRY POVRCHU PO HONOVÁNÍ

Vyhodnocované povrchy jsou označeny H1 – H5.

H1:

Honovaný materiál ocel ASM 6308 zušlechťená na 35 - 40 HRC.[75]

H2, H3:

Plateau honovány byly vložky válce. Povrch H2 byl nejprve honován nahrubo při honovacím tlaku 4,1 MPa. Dokončení proběhlo za honovacího tlaku 1 MPa po dobu 23 s. Finální honování povrchu H3 trvalo 180 s, při honovacím tlaku 1 MPa a hrubovací tlak byl 18,1 MPa.[82]



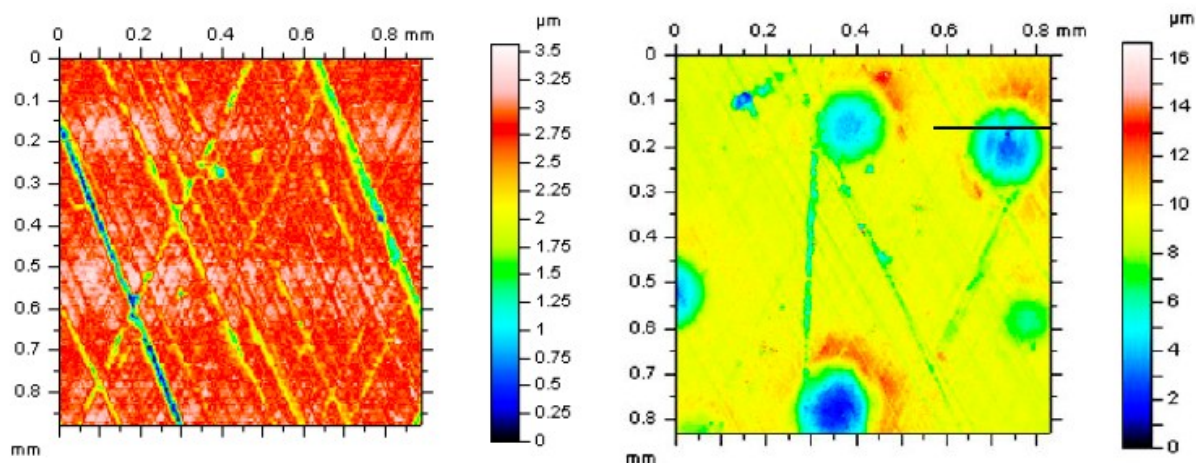
Obr. 78 Vzhled povrchu válce po honování [108]

H4, H5:

Jsou uvedeny pro porovnání povrchu bez textury a texturovaného. Obě plochy byly vyrobeny plateau honováním válce. Povrch H5 je opatřen maznými důlky s průměrnou hloubkou 5 μm , pokrývající 13 % plochy.[102]

Tab. 35 Parametry honovaných povrchů [75][82][102]

	H1	H2	H3	H4	H5
Sa [μm]	0,11	0,356	0,889	0,245	1,03
Sq [μm]	0,14	0,553	1,27	0,381	1,55
Sz [μm]	6,04	14,8	25,2	3,57	15,8
Sp [μm]	3,88	3,57	7,82	0,81	7,52
Sv [μm]	2,16	18,2	38,1	2,76	8,33
Spk [μm]	-	-	-	-	-
Svk [μm]	0,14	-	-	-	3,92
Ssk [-]	1,35	- 4,3	- 2,82	- 2,74	- 1,62
Sku [-]	27,4	49,4	15,2	13,8	6,64
Sdq [$\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]	0,0175	0,106	0,186	-	0,43
Sdr [%]	0,0152	0,549	1,66	-	8,35
Sds [mm^{-2}]	-	7 171	5 422	-	-
Ssc [μm^{-1}]	-	0,0449	0,0452	-	-
Spd [μm^{-2}]	2 505	-	-	-	1 299
Spc [μm^{-1}]	0,0049	-	-	-	2,06



Obr. 79 Příklady interferometrických skenů honovaného povrchu bez textury (vlevo) a s mazacími kapsami (napravo) [102]

LAPOVÁNÍ

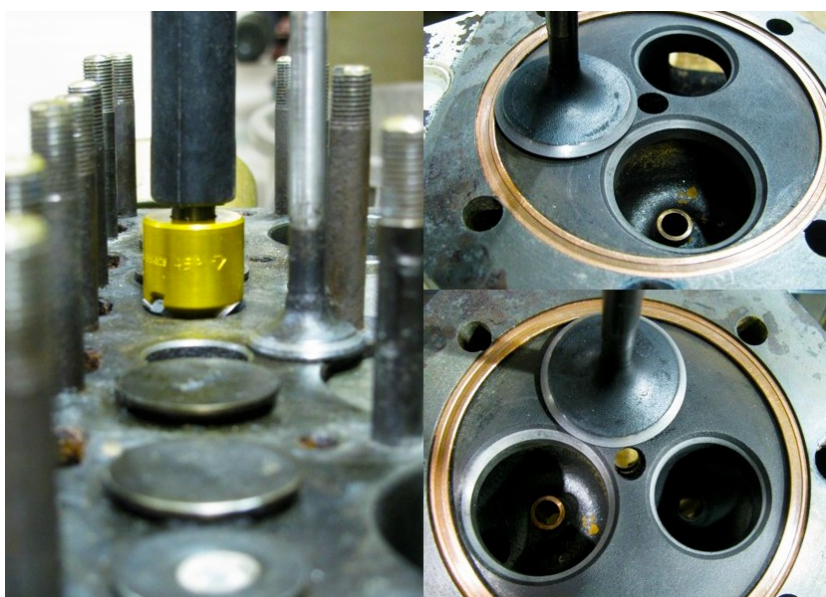
Nejvyšší jakost a geometrickou přesnost součásti získáváme pomocí lapování. Při lapování se mezi obrobek a nástroj (lapovací desku) přivádí kapalina s volným brusivem, které ořezává nerovnosti povrchu (hrubé lapování) nebo nerovnosti plasticky deformuje a povrch zpevní (jemné lapování).[3]

PARAMETRY POVRCHU PO LAPOVÁNÍ

V tab. 36 jsou uvedeny parametry povrchu po lapování diamantovým práškem. Lapovaným materiálem byla uhlíková ocel S235JR.[106]

Tab. 36 Parametry lapovaného povrchu [106]

Sa [μm]	Ra [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]	Sv [μm]	Sdq [μm.μm ⁻¹]	Sdr [%]	Spd [mm ⁻²]	Spc [mm ⁻¹]
0,798	0,41	1,02	15,3	8,75	0,064	0,208	449	0,00711



Obr. 80 Lapování válců a pístů motoru pro zlepšení těsnosti i zvětšení kontaktní plochy [121]

Tab. 37 Parametry jakosti ploch dosahované dokončovacími metodami třískového obrábění [3]

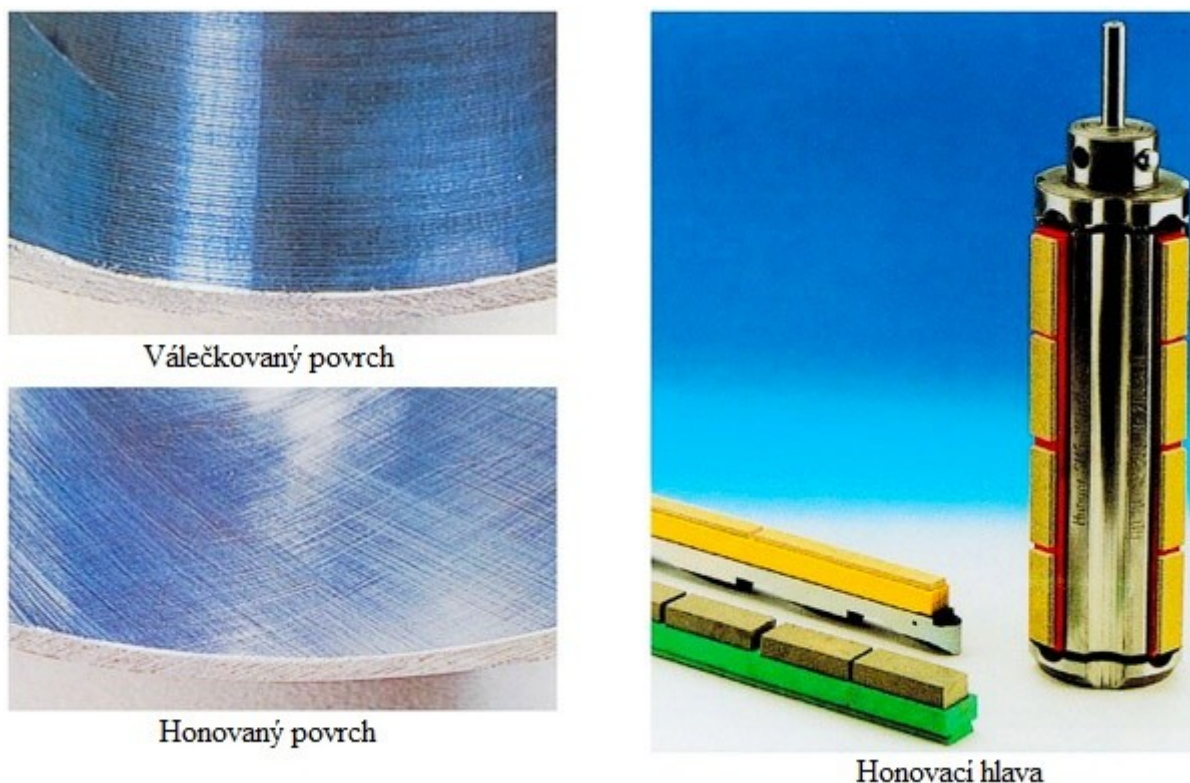
Metoda obrábění			Přesnost rozměrů IT		Drsnost plochy Ra [μm]	
			Střední	Rozsah	Střední	Rozsah
Vnější rotační plochy	Broušení	Hrubování	10	9 – 11	1,6	0,8 – 3,2
		Dokončování	5	5 – 6	0,4	0,2 – 0,6
		Jemné	4	3 – 5	0,2	0,05 – 0,4
	Lapování	Normální	4	3 – 4	0,1	0,05 – 0,2
		Jemné	2	1 – 2	0,05	0,012 – 0,05
	Superfi- nišování	Dokončovací	4	3 – 5	0,2	0,05 – 0,4
		Jemné	3	2 – 4	0,1	0,025 – 0,1
Vnitřní rotační plochy	Vnitřní broušení	Hrubování	9	9 – 11	1,6	1,6 – 3,2
		Dokončování	7	5 – 7	0,8	0,4 – 1,6
		Jemné	5	3 – 6	0,2	0,05 – 0,4
	Honování	Hrubování	7	6 – 8	0,4	0,2 – 0,8
		Dokončování	6	5 – 7	0,2	0,1 – 0,2
		Jemné	4	3 – 5	0,1	0,05 – 0,1
	Lapování	Dokončování	4	3 – 5	0,2	0,01 – 0,4
		Jemné	3	1 – 3	0,05	0,012 – 0,05
Rovinné plochy	Broušení	Hrubování	10	9 – 11	1,6	1,6 – 3,2
		Dokončování	7	5 – 7	0,8	0,4 – 1,6
		Jemné	5	3 – 6	0,2	0,05 – 0,4
	Lapování	Dokončování	4	3 – 5	0,2	0,1 – 0,4
		Jemné	3	1 – 3	0,05	0,012 – 0,05

5.4 BEZTRÍSKOVÉ DOKONČOVACÍ METODY

Zvyšování jakosti povrchu probíhá bez úběru třísky. Obrábění se uskutečňuje formou plastické deformace povrchové vrstvy. Vznikají tlaková napětí, jejichž účinkem je zpevnění povrchové vrstvy, což vede k lepším mechanickým vlastnostem povrchu.[3]

VÁLEČKOVÁNÍ

Válečkování nejčastěji používáme pro úpravu vnějších a vnitřních ploch válcového, ale taktéž kuželového tvaru. Na dokončovanou plochu je přitlačován kalený válec, který zamačkává nerovnosti a zlepšuje povrch. Válečkováním lze získat kvalitní povrch se zpevněnou povrchovou vrstvou.[3]



Obr. 81 Porovnání válečkem hlazeného a honovaného povrchu [118]

PARAMETRY POVRCHU PO VÁLEČKOVÁNÍ

Tab. 38 Parametry válečkováného povrchu z oceli S235JR [106]

Sa [μm]	Ra [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]	Sv [μm]	Sdq [μm.μm ⁻¹]	Sdr [%]	Spd [mm ⁻²]	Spc [mm ⁻¹]
1,89	1,6	2,35	18,9	7,56	0,102	0,519	263	0,0103

KULIČKOVÁNÍ

Obdoba válečkování je kuličkování. Kuličky upnuté v kuličkovací hlavě přitlačujeme k rotujícímu obrobku a vyhlazujeme jeho povrch. Kuličkovací nástroj se dobře přizpůsobí tvaru dokončované součásti, a proto kuličkování používáme pro tvarově složitější rotační plochy.[3]

BROKOVÁNÍ (DYNAMICKÉ KULIČKOVÁNÍ)

Na dokončovanou plochu jsou vysokou rychlostí (až 60 m.s^{-1}) vrhány kuličky z kalené oceli nebo bílé litiny. Obdobou je hydrofíniš, kde se používá skleněných kuliček (balotin), tryskaných v proudu kapaliny (mokrá balotina) nebo vzduchu (suchá balotina).[3]

PARAMETRY POVRCHU PO BROKOVÁNÍ

Vyhodnocované povrchy jsou označeny DK1 - DK3.

DK1, DK2:

Vzorky vyrobeny z materiálu AZ91, hořčíková slitina s mezí pevnosti $R_m = 235 \text{ MPa}$, mezí kluzu $R_{p0,2} = 175 \text{ MPa}$ a tvrdostí povrchu 83 HB. Dynamické kuličkování proběhlo pomocí kalených ložiskových kuliček o průměru 2,5 mm, čas trvání 6,5 min (DK1) a 20 min (DK2).[63]

DK3:

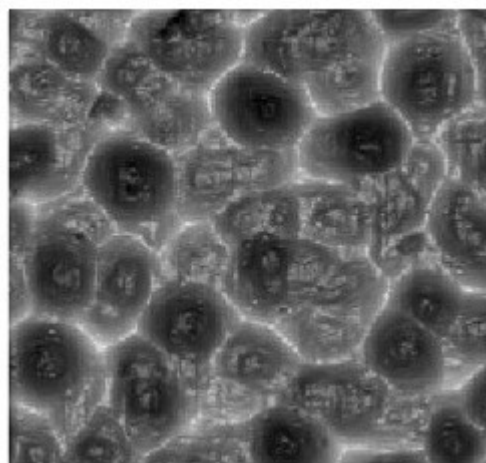
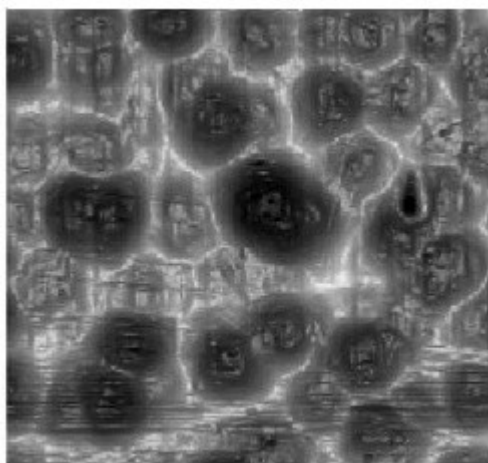
Dynamickému kuličkování bylo podrobeno ozubené kolo z oceli ASM 6308, zakalené na 35 - 40 HRC.[75]

Tab. 39 Parametry povrchu po brokování [63][75]

	DK1	DK2	DK3
Sa [μm]	2,78	2,16	0,33
Sq [μm]	3,47	2,72	0,42
Sz [μm]	18,2	15,7	6,01
Sp [μm]	10,4	8,91	3,49
Sv [μm]	12,4	10,5	2,52
Svk [μm]	-	-	0,43
Ssk [-]	- 0,25	0,056	- 0,23
Sku [-]	2,93	2,89	4,2
Sdq [$\mu\text{m}.\mu\text{m}^{-1}$]	0,0681	0,0656	0,0315
Sdr [%]	0,231	0,215	0,0495
Sds [mm^{-2}]	77,3	64,0	-
Ssc [μm^{-1}]	0,0056	0,00558	-
Spd [mm^{-2}]	-	-	1 617
Spc [μm^{-1}]	-	-	0,0055

Tab. 40 Mechanické vlastnosti povrchu po soustružení a brokování [63]

	Hloubka vytvrzení [mm]	Povrchová mikrotvrdost [MPa]	Mez pevnosti v únavě [MPa]
S4	-	90,5	60
DK1	0,18	98,2	80
DK2	0,30	114,0	112



Obr. 82 Vzhled brokovaných povrchů DK1 (vlevo) a DK2 (napravo) [63]

VYHLAZOVÁNÍ DIAMANTEM

Používá se diamantový nebo keramický vyhlazovací nástroj, který klouže po povrchu, vyhladí ho a zpevní. Metoda je vhodná pro úpravu povrchu tepelně zpracovaných ocelí. Vhodnou tepelnou úpravou s následným vyhlazením dosahujeme povrchu o tvrdosti 50 až 55 HRC při drsnosti Ra až 0,2 μm . [3]

PARAMETRY POVRCHU PO VYHLAZOVÁNÍ

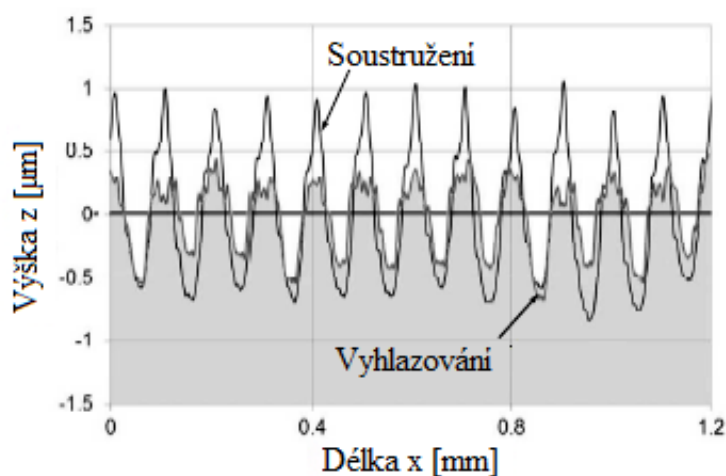
Označení vyhodnocovaných povrchů, vyhlazování diamantem (VD) a keramikou (VK).

Podmínky obrábění [56][62]:

	VD	VK
– nástroj	kulička, průměr 4 – 8 mm	kulička,
– materiál nástroje	Ti ₃ SiC ₂ (diamant)	Si ₃ N ₄ (keramika),
– vyhlazovaný materiál	ocel AISI 5140	ocel 42CrMo4,
– tvrdost povrchu	57 ± 1 HRC	32 HRC,
– předchozí operace	soustružení	broušení,
– přitlačná síla	150 – 250 N	600 N,
– rychlost obrobku		25 m.min ⁻¹ ,
– posuv	0,068 – 0,102 mm.ot. ⁻¹	0,075 mm.ot. ⁻¹ .

Tab. 41 Parametry povrchu dokončovaných vyhlazováním [56][62][55]

	Sa [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]	Sp [μm]	Sv [μm]	Svk [μm]	Ssk [-]
VD	min.	0,0497	0,0621	0,465	0,246	0,238	0,0529
	max.	0,185	0,235	1,98	1,51	1,50	0,249
VK	0,24	-	1,46	-	-	0,424	- 0,533
Mez pevnosti v únavě [MPa]	Sku [-]	Smr [%]	Sdq [$\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]	Sdr [%]	Sds [mm ⁻²]	Ssc [μm^{-1}]	
359,3	2,47	-	0,00577	0,00166	304	85,1.10 ⁻⁶	
409,4	4,44	-	0,02320	0,02690	807	0,00172	
-	-	89,2	0,02850	0,04070	1 793	0,008	



Obr. 83 Porovnání 2D profilu po soustružení a vyhlazování keramickou kuličkou [56]

Tab. 42 Parametry jakosti ploch dosahované
dokončovacími beztržiskovými metodami [3]

Metoda		Dosažovaná drsnost povrchu Ra [μm]
Válečkování	Statické	0,1 – 0,4
	Dynamické	0,2 – 0,8
Kuličkování		0,1 – 0,4
Brokování		0,8 – 1,6
Vyhlazování diamantem		až 0,2

5.5 CHEMICKO-TEPELNÉ ÚPRAVY POVRCHU

Primárním úkolem chemicko-tepelných povrchových úprav je zlepšit vlastnosti povrchu ocelí nebo litin, zejména otěruvzdornost, tvrdost, únavovou pevnost, korozivzdornost a tím zlepšit provozní vlastnosti i prodloužit životnost součástí.[5]

CEMENTOVÁNÍ A KALENÍ

Jedná se o sycení povrchu materiálu uhlíkem. Cementaci používáme pro nízkouhlíkové oceli o obsahu uhlíku 0,15 – 0,25 %. Probíhá při teplotách 910 – 930 °C v prostředí s vysokým obsahem uhlíku, nejčastěji koks. Po cementaci následuje kalení a popouštění při nízkých teplotách pro odstranění vnitřního pnutí. Konečnou strukturu tvoří martenzit s malým množstvím zbytkového austenitu. Vlivem tepelného zpracování dochází k mírné deformaci rozměrů, a proto kalené součásti dokončujeme broušením.[5]

NITROCEMENTOVÁNÍ A KALENÍ

Současné sycení povrchu uhlíkem a dusíkem. Oproti cementaci se snižuje doba sycení, dusík urychluje difuzi. Nitrocementování probíhá za nižších teplot 840 – 860 °C, dojde k menšímu bortění součásti (změně rozměrů). Metodu lze použít i pro oceli, které nejsou určené k tepelnému zpracování.[5]

NITRIDOVÁNÍ

Při nitridování sytíme povrch ocelí a litin dusíkem. Nitridování probíhá v plynném prostředí (NH_3) nebo solných lázních (kyanidů, kyanatanů), při teplotách 500 – 540 °C. Rozměry součásti se během nitridace mění minimálně, a proto nenásleduje již žádná úprava rozměrů.[5]

SULFONITRIDACE

Je sycení povrchu dusíkem a sírou. Podobně jako nitridování se sulfonitridace provádí v plynném prostředí nebo solné lázni. Výslednou strukturu tvoří tvrdé nitridy a měkké sirníky, které fungují jako tuhé mazadla.[5]

BORIDOVÁNÍ

Probíhá v solné lázni v rozmezí teplot 800 – 1 050 °C, za současného působení elektrolýzy. Jedná se o sycení povrchu bórem pro zvýšení tvrdosti a kluzných vlastností.[5]

ALITOVÁNÍ (DIFUZNÍ HLINÍKOVÁNÍ)

Sycení povrchu hliníkem nazýváme alitování. Alitování uskutečňujeme difuzním žháním při teplotě 700 – 1 100 °C. Alitovaný povrch obsahuje 32 až 34 % hliníku.[5]

ICHROMOVÁNÍ (DIFUZNÍ CHROMOVÁNÍ)

Je obdoba alitování, avšak povrch ocelí sytíme chromem. Teplota ichromování je v rozmezí 1 000 – 1 050 °C.[5]

DIFUZNÍ KŘEMÍKOVÁNÍ

Při difuzním křečkování sytíme povrch křemíkem při teplotě 800 – 1 100°C.[5]

Tab. 43 Vlastnosti povrchů po chemicko-tepelném zpracování [5]

Povrchová úprava	Optimální tloušťka vrstvy [mm]	Zvýšené vlastnosti
Cementování a kalení	0,80	– tvrdost 52 – 58 HRC – únavová životnost – odolnost proti opotřebení
Nitrocementování a kalení	0,25	– tvrdost až 800 HV – mez únavy – odolnost proti opotřebení
Nitridování	0,01 – 0,05	– tvrdost až 1 100 HV – odolnost proti opotřebení – únavová pevnost – korozivzdornost – křehkost
Sulfonitridace	0,02 – 0,06	– tvrdost – kluzné vlastnosti (sulfidované oceli dosahují podobných vlastností jako bronzy) – odolnost proti otěru – odolnost proti zadírání
Boridování	0,1 – 0,3	– tvrdost až 2 000 HV – odolnost proti opotřebení až do 950 °C – kluzné vlastnosti
Alitování (Difuzní hliníkování)	0,02 – 0,8	– tvrdost – žáruvzdornost – korozivzdornost
Ichromování (Difuzní chromování)	0,005 – 0,06	– tvrdost až 2 000 HV – žáruvzdornost – korozivzdornost
Difuzní křemíkování	-	– odolnost proti oxidaci až do 750 °C – odolnost proti korozi v agresivním prostředí (hlavně mořská voda, kyseliny)

5.6 ÚPRAVA POVRCHU POMOCÍ KONVERZNÍ VRSTVY

Do této kategorie řadíme metody, kterými upravujeme vlastnosti povrchu změnou chemického složení. Nejpoužívanějším způsobem vzniku takové vrstvy je oxidace.[5]

ČERNĚNÍ

Černění používáme pro oceli (brunýrování), ale také neželezné kovy, nejčastěji měď a její slitiny. Název tato metoda dostala podle konečné barvy oxidické vrstvy, která je hnědočerná až černá.[5]

CHROMÁTOVÁNÍ

Při chromátování vzniká ochranná vrstva složená ze směsi chromu a základního materiálu. Tato vrstva má nejen protikorozi schopnost, ale používá se také pod organické nátěry, neboť zajišťuje dobrou přilnavost.[5]

FOSFÁTOVÁNÍ

Řadí se mezi nejpoužívanější úpravy povrchů. Fosfátují se oceli, zinek, hliník a jejich slitiny v roztoku kyseliny fosforečné.[5]



Součásti po fosfátování



Chromované součásti



Vzhled součásti před a po černění

Obr. 84 Konverzní vrstvy [115]

ELOXOVÁNÍ

Elektrolytická oxidace hliníku slouží pro vytvoření souvislé oxidické vrstvy na povrchu hliníku. Tato vrstva může být cíleně upravována a tak dosahuje lepších vlastností i větší tloušťky než přírodní oxidová vrstva.[5]

CÍNOVÁNÍ

Používáme pro zlepšení ochrany proti korozi. Pomocí elektrolýzy je na povrchu materiálu vytvořena cínová ochranná vrstva.[114]

Tab. 44 Vlastnosti povrchů konverzních vrstev [5]/[114]

Povrchová úprava	Optimální tloušťka vrstvy [μm]	Zvýšené vlastnosti
Černění	0,5 – 0,8	– odolnost proti korozi – vzhled
Chromátování	0,3 – 0,5	– odolnost proti korozi – přilnavost pro další vrstvy – usnadňuje záběh součástí – levnější než fosfátování
Fosfátování	0,25 – 0,40	– ochrana vůči korozi – přilnavost pro další vrstvy – tvoří nosnou plochu pro vrstvu maziva, snižuje tření – tvrdost – kluzné vlastnosti – vyšší nasákavost olejem – snižuje hlučnost
Eloxování	3 - 120	– korozivzdornost – odolnost vůči mechanickému poškození – trvalá vrstva i při vysokých teplotách – tvrdost 350 – 450 HV, tvrdé eloxování 500 – 800 HV – otěruvzdornost
Cínování	3 - 50	– odolnost vůči korozi – houževnatost povrchu – zdravotní nezávadnost

ZÁVĚR

Dnešní doba klade požadavky, zejména na ekologii, snižování ztrát a delší životnosti součástí. To platí i pro kluzná ložiska, pro něž navíc dochází ke zvyšování přenášených zatížení, při současné snaze zachování nebo lépe zmenšení jejich velikosti.

Abychom vyhověli těmto vzrůstajícím nárokům, je nutné se zaměřit na vývoj nových a kvalitnějších materiálů. S tím neodmyslitelně souvisí problematika jejich obrábění, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality povrchu a jeho vlastností.

Dnes se již postupně upouští od konstrukcí ložisek tvořených pouze jedním materiálem a přechází se stále častěji k volbě kombinací spojení jednotlivých druhů materiálů ve formě vícevrstvých ložisek. Dnešní technologie umožňuje i kombinace materiálů, které byly dříve nerealizovatelné. Příkladem se dá uvést například spojení kovu s plastem či kovu s keramikou, jenž má za následek zvýšení kluzných vlastností a znásobení samotné životnosti ložiska.

Se vzrůstajícími nároky na kvality používaných materiálů nastává problém v jejich úpravě a výsledném obrábění. Stále více nachází uplatnění i nekonvenční metody obrábění, hlavně díky nezávislosti řezných podmínek na vlastnostech materiálu. Nastávají i inovativní změny v dokončovacích operacích, kdy dochází ke zlepšování povrchu bez úběru třísky, při současném získání zpevněné povrchové vrstvy vykazující lepší mechanické vlastnosti.

Značnou změnu vlastností a povrchu kluzných ložisek lze dosáhnout povrchovou úpravou. Ať se jedná o chemicko-tepelné zpracování nebo vytváření konverzních vrstev, získáváme nárůst tvrdosti povrchu, ořetuvzdornosti, životnosti a zkvalitnění kluzných vlastností.

Jedná-li se o volbu obrábění, použití materiálu či volbu vhodné povrchové úpravy vždy velmi záleží na konečné drsnosti kluzného povrchu ložiska. Základní vliv drsnosti povrchu nastává při mazání, kdy je potřeba dosahovat co nejmenší hodnoty, ale zároveň zachovat nebo uměle vytvořit (mazací kapsy), které vytváří vhodné podmínky pro uchování maziva v oblastech mezního mazání.

Závěrem lze říci, že kluzná ložiska jsou v dnešní době na vzestupu, jejich použití dosahuje až 30 % z celkových aplikací ložisek a v budoucnu se toto číslo bude zvyšovat.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BOHÁČEK, František et al. *Části a mechanismy strojů II: Hřídele, tribologie, ložiska*. Vyd. 1. Brno: Ediční středisko VUT, 1983, 214 s. ISBN 80-214-0829-4.
- [2] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. 4. přeprac. vyd., 2. v nakl. CERM. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
- [3] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [4] KROPÁČ, Jiří. *Technická měření a zkoušky*. 1. vyd. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 1986, 235 s.
- [5] MICHNA, Štefan, Jarmila TRPČEVSKÁ a Iva NOVÁ. *Strojírenská technologie*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012, 337 s. ISBN 978-80-7414-501-8.
- [6] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů: stručný přehled, 1. díl*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002, 158 s. ISBN 80-7083-584-2.
- [7] PRIESTER, Jozef et al. *Klzná ložiska*. 1. vyd. Bratislava; Praha: ALFA/SNTL, 1980, 360 s.
- [8] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [9] ŠAFR, Emil. *Technika mazání*. 2. doplněné vydání. Praha: SNTL, 1970, 381 s.
- [10] VINŠ, Jindřich. *Kluzná ložiska*. 2. přep.vyd. Praha: SNTL, 1971, 373 s.
- [11] ZIEGLER, Jiří, František HELEBRANT a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost: Díl I. Tribodiagnostika*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2004, 158 s. ISBN 80-7078-883-6.
- [12] ČSN 41 8280. *Prášková metalurgie. Spékaná ocel 18 280*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
- [13] ČSN 41 8344. *Prášková metalurgie. Spékaný bronz 18 344*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
- [14] ČSN 42 2415. *Litina 42 2415 s lupínkovým grafitem*. Praha: Český normalizační institut, 1989.
- [15] ČSN 42 2456. *Litina 42 2456 s lupínkovým grafitem*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [16] ČSN 42 3016. *Slitina mědi tvářená 42 3016 CuSn6*. Praha: Český normalizační institut, 1978.

- [17] ČSN 42 3018. *Slitina mědi tvářená 42 3018 CuSn8*. Praha: Český normalizační institut, 1978.
- [18] ČSN 42 3119. *Slitina mědi na odlitky 42 3119 CuSn10*. Praha: Vydavatelství Norem, 1992.
- [19] ČSN 42 3120. *Slitina mědi na odlitky 42 3120 CuSn10P1*. Praha: Vydavatelství Norem, 1992.
- [20] ČSN 42 3121. *Slitina mědi na odlitky 42 3121 CuSn10Pb5*. Praha: Vydavatelství Norem, 1992.
- [21] ČSN 42 3122. *Slitina mědi na odlitky 42 3122 CuSn10Pb10*. Praha: Vydavatelství Norem, 1992.
- [22] ČSN 42 3123. *Slitina mědi na odlitky 42 3123 CuSn12*. Praha: Vydavatelství Norem, 1992.
- [23] ČSN 42 3135. *Slitina mědi na odlitky 42 3135 CuSn5Pb5Zn5*. Praha: Vydavatelství Norem, 1992.
- [24] ČSN 42 3137. *Slitina mědi na odlitky 42 3137 CuSn8Pb3Zn6*. Praha: Vydavatelství Norem, 1992.
- [25] ČSN 42 3138. *Slitina mědi na odlitky 42 3138 CuSn10Zn2*. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [26] ČSN 42 3146. *Slitina mědi na odlitky 42 3146 CuAl10Fe3Mn1,5*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [27] ČSN 42 3182. *Slitina mědi na odlitky 42 3182 CuPb20*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [28] ČSN 42 3183. *Slitina mědi na odlitky 42 3183 CuPb22Sn3*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [29] ČSN 42 3184. *Slitina mědi na odlitky 42 3184 CuPb30Fe*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [30] ČSN 42 3187. *Slitina mědi na odlitky 42 3187 CuPb30Ag1,5Sn*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [31] ČSN 42 3188. *Slitina mědi na odlitky 42 3188 CuPb30Ag3*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [32] ČSN 42 3226. *Slitina mědi tvářená 42 3226 CuZn45Pb3Mn3Fe*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [33] ČSN 42 3231. *Slitina mědi tvářená 42 3231 CuZn40Mn3Al1*. Praha: Český normalizační institut, 1979.

- [34] ČSN 42 3326. *Slitina mědi na odlitky 42 3326 CuZn45Mn4Pb3Fe1*. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [35] ČSN 42 3720. *Olověná kompozice 42 3720 PbSn10Sb15Cu1*. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [36] ČSN 42 3721. *Olověná kompozice 42 3721 PbSn6Sb14CuAs*. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [37] ČSN 42 3730. *Olověná kompozice 42 3730 PbSn6Sb6*. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [38] ČSN 42 3753. *Cínová kompozice 42 3753 SnSb10Cu3Ni*. Praha: Český normalizační institut, 1980.
- [39] ČSN 42 4261. *Slitina hliníku tvářená 42 4261 AlCu8Fe1Si*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [40] ČSN 42 4361. *Slitina hliníku na odlitky 42 4361 AlCu8FeSi*. Praha: Český normalizační institut, 1987.
- [41] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [42] ČSN EN ISO 25178-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 3: Specifikace operátorů*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [43] ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [44] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s.
- [45] *The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions* [online]. 1993 [cit. 2014-05-19]. ISBN 0-7044-1313-2.
Dostupné z: http://bookshop.europa.eu/fi/the-development-of-methods-for-the-characterisation-of-roughness-in-three-dimensions-pbEUNA15178/downloads/EU-NA-15178-EN-C/EUNA15178ENC_001.pdf;pgid=y8dIS7GUWMdSR0EAlMEUUsWb0000Bx_Opu xw;sid=jonufKxvyPfuTv88SrFw285KLEqSLOEMkPs=?FileName=EUNA15178ENC_001.pdf&SKU=EUNA15178ENC_PDF&CatalogueNumber=EU-NA-15178-EN-C
- [46] BC. HAVLÁSEK, Michal. *Rešerše zaměřena na naklápací segmentová ložiska (výpočtové a experimentální modelování)* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64979. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Eduard Malenovský, DrSc.

- [47] ING. HAVLÍK, Luboš. *Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavice MT3* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-03-10].
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52728. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Kouřil, Ph.D.
- [48] KONEČNÝ, Jan. *Hodnocení struktury povrchu bezkontaktní metodou* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-03-03]. 39 s.
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68527. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
- [49] Aplikace plastů ve strojírenských součástech. *Teseco* [online]. 2010 [cit. 2014-03-21].
Dostupné z: http://www.teseco.cz/pdf/pouziti_plastu.pdf
- [50] BLATTER, A., M. MAILLAT, SM. PIMENOV, GA. SHAFEEV, AV. SIMAKIN a EN. LOUBNIN. *Lubricated sliding performance of laser-patterned sapphire* [online]. 1999 [cit. 2014-02-14]. ISSN 0043-1648.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0043164899001507>
- [51] COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION. *Cost-Effective Manufacturing: Copper Alloy Bearings* [online]. 2007 [cit. 2014-04-12].
Dostupné z: <http://www.copperinfo.co.uk/design-and-manufacture/downloads/pub-45-copper-alloy-bearings.pdf>
- [52] DUFFET, G., P. SALLAMAND a AB. VANNES. *Improvement in friction by cw Nd : YAG laser surface treatment on cast iron cylinder bore* [online]. 2003 [cit. 2014-02-15]. ISSN 0169-4332.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0169433202011194>
- [53] Dynamic Evolution of Interface Roughness During Friction and Wear Processes. *SCANNING* [online]. 2014, č. 36, s. 30-38 [cit. 2014-05-16].
Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sca.21082/pdf>
- [54] GALDA, L., A. DZIERWA, J. SEP a P. PAWLUS. *The Effect of Oil Pockets Shape and Distribution on Seizure Resistance in Lubricated Sliding* [online]. 2010 [cit. 2014-02-17]. ISSN 1023-8883.
Dostupné z: <http://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s11249-009-9522-7>
- [55] GRZESIK, Wit, Krzysztof ŻAK a Piotr KISZKA. *Comparison of surface textures generated in hard turning and grinding operations* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-17]. ISSN 2212-8271.
Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S221282711400016X/1-s2.0-S221282711400016X-main.pdf?_tid=5972e5a6-e3e3-11e3-9d2f-00000aab0f26&acdnat=1401005314_cc4a565c04d400469c803da62be11cac

- [56] GRZESIK, Wit a Krzysztof ZAK. Comparison of surface textures produced by finish cutting, abrasive and burnishing operations in terms of their functional properties. *Journal of Machine Engineering* [online]. 2013, č. 2 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.not.pl/wydawnictwo/2013JOM/V2/4_GRZESIK.pdf
- [57] Kluzná ložiska ze spékaných kovů. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2001, č. 11 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kluzna-loziska-ze-spekanych-kovu.html>
- [58] Kluzná ložiska z plněných termoplastů. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2001, č. 1 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kluzna-loziska-z-plnenych-termoplastu.html>
- [59] *Kluzná pouzdra* [online]. 2010 [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: http://www.midol.cz/files/Katalogy/Kluzn_pouzdra.pdf
- [60] *Kluzná pouzdra SKF* [online]. 2001 [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.loziskavilim.cz/files/KluznaPouzdraSKF.pdf>
- [61] KONDO, Yuriko, Tahahiro KOYAMA a Shinya SASAKI. *Ionic Liquids - New Aspects for the Future: Tribological Properties of Ionic Liquids* [online]. InTech, 2013, s. 128-140 [cit. 2014-03-18]. ISBN 978-953-51-0937-2. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39998.pdf>
- [62] KORZYNSKI, M., J. LUBAS, S. SWIRAD a K. DUDEK. *Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool* [online]. 2011 [cit. 2014-05-15]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013610002724>
- [63] KORZYNSKI, M., T. ZARSKI a K. KORZYNSKA. *Surface layer condition and the fatigue strength of an AZ91 alloy after ball peening* [online]. 2011 [cit. 2014-05-14]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013611001865>
- [64] KUBIAK, K. J., T. G. MATHIA a S. CARRAS. *Morphological kriteria for micro tolerancing in manufacturing processes of assembly joints under petting conditions* [online]. 2010 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.kubiak.co.uk/publication/18_KubiakMC2010.pdf
- [65] LIZOTTE, Todd. Scatching the surface. *Machine Design* [online]. 2000 [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/technologies/scatching-surface>
- [66] *Ložiska* [online]. 2012 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.347.vsb.cz/staff/kunzova/zs-kunzova-prednaska10.pdf>
- [67] *Ložiska. Mechatronika* [online]. 2011 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-str-11_03_loziska.pdf

- [68] LU, Yan, Meng HUA a Zuomin LIU. *The biomimetic shark skin optimization design method for Improving lubrication effect of engineering surface* [online]. 2013 [cit. 2014-05-22]. DOI: 10.1115/1.4026972.
Dostupné z: http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JOTRE9/929814/trib_136_03_031703.pdf
- [69] Ložiskové materiály ze spinodálních slitin. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2007, č. 11 [cit. 2014-04-08].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/loziskove-materialy-ze-spinodalnich-slitin.html>
- [70] Magnetická ložiska SKF: od inovace k osvědčeným řešením. *Odborné časopisy* [online]. 2005, č. 4 [cit. 2014-04-16].
Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26267
- [71] MAREČEK, Petr. *Uhlíkové kompozity v konstrukci vzducholodí* [online]. 2008 [cit. 2014-03-22].
Dostupné z: http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/vyzkum/zeliv08/cd/pmo/zeliv_pmo_04.pdf
- [72] Materiály, použití a návrh kluzných ložisek. *TRIBOLÓGIA* [online]. © 2008 - 2014 [cit. 2014-03-14].
Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/1-2008/klzne_loziska_tribotechnika.html
- [73] MAUROTTO, A., R. MUHAMMAD, A. ROY a V. V. SILBERSCHMIDT. *Enhanced ultrasonically assisted turning of a beta-titanium alloy* [online]. 2013 [cit. 2014-05-14]. ISSN 0041-624X.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0041624X13000693>
- [74] *Mazání SKF* [online]. 2012 [cit. 2014-02-18].
Dostupné z: <http://www.tpb.cz/editor/filestore/File/20.%20Mazani.pdf>
- [75] MICHALSKI, J., P. PAWLUS a W. ZELASKO. *Surface topography of cylindrical gear wheels after smoothing in abrasive mass, honing and shot peening* [online]. 2011 [cit. 2014-05-16]. ISSN 17426588.
Dostupné z: http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/1742-6596/311/1/012022/pdf/1742-6596_311_1_012022.pdf
- [76] *Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static friction coefficient of rough surfaces* [online]. 2004 [cit. 2014-03-11]. ISSN 0301-679X.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0301679X04000155>
- [77] MOLYNEAUX, Alex K. *Ceramic Spiral Groove Bearings in Oil-Free Compressors* [online]. 2009 [cit. 2014-04-15].
Dostupné z: <http://www.ofttech.com/pdfpages/Ceramic%20Oil-Free%20Bearings.pdf>
- [78] Morgan carbon bearings: Application data. *Morgan AM&T* [online]. 2009 [cit. 2014-03-27].
Dostupné z: <http://www.morganamt.com/gb/files/Morgan%20Carbon%20GB/MORGAN%20AMT%20Carbon%20Bearings.pdf>

- [79] NADOLNY, Krzysztof. Durability of Al_2O_3 grinding wheels with zone-diversified structure in single-pass internal cylindrical grinding. *ADVANCES IN MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY* [online]. 2011, č. 3 [cit. 2014-05-17].
Dostupné z: <http://advancesmst.prz.edu.pl/pdfy/04Nadolny.pdf>
- [80] Novinky v kontrole textury a tvaru povrchu. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2013, č. 10 [cit. 2014-03-13].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-v-kontrole-textury-a-tvaru-povrchu-10882.html>
- [81] *Numerical characterisation of biomedical titanium surface texture using novel feature parameters* [online]. 2011 [cit. 2014-05-18]. ISSN 0043-1648.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0043164811003905>
- [82] PAWLUS, P., T. CIESLAK a T. MATHIA. *The study of cylinder liner plateau honing process* [online]. 2009 [cit. 2014-05-17]. ISSN 0924-0136.
Dostupné z: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S092401360900171X/1-s2.0-S092401360900171X-main.pdf?_tid=ee8b16b0-e3fa-11e3-a979-00000aab0f26&acdnat=1401015443_d93df06639e5a733dc66b356611ad74d
- [83] Pokrok v měření a hodnocení struktury povrchu. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2001, č. 4 [cit. 2014-03-11].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
- [84] *Povrchy povlaků - mikrogeometrie* [online]. 2008 [cit. 2014-03-04].
Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf
- [85] Prevádzkové podmienky a porušenie klzných ložísk. *Strojárstvo / Strojírenství - prvý strojárenský server* [online]. [2012] [cit. 2014-02-08].
Dostupné z: <http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/loiska/1558-prevadzko-ved-podmienky-a-poruenie-klzných-loisk>
- [86] Přednosti prostorového hodnocení textury povrchu v praxi. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2008, č. 6 [cit. 2014-03-14].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prednosti-prostoroveho-hodnoceni-textury-povrchu-v-praxi.html>
- [87] QUINSAT, Y., S. LAVERNHE a C. LARTIGUE. *Characterization of 3D surface topography in 5-axis milling* [online]. 2011 [cit. 2014-05-16]. ISSN 0043-1648.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0043164810002231>
- [88] RADIL, Kelvin a Michelle ZESZOTEK. *An Experimental Investigation into the Temperature Profile of a Compliant Foil Air Bearing* [online]. 2004 [cit. 2014-04-12]. ISSN 1040-2004.
Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/225373493/abstract?accountid=17115>

- [89] RAMASAWMY, H. a L. BLUNT. *Effect of EDM process parameters on 3D surface topography* [online]. 2004 [cit. 2014-05-14]. ISSN 0924-0136.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013603006526>
- [90] RAMASAWMY, H. a L. BLUNT. *3D surface topography assessment of the effect of different electrolytes during electrochemical polishing of EDM surfaces* [online]. 2002 [cit. 2014-05-15]. ISSN 0890-6955.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0890695501001547>
- [91] *Reactive Sintering of Aluminum Titanate* [online]. 2014 [cit. 2014-03-23].
Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/29796.pdf>
- [92] ROBBE-VALLOIRE, F. *Statistical analysis of asperities on a rough surface* [online]. 2001 [cit. 2014-03-07]. ISSN 0043-1648.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0043164801005488>
- [93] RYK, G., Y. KLIGERMAN a I. ETSION. *Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components* [online]. 2002 [cit. 2014-02-15]. ISSN 1040-2004.
Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/225372526?accountid=17115>
- [94] *Spherical plain bearings, plain bushes, rod ends* [online]. 2008 [cit. 2014-04-20].
Dostupné z: http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/238_de_en_1.pdf
- [95] Spekané materiály. *Katedra materiálového inžinierstva - Strojnícka fakulta* [online]. 2011 [cit. 2014-03-18].
Dostupné z: http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/K-6.pred_.pdf
- [96] SVOBODOVÁ, Magdalena. *Součásti točivého a přímočarého pohybu: Druhy tření, mazání ložisek* [online]. 2012 [cit. 2014-02-14].
Dostupné z: http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_14-02.pdf
- [97] ŠAMÁNEK, O. *Metody modifikace topografie strojních prvků* [online]. 2010 [cit. 2014-04-08].
Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Modifikace_topografie_strojnich_prvku-prezentace.pdf
- [98] ŠPERKA, Petr. *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. 2009 [cit. 2014-04-25].
Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_technologii_obrabeni.pdf
- [99] Špičková ložisková slitina bez berylia. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2010, č. 7 [cit. 2014-04-05].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/spickova-loziskova-slitina-bez-berylia.html>

- [100] Teflon má velice nízký koeficient tření. *Technik.iHNed.cz: Technické a technologické novinky pro výzkum, výrobu a trh* [online]. 2011 [cit. 2014-04-30].
Dostupné z: <http://technik.ihned.cz/c1-52250740-teflon-ma-velice-nizky-koeficient-treni>

- [101] Technické plasty. *Technické plasty Brno | Tribon: Polotovary z technických plastů* [online]. 2008 [cit. 2014-03-25].
Dostupné z: <http://www.technicke-plasty-tribon.cz/data/documents/ptfe-cisty-a-plneny.pdf>

- [102] The effect of reference plane on values of areal surface topography parameters from cylindrical elements. *METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS* [online]. 2014, č. 2 [cit. 2014-05-17].
Dostupné z: http://www.metrology.pg.gda.pl/full/2014/M&MS_2014_247.pdf

- [103] TRANSPORT RESEARCH LABORATORY. *Measuring skid resistance without contact* [online]. 2010 [cit. 2014-05-14].
Dostupné z: http://www.transportresearchfoundation.co.uk/PDF/PPR-538_Contactless-microtexture-09_10.pdf

- [104] Uhlíkové povlaky ložisek. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2002, č. 11 [cit. 2014-03-28].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/uhlikove-povlaky-lozisek.html>

- [105] WAIKAR, R. A. a Y. GUO. *A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding* [online]. 2008 [cit. 2014-05-15]. ISSN 0924-0136.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013607006073>

- [106] ZIELECKI, W., P. PAWLUS, R. PERŁOWSKI a A. DZIERWA. *Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pre-treatment* [online]. 2013 [cit. 2014-05-20]. ISSN 16449665.
Dostupné z: http://ac.els-cdn.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S1644966513000290/1-s2.0-S1644966513000290-main.pdf?_tid=223b9010-e429-11e3-8909-00000aab0f26&acdnat=1401035287_8dedc6f593902f6f36fbb515358f9687

- [107] Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2004, č. 11 [cit. 2014-03-10].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html>

- [108] 300tdi cylinder bore honing?. *Land Rover Owner &bull* [online]. 2009 [cit. 2014-05-01].
Dostupné z: <http://forum.lro.com/viewtopic.php?f=19&t=33475>

- [109] ACUBE® 100 Alloy. *Dvanced specialty, titanium and powder metallurgy materials from Carpenter Technology* [online]. 2014 [cit. 2014-05-19].
Dostupné z: <http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&c=TechArt&E=341>

- [110] Aluminium Titanate. *AZoM&trade: The A to Z of Materials and AZojomo - The "AZo Journal of Materials Online"* [online]. 2000-2014 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1223>
- [111] Areal Field Parameters. *Digital Surf* [online]. © 2006-2014 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.digitalsurf.fr/en/guidearealfieldparameters.html>
- [112] Beryllium-free Cobalt Alloy for High-load Bushings. *ASM Home - ASM International* [online]. 2010 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.asminternational.org/documents/10192/1874587/amp16803p19.pdf/ade20cfa-ce80-4e0c-8038-7af1cd6cedc7>
- [113] *CeramTec International* [online]. 2012 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.com/>
- [114] Cínování. *BOMEX CZ - Povrchové Úpravy* [online]. 2013 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://www.bomex.cz/cz/3-technologie/10-cinovani.html>
- [115] Conversion Coatings. *Aerospace, Military and Medical Coatings: Anodizing, Electroplating, Electroless Nickel, Electropolish, Nadcap Plating* [online]. ©2010 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.anoplate.com/finishes/conversioncoatings.html>
- [116] CuBe2 (CW101C). *European Steel and Alloy Grades / Numbers* [online]. © 2011-2014 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1294
- [117] CycleWorld Forums RSS Feed. *CycleWorld Forums* [online]. 2002 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://forums.cycleworld.com/showthread.php?t=249276>
- [118] CYLINDER TUBES : PRODUCTION FACILITIES. *Safwa* [online]. 2011 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.safwa.com.eg/Default.aspx?uc=Product/ProductSubSubCategoryDetails&MenuItemID=35&ProductSubCategoryID=12&sub=True&productid=33>
- [119] Degradace strojních součástí. *Degradace strojních součástí* [online]. 2003 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd_txt/Mngr_ram_txt2.htm
- [120] Elektroizolanty. *Rubbex s.r.o.* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-21]. Dostupné z: http://www.rubbex.sk/produkty/elektroizolanty#_textit
- [121] Inside IYRS Blog: Systems Program Report. *IYRS School of Technology & Trades* [online]. 2010 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://iyrs.edu/AboutIYRS/InsideIYRSBlog/tabid/741/EntryId/140/Systems-Report-Time.aspx>
- [122] *KAJMAN K: velkoobchod pro čistící hadry a technické plasty* [online]. © 2006 [cit. 2014-03-21]. Dostupné z: <http://kajmank.cz/>

- [123] Keramická ložiska KSB RESIDUR: robustní kluzná ložiska pro všechna čerpadla instalovaná do potrubí. *KSB České republiky - Čerpadla Armatury Servis* [online]. 2011 [cit. 2014-04-02].
Dostupné z: http://www.ksb.com/ksb-cz/Products_and_Services/Water/Water-extraction/KSB-Residur/645028/KSB-Residur-ceramic-bearings.html
- [124] Ložiska, náhradní díly a strojní komponenty. *Ložiska TROMA* [online]. 2013 [cit. 2014-03-03].
Dostupné z: <http://www.troma.cz/detailvyrobce.aspx?IDVyrobcce=29>
- [125] Ložiskové pánve motoru PERKINS (šály). *Náhradní díly Perkins* [online]. © 2012 [cit. 2014-03-01].
Dostupné z: <http://www.perkins-dily.cz/products/loziskove-panve-perkins/>
- [126] Materiály. *KARBOTECHNIK - Uhlík/Grafit: Uhlíkové kartáče - zpracování, výroba, prodej* [online]. 2009 [cit. 2014-03-22].
Dostupné z: http://www.karbotechnik.cz/materialy.html#odk_top
- [127] *MatNet Slovakia: Výzkumno-vývojová a inovačná sieť pre oblasť materiálov a technológií* [online]. © 2006 [cit. 2014-03-23].
Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/>
- [128] MICHIGAN METROLOGY, LLC. *Michigan Metrology 3D Surface Roughness Measurement and Wear Measurement: Analysis and Inspection* [online]. © 2010-2014 [cit. 2014-05-18].
Dostupné z: <http://www.michmet.com/>
- [129] Oil-Free Turbomachinery: Foil Bearings. *National Aeronautics and Space Administration* [online]. 2009 [cit. 2014-04-17].
Dostupné z: http://www.grc.nasa.gov/WWW/StructuresMaterials/TribMech/research/D_foil_bearings.html
- [130] *Online Materials Information Resource - MatWeb* [online]. 1996-2014 [cit. 2014-03-23].
Dostupné z: <http://matweb.com/>
- [131] Plain Bearing Remetalling and Machining Services. *Alloy Bearings: Remetal, Manufacture and Supply White Metal Bearings* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-17].
Dostupné z: <http://www.alloybearings.com/remetal.html>
- [132] Product Data Sheet – Stainless Steel: Nitronic 60 UNS-S21800. *Austral Wright Metals: Metal Sheet, Plate, Coil, Tube, Rod, Bar* [online]. © 2000-2012 [cit. 2014-04-08].
Dostupné z: <http://australwright.com.au/uns-s21800-nitronic-60/>
- [133] Product. *WUXI LOTTON BEARING CO.,LTD* [online]. © 2012 [cit. 2014-04-23].
Dostupné z: <http://www.lottonbearing.com/product.asp?pone=27>
- [134] Průmyslová kluzná ložiska Brno. *Prodej ložisek a lineární techniky Brno | MIDOL* [online]. © 2008 [cit. 2014-03-01].
Dostupné z: <http://www.midol.cz/midol-cz/kluzna-loziska/>

- [135] Roughness (3D) parameter. OLYMPUS. *Olympus* [online]. 2012 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: http://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/
- [136] Self-lubricating bronze plain bearing: BRO-LUB®. *DirectIndustry: The Virtual Industrial Exhibition: sensor - automation - motor - pump - handling - packaging ...* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/glt-gleitlagertechnik-gmbh/self-lubricating-bronze-plain-bearings-55467-572655.html>
- [137] South Bend lathe milling attachment – Part VIII: Surfacing the mill bed and test run. *Blackburn Tools - woodworking tools old & new* [online]. 2013 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.blackburntools.com/blog/south-bend-lathe-milling-attachment-part-viii/>
- [138] Super Precision Plain Bearings. *Industrial Bearings, Power Transmission & Aerospace | Acorn Bearings* [online]. 2013 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.acornbearings.co.uk/aerospace/super-precision-plain-bearings>
- [139] *Techlab* [online]. 2010, 28.4.2014 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/>
- [140] Všeobecně. *Autodesk Knowledge Network* [online]. © 2014 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://knowledge.autodesk.com/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/CSY/Inventor/files/GUID-81D3E98C-7F3D-4DF8-8550-DE3401E7147C-htm.html>
- [141] Why is Filtration Important?. *Pall Corporation: Filtration, Purification, Separation and Environmental Technologies* [online]. © 2013 [cit. 2014-02-08]. Dostupné z: <http://www.pall.de/main/industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page>
- [142] Wood Bearings for a Floating Arm Trebuchet. *Woodex-Meco* [online]. 2008 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.woodexbearing.com/treb.php>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[-]	počet piků a prohlubní na měřené ploše
A ₁₀	[%]	tažnost, zkušební tyčinka má délku desetinásobku průměru
A ₅	[%]	tažnost, zkušební tyčinka má délku pětinasobku průměru
CBN		cubic nitric bore, kubický nitrid bóru
DLC		diamand – like carbon, uhlíkový povlak
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
GPS		Geometrické požadavky výrobků
IT		tolerance přesnosti
l	[-]	počet výstupků a prohlubní
ln	[μm]	vyhodnocovaná délka
lr	[μm]	vákladní délka
Nd: YAG		neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser
PA		polyamid
POM		polyoxymetylén
PTFE		polytetrafluoretylen, teflon
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu povrchu
R _e	[MPa]	mez kluzu v tahu
Rku	[-]	špičatost profilu povrchu
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
R _{p02}	[MPa]	smluvní mez kluzu v tahu
Rq	[μm]	průměrná kvadratická úchylka profilu povrchu
Rsk	[-]	šikmost profilu povrchu
Rt	[μm]	celková výška profilu
Rz	[μm]	největší výška profilu
S _{10Z}	[μm]	deset bodů výšky povrchu
Sa	[μm]	aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
Sdq	[μm.μm ⁻¹]	základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu
Sdr	[%]	poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu
Sds	[μm ⁻²]	hustota piků
Sku	[-]	špičatost omezené stupnice povrchu
Smr	[%]	poměr plochy materiálu omezené stupnicí povrchu
Sp	[μm]	maximální výška piků

Spc	$[\mu\text{m}^{-1}]$	aritmetický průměr zakřivení piku (Wolfovo pročištění)
Spd	$[\mu\text{m}^{-2}]$	hustota piků (Wolfovo pročištění)
Spk	$[\mu\text{m}]$	redukováná výška piků
Sq	$[\mu\text{m}]$	základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
Ssc	$[\mu\text{m}^{-1}]$	aritmetický průměr zakřivení piku
Ssk	$[-]$	šikmost omezené stupnice povrchu
Sv	$[\mu\text{m}]$	maximální hloubka prohlubně povrchu
Svk	$[\mu\text{m}]$	redukováná hloubka údolí
Sz	$[\mu\text{m}]$	maximální výška omezené stupnice povrchu
v	$[\text{m.s}^{-1}]$	kluzná rychlost
Xs	$[\mu\text{m}]$	šířka prvku profilu
Z	$[\mu\text{m}]$	vzdálenosti výstupků a prohlubní
Zp	$[\mu\text{m}]$	výška výstupku profilu
Zt	$[\mu\text{m}]$	výška prvku profilu
Zv	$[\mu\text{m}]$	hloubka prohlubně profilu
α	$[\text{K}^{-1}]$	součinitel teplotní roztažnosti
λ	$[\text{W} \cdot (\text{m.K})^{-1}]$	měrná tepelná vodivost
λ_f		dlouhovlnný filtr
λ_s		krátkovlnný filtr
μ	$[-]$	koeficient tření
ς	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustota
ω	$[\text{rad.s}^{-1}]$	úhlová rychlost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dřevěné kluzné ložisko z katapultu trebuchet	13
Obr. 2 Bronzové kluzné ložisko s kapsami vyplněnými grafitem	13
Obr. 3 Izotropní povrch (nalevo) a anizotropní povrch (napravo)	14
Obr. 4 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti	15
Obr. 5 Profil povrchu v rovině XZ	15
Obr. 6 Vztah mezi profilem základním, vlnitosti a drsnosti	16
Obr. 7 Příklad vyhodnocované délky	16
Obr. 8 Prvek profilu	17
Obr. 9 Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a	18
Obr. 10 Různé tvary povrchů se stejným R_a	18
Obr. 11 Schématické vyjádření největší výšky profilu R_z	19
Obr. 12 Schématické vyjádření celkové výšky profilu R_t	19
Obr. 13 Šikmost profilu	20
Obr. 14 Špičatost profilu	20
Obr. 15 Struktura povrchu tří různých technologií	21
Obr. 16 Zobrazení posunutí střední roviny ve 2D	23
Obr. 17 Grafické znázornění parametru S_p	23
Obr. 18 Grafické znázornění parametru S_v	23
Obr. 19 Grafické znázornění parametru S_a	24
Obr. 20 Grafické znázornění parametru S_q	24
Obr. 21 Grafické znázornění parametru S_z	24
Obr. 22 Wolfovo pročištění	25
Obr. 23 Profiloměr Surtronic S při měření drsnosti povrchu součásti	26
Obr. 24 Tribologický proces	27
Obr. 25 Schématické znázornění povrchových a podpovrchových vrstev	27
Obr. 26 Kluzné tření	28
Obr. 27 Suché tření	28
Obr. 28 Kapalinné tření	29
Obr. 29 Mezní tření	29
Obr. 30 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení	30
Obr. 31 Adhezivní opotřebení ložiska	30
Obr. 32 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení	30
Obr. 33 Abrazivní opotřebení ložiska	30
Obr. 34 Schéma mechanismu erozivního opotřebení	31
Obr. 35 Korozivní opotřebení kluzného ložiska	31
Obr. 36 Schéma mechanismu únavového opotřebení	31

Obr. 37 Příklad poškození kluzného ložiska únavou materiálu	32
Obr. 38 Stribeckova křivka a oblasti mazání	34
Obr. 39 Hydrodynamické mazání	34
Obr. 40 Radiální kluzné ložisko s hydrostatickým mazáním	35
Obr. 41 Axiální kluzné ložisko s hydrostatickým mazáním	35
Obr. 42 Drážky na kulovém ložisku	36
Obr. 43 Půlkulové důlky na povrchu ložiska	36
Obr. 44 Struktura povrchu litiny a struktura povrchu otvoru po laserovém ošetření	37
Obr. 45 Další vzory textury povrchu	37
Obr. 46 Kluzná ložiska	38
Obr. 47 Kluzná pouzdra	39
Obr. 48 Ložiskové pánve	39
Obr. 49 Ložiskové domky	40
Obr. 50 Čtyřvrstvá pánev	40
Obr. 51 Víceplochá ložiska	41
Obr. 52 Víceplochá radiální ložiska a jejich rozložení hydrodynamického tlaku	42
Obr. 53 Radiální aerodynamické víceploché ložiska	42
Obr. 54 Radiální ložiska se spirálními drážkami	43
Obr. 55 Axiální ložiska se spirálními drážkami	43
Obr. 56 Schéma radiálního fóliového ložiska	44
Obr. 57 Radiální magnetické ložisko	44
Obr. 58 Axiální segmentové ložisko	45
Obr. 59 Sférické ložisko	45
Obr. 60 Naklápění hřídele ve sférickém ložisku	45
Obr. 61 Kloubové hlavice	45
Obr. 62 Ložiska z kompozitu PTFE	57
Obr. 63 Ložiska z kompozice POM	57
Obr. 64 Nerezová kluzná ložiska	58
Obr. 65 Řez kluzným ložiskem z vinutých vláken	59
Obr. 66 Bronzové ložisko s grafitovými s grafitovými kapsami	59
Obr. 67 Kluzná pouzdra z keramiky	60
Obr. 68 Soustružení	63
Obr. 69 Vzhled soustružené plochy	63
Obr. 70 3D struktura povrchu po soustružení	64
Obr. 71 Vzhled frézované plochy	64
Obr. 72 Struktura frézovaných povrchů F1 - F3	65

Obr. 73 Interferometrický sken povrchu soustruženého konvenčně (vlevo) a ultrazvukem (napravo)	69
Obr. 74 Struktura povrchu ve 3D po broušení	70
Obr. 75 Porovnání soustruženého povrchu S1 (nahore) dokončeného broušením B1(dole) ...	71
Obr. 76 3D struktura povrchu po superfinišování.....	72
Obr. 77 Porovnání 2D profilu povrchu po soustružení a superfinišování.....	72
Obr. 78 Vzhled povrchu válce po honování.....	73
Obr. 79 Příklady interferometrických skenů honovaného povrchu bez textury (vlevo) a s mazacími kapsami (napravo)	74
Obr. 80 Lapování válců a pístů motoru pro zlepšení těsnosti i zvětšení kontaktní plochy.....	74
Obr. 81 Porovnání válečkem hlazeného a honovaného povrchu	76
Obr. 82 Vzhled brokovaných povrchů DK1 (vlevo) DK2 (napravo)	77
Obr. 83 Porovnání 2D profilu po soustružení a vyhlazování keramickou kuličkou	78
Obr. 84 Konverzní vrstvy.....	81

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Informativní hodnoty vybraných fyzikálních vlastností a tvrdosti pro olověné kompozice	47
Tab. 2	Informativní hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických vlastností pro cínové kompozice	47
Tab. 3	Informativní hodnoty vybraných fyzikálních a mechanických vlastností pro cínové bronzы.....	48
Tab. 4	Informativní hodnoty mechanických vlastností materiálů z cínového bronzu	48
Tab. 5	Informativní hodnoty mechanických vlastností materiálu 42 3016 a 42 3018 po různé tepelné úpravě.....	49
Tab. 6	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z cínoolověných bronzů	49
Tab. 7	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z olověných bronzů	50
Tab. 8	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiál 42 3146..	50
Tab. 9	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z mosazi.....	51
Tab. 10	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály ze slitin hliníku.....	52
Tab. 11	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro materiály z šedé litiny	53
Tab. 12	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro spékané materiály	53
Tab. 13	Tabulka používaných plniv spolu s jejich význačnými vlastnostmi.....	55
Tab. 14	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro plastové materiály	55
Tab. 15	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností uhlíku.....	56
Tab. 16	Informativní hodnoty vybraných vlastností pro kompozit PTFE	57
Tab. 17	Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z PTFE kompozitu	57
Tab. 18	Informativní hodnoty vybraných vlastností pro kompozit POM	58
Tab. 19	Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z POM kompozitu	58
Tab. 20	Informativní hodnoty vybraných vlastností pro kompozit z nerezové oceli.....	58
Tab. 21	Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z nerez kompozitu	58
Tab. 22	Informativní hodnoty vybraných vlastností pro ložiska z vinutých vláken	59
Tab. 23	Doporučené hodnoty pro uložení ložisek z vinutých vláken	59
Tab. 24	Charakteristika bronzových odstředivě litých kluzných pouzder s grafitovými hnízdy	60
Tab. 25	Informativní průměrné hodnoty vybraných vlastností pro ložiska z keramiky	61
Tab. 26	Informativní hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností pro vybrané materiály ze speciálních slitin	62
Tab. 27	Naměřené parametry povrchu po soustružení.....	63

