



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING

POVRCHOVÉ ÚPRAVY VALIVÝCH LOŽISEK

SURFACE TREATMENT OF ROLL BEARINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILAN KUBELKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JIŘÍ ŠVEJCAR, CSc.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Ložiska jsou jedním z nejvíce rozšířených konstrukčních prvků, umožňující vzájemný pohyb součástí a současně i přenos působícího zatížení.

K základním požadavkům kladeným na součásti valivých ložisek patří zejména zvýšení odolnosti proti kontaktní únavě, snížení koeficientu tření mezi valivými tělísky a ložiskovými kroužky, zvýšení tvrdosti a ošetrivostnosti funkčních ploch, odolnost proti opotřebení, antikorozi ochrana a v neposlední řadě také elektrické a optické vlastnosti. Protože výroba ložisek z materiálů, které disponují těmito vlastnostmi, by byla značně nákladná, využívají se pro zlepšování mechanických vlastností povrchové úpravy.

Hlavní náplní této bakalářské práce je popis a hodnocení technologií vhodných pro povrchové úpravy valivých ložisek, přičemž zvýšená pozornost je věnována těm typům PÚ, které ve spolupráci se SVÚM budou podrobněji zkoumány v experimentální části této práce (zejména polymerní nástřiky, fosfátové vrstvy a vrstvy typu DLC). Vyhodnocení opotřebení různých typů povlaků po tribologických zkouškách bylo provedeno pomocí rastrovací elektronové mikroskopie.

ABSTRACT

The bearings are one of the most widely used construction components enabling mutual movement of parts and at the same time transmission of interacting load.

The basic requirements placed on components of roll bearings are particularly increase of contact fatigue resistance, decrease of the friction coefficient between the rolling bodies and bearing rings, increase of hardness and abrasion resistance of functional surfaces, the wear resistance, corrosion protection and finally the electrical and optical properties too. As production of bearings from materials with these attributes would be quite expensive, surface modifications are used for improving the mechanical properties.

The main task of this bachelor thesis is description and evaluation of technologies suitable for surface treatment of roll bearings with increased attention to those types of surface treatment which, in cooperation with SVÚM will be studied in more detail in the experimental part of this work (especially polymer coatings, phosphate films and DLC – type coatings). The wear evaluation of different types of coatings was performed with the aid of scanning electron microscopy after the tribological testing.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Povrchové úpravy, valivá ložiska

KEYWORDS:

Surface treatment, roll bearings

KUBELKA, M. *Povrchové úpravy valivých ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 77 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Švejcár, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FSI VUT v Brně.

V Horní Čermné, 12. října 2010

Milan Kubelka

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali s tvorbou bakalářské práce, zejména však svému vedoucímu, prof. Ing. Jiřímu Švejcárovi, CSc., za odborné vedení bakalářské práce, trpělivost a množství cenných rad a připomínek.

Dále bych chtěl poděkovat celé rodině, svému vedoucímu Ing. Petru Liškovi za možnost dokončení studia při práci, všem přátelům a své ženě za podporu během studia.

OBSAH

1. ÚVOD.....	6
2. CÍLE PRÁCE.....	7
3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY	8
3.1 VALIVÁ A KLUZNÁ LOŽISKA	8
3.1.1 Základní rozdělení ložisek	8
3.1.2 Kluzná ložiska	8
3.1.2.1 Popis a rozdělení kluzných ložisek	8
3.1.2.2 Materiály na kluzná ložiska	9
3.1.3 Valivá ložiska	10
3.1.3.1 Popis a rozdělení valivých ložisek	10
3.1.3.2 Materiály na valivá ložiska	11
3.1.3.3 Druhy valivých ložisek a jejich vlastnosti	12
3.2 ZÁKLADNÍ TYPY ZATÍŽENÍ VALIVÝCH LOŽISEK	20
3.2.1 Rozdělení typů zatížení.....	20
3.2.2 Základní dynamická únosnost.....	20
3.2.3 Trvanlivost	20
3.2.3.1 Rovnice základní trvanlivosti.....	21
3.2.3.2 Rovnice upravené trvanlivosti.....	21
3.2.4 Ekvivalentní dynamické zatížení.....	22
3.2.4.1 Způsob zatížení konstantní.....	23
3.2.4.2 Způsob zatížení proměnný	23
3.2.5 Vliv teploty	24
3.2.6 Základní statická únosnost	24
3.2.6.1 Ekvivalentní statické zatížení.....	24
3.2.6.2 Bezpečnost ložisek při statickém zatížení.....	25
3.2.7 Mezní frekvence otáček.....	25
3.2.8 Mazání ložisek.....	26
3.3 STYKOVÁ ÚNAVA	27
3.3.1 Styková únava při posuvném pohybu.....	27
3.3.1.1 Popis celkových kontaktních zatížení Q a P	28
3.3.2 Styková únava při valivém pohybu.....	29
3.3.2.1 Podpovrchové stykové únavové porušení.....	30
3.3.2.2 Povrchové stykové únavové porušení.....	31
3.4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY VALIVÝCH LOŽISEK	32
3.4.1 Typy povrchových úprav	32
3.4.2 Příprava povrchu výrobků před povlakováním	35
3.4.3 Chemické metody vytváření povlaků ve vakuu	39
3.4.4 Fyzikální metody vytváření povlaků ve vakuu	45
3.4.4.1 Depozice povlaků odpařováním.....	49

3.4.4.2 Depozice povlaků naprašováním (sputter deposition)	50
3.4.5 Povlaky na bázi DLC (Diamond – Like Carbon)	55
3.4.6 Fosfátové povlaky	60
3.4.7 Povlaky z práškových plastů.....	62
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	66
4.1 METODICKÁ ČÁST EXPERIMENTU	66
4.1.1 Experimentální materiál	66
4.1.2 Použité přístroje.....	67
4.1.3 Experimentální metodiky.....	67
4.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	68
4.2.1 Tribologie povlaků.....	68
4.2.2 Vzorek XYLAN 1010.....	69
4.2.3 Vzorek Fe-Mn fosfátu.....	72
4.2.4 Vzorek povlaku DLC.....	76
5. ZÁVĚRY.....	79
6. PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	80
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	81

1. ÚVOD

Provoz strojních zařízení je omezen životností jeho jednotlivých součástí. Ložiska jsou významné konstrukční prvky, které umožňují vzájemný pohyb součástí a přenos působícího zatížení. U funkčních ploch valivých ložisek dochází vlivem tření mezi valivými tělisky a ložiskovými kroužky k opotřebování. Kontaktní plochy se zahřívají a snižují životnost a maximální možné zatížení ložisek, která jsou v řadě případů nejslabším článkem systému. Prodloužení jejich životnosti a zvýšení užitečných parametrů pomocí povrchových úprav (PÚ) je proto v současné době věnována zvýšená pozornost.

Na nejrůznější způsoby použití však lze komponenty valivých ložisek různými metodami optimálně připravit a podstatně tak prodloužit jejich životnost. Aplikací PÚ na funkční plochy ložisek dochází ke zvýšení životnosti těchto dílců, což má za následek snížení nákladů na jejich údržbu. Přihlédneme – li ke skutečnosti, že ložiska jsou důležitým funkčním prvkem téměř každého většího soustrojí, přináší aplikace povrchových vrstev a povlaků na součásti valivých a kluzných ložisek nesporné úspory. Proto jsou také investovány prostředky do výzkumu a vývoje PÚ, které dodávají ložiskům potřebné mechanické, tribologické, antikorozi a případně další užitečné vlastnosti.

Výzkum a vývoj nových typů povlaků je v současné době zaměřen převážně na zvýšení odolnosti proti kontaktní únavě, snížení koeficientu tření mezi valivými tělisky a ložiskovými kroužky, zvýšení tvrdosti a oteruvzdornosti funkčních ploch, zajištění antikorozi ochrany a tím i na celkové prodloužení životnosti ložisek. Výsledkem těchto výzkumů jsou pak například speciální povlaky z nejrůznějších polymerů, keramických materiálů nebo povlaky a vrstvy kovového charakteru. Investice do komponent s povrchovou úpravou se z dlouhodobého hlediska vyplatí, neboť zvýšení životnosti jednotlivých dílců snižuje provozní náklady.

Tato bakalářská práce je zaměřena především na popis a hodnocení vybraných typů povrchových úprav (CVD, PVD, DLC, fosfátové vrstvy, polymerní povlaky), vhodných k aplikaci na funkční plochy valivých ložisek (kluzná ložiska jsou v této práci rovněž zmíněna, ale pouze okrajově). Zvýšená pozornost je přitom věnována těm typům PÚ, které byly aplikovány na vzorky ložiskových ocelí ve spolupráci se SVÚM a které budou dále podrobněji zkoumány v experimentální části této práce.

Dalším způsobem aplikace kovových vrstev je chemicko – tepelné zpracování (CHTZ). Této technologii se využívá ke zvyšování tvrdosti povrchu kontaktních ploch namáhaných součástí – hřídelí, ozubených kol, atp. Zvýšení tvrdosti a oteruvzdornosti funkčních ploch je ale i cílem povrchových úprav aplikovaných na ložiskové oceli. Proto by některé způsoby CHTZ mohly rovněž vést ke zlepšení užitečných vlastností ložiskových materiálů. Základním pochodem CHTZ je difúzní sycení povrchových vrstev oceli chemickými prvky. Nejčastěji se využívá uhlík (cementace) a dusík (nitridace), případně jejich kombinace. Zpracování probíhá při zvýšených teplotách v tuhém, kapalném nebo plynném chemicky aktivním prostředí. CHTZ je ale v této práci zmíněno jen okrajově a pro úplnost, hlavní pozornost je věnována výše uvedeným PÚ.

Radiální a axiální valivá ložiska jsou vystavena různým typům namáhání. Jedná se především o základní statickou a dynamickou únosnost, ekvivalentní statické a dynamické zatížení, určení základní trvanlivosti ložisek a také teorie stykové únavy, zahrnující popis stykové únavy při posuvném a valivém pohybu, podpovrchové a povrchové stykové únavové porušení a popis celkového kontaktního zatížení.

Předložená práce se zabývá možnostmi zvýšení užitečných vlastností valivých ložisek pomocí opatření oběžných drah ložisek vybranými typy povrchových úprav.

2. CÍLE PRÁCE

Bakalářská práce se zabývá popisem a hodnocením vybraných typů povrchových úprav (PÚ) aplikovaných na ložiskové oceli.

Z předloženého rozboru problematiky je zřejmé, že zvýšení tvrdosti a otěruvzdornosti funkčních ploch valivých ložisek, zvýšení odolnosti proti kontaktní únavě, snížení koeficientu tření mezi valivými tělísky a ložiskovými kroužky a zajištění korozní odolnosti jsou hlavní cíle povrchových úprav aplikovaných na ložiskové oceli. Aplikací povrchových vrstev a povlaků na součásti valivých ložisek lze dosáhnout požadovaných parametrů, které vedou k prodloužení životnosti těchto dílců.

Dalším cílem práce bude posoudit vhodnost případně nevhodnost vybraných povrchových úprav aplikovaných na oběžné dráhy valivých ložisek.

Součástí předložené práce je rovněž popis radiálních a axiálních valivých ložisek se zaměřením na jejich rozdělení, vlastnosti a oblast použití. Valivá ložiska jsou během provozu, ale i v klidovém stavu vystavena různým typům namáhání, jejichž specifikaci je věnována další část této práce.

V experimentální části projektu budou zkoumány vzorky ložiskových ocelí, na které byly ve spolupráci se SVÚM nejprve připraveny a následně pak aplikovány různé typy PÚ. Předmětem hodnocení budou výsledky tribologických zkoušek různých typů vrstev a povlaků k čemuž bude využito metod rastrovací elektronové mikroskopie. Důležitým parametrem je především stav povrchu vzorků po zkouškách provedených na zadíracím tribometru.

Výsledky projektu budou přínosem pro posouzení možných aplikací vybraných typů povrchových úprav na ložiskové oceli.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY

3.1 VALIVÁ A KLUZNÁ LOŽISKA

3.1.1 Základní rozdělení ložisek

Ložiska jsou důležité konstrukční prvky, umožňující vzájemný pohyb součástí a současně i přenos působícího zatížení. Při chodu zařízení vzniká mezi styčnými plochami součástí tření, které podle druhu relativního pohybu rozlišujeme na tření kluzné a valivé. Základní rozdělení ložisek je tedy na kluzná a valivá [1].

3.1.2 Kluzná ložiska

3.1.2.1 Popis a rozdělení kluzných ložisek

Kluzná ložiska obepínají čep hřídele přímo, nebo prostřednictvím pouzdra či pánve, která udržuje hřídel v určité poloze, nebrání mu však v otáčení. Protože kluzné plochy čepů a hřídelů bývají cementované, nitridované, popř. povrchově kalené a jsou tedy relativně drahé, je výhodnější převést opotřebení na ložiskovou pánev, která je levnější. Rovněž demontáž a výměna pánve je levnější a snazší než výměna hřídele [2].

Základní částí kluzného ložiska je ložiskové pouzdro. Ložiskové pouzdro je vložka kluzného ložiska tvaru dutého válce, ve kterém se pohybuje čep. Ložiskové pouzdro s výstelkou se skládá z opěrného pouzdra, zpravidla ocelového a vrstvy kluzného materiálu, zvané výstelka [2].

Přestože užívání valivých ložisek doznalo velkého rozšíření, není možné jimi nahradit ložiska kluzná, která jsou v řadě aplikací nepostradatelná anebo se výrazně podílí na zjednodušení konstrukce. Kluzná ložiska zůstávají pro svoji jednoduchost, snadnější montáž, demontáž či opravy, nižší provozní hlučnost, schopnost přenášet nárazové zatížení a v neposlední řadě také vysoký tlumicí účinek velmi důležitou součástí u mnoha strojů. Využívají se také tam, kde hřídele dosahují vysokých rychlostí, které by valivá ložiska pro velké odstředivé síly nezvládla. Hlavní podmínkou jejich spolehlivého chodu je správné mazání [1, 2, 3].



Obr. 3.1: Různé druhy kluzných ložisek [3]

Podle tvaru kluzné plochy dělíme kluzná ložiska na:

- válcová
- kuželová
- kulová

Podle směru zátěžné síly na:

- radiální (zatížení kolmé k ose hřídele)
- axiální (ve směru osy hřídele)
- kombinovaná (radiálně – axiální)

3.1.2.2 Materiály na kluzná ložiska

Požadavky na materiály kluzných ložisek jsou tak různorodé, že žádný ze známých materiálů jim nemůže v plném rozsahu vyhovět. Jsou to např. odolnost proti zadírání, přizpůsobivost a jímavost tvrdých částic, zatížitelnost, únavová pevnost, korozivzdornost, otěruvzdornost apod. [2].

Základní materiály používané pro výrobu kluzných ložisek jsou ocel, slitiny mědi, cínu, olova a hliníku; pro samomazná kluzná ložiska pak např. PTFE a termoplasty [3].

Kluzná ložiska se většinou vyrábí jako tenkostěnné bimetalické pánve. Ložiskové pouzdro se ve většině případů vyrábí z oceli, pro vyšší namáhání se používá ocel legovaná titanem. Na pouzdro se následně nanáší výstelka z ložiskového kovu nebo slitiny. Tato tenká vrstva usnadňuje záběh, snižuje třecí odpor, zvyšuje trvanlivost a chrání proti korozi. Kov je buď kontinuálně naléván, nebo je nanesen práškový kov a spékán, případně je tenký plát ložiskového kovu naválcován. Pro dosažení dobrého spojení ložiskové slitiny s ocelovou pávní se v některých případech nanáší na povrch oceli vhodná mezivrstva, např. Al. V některých případech se ještě přidává třetí vrstva měkkého kovu, silná 20 až 50 μm , která usnadňuje záběh ložiska, snižuje tření a zvyšuje odolnost proti korozi [1, 3].

Nejvyužívanějšími výstelkami kluzných ložisek jsou slitiny cínu a olova. Pro vysoké kluzné rychlosti za teplot do 100°C se využívá velmi dobrých kluzných vlastností a korozivzdornosti cínových a dříve i olověných kompozic. Používání olova je ale v současné době výrazně omezeno a pro potřebu ložiskových výsterek je povolen maximální obsah olova 4% v olověných bronzích. Nevýhoda cínových kompozic spočívá v jejich ceně. Tyto kompozice obsahují 85% cínu, který je považován za deficitní kov. Pro dynamicky namáhaná ložiska pracující při menších kluzných rychlostech nebo za vyšších teplot se používají odolnější cínové bronzky [3].

Již půlstoletí se využívají samomazná ložiska na bázi PTFE. Na ocelový podklad je nanesena vrstva PTFE, která je schopna pracovat i bez mazání. Tato ložisková pouzdra nacházejí uplatnění v mnoha aplikacích, nezbytné je však zabránit vnikání nečistot do ložiska [3].

S rozvojem technologií se do popředí dostala výroba samomazných ložiskových pouzder vstřikováním plněných termoplastů, např. polyamidy plněné grafitem. Tato technologie je ve srovnání s ložisky z kluzných materiálů vyráběnými stříháním s následným skružováním a s plastovými ložisky vyráběnými obráběním velmi ekonomická. Vstřikováním lze dnes vyrobit tenkostěnná pouzdra s tloušťkou stěny cca 1 mm. Jejich velkou výhodou je tedy i úspora materiálu a hmotnosti konstrukce [1, 3].

3.1.3 Valivá ložiska

3.1.3.1 Popis a rozdělení valivých ložisek

Valivá ložiska přenášejí otáčivý pohyb hřídele pomocí vnitřního kroužku, který se odvaluje po tělíscích, např. kuličkách, válečkích, kuželících apod. Základní konstrukce valivého ložiska je zobrazena na Obr. 3.2. Skládá se z vnějšího kroužku, vnitřního kroužku, který se nasazuje na hřídel, řady valivých tělísek, po nichž se odvaluje vnitřní kroužek a která přenášejí zátěžnou sílu a dále pak klece pro vedení valivých těles. Klece se rozdělují valivá tělesa v ložisku rovnoměrně, ve stejných vzdálenostech od sebe a tím se zabráňuje jejich vzájemnému styku a tření. Zabrání se také značnému vývinu tepla a velkému opotřebení. Valivé tření je nižší než kluzné, takže valivá ložiska způsobují menší ztráty výkonu [2, 3].

Kroužky a valivá tělesa se zhotovují z legovaných ocelí, jsou přesně obrobeny, kaleny a broušeny; povrch valivých těles a oběžné dráhy kroužků se leští. Klece jsou vyráběny z měkkého materiálu (ocelový nebo mosazný plech, lehké kovy nebo i plasty) [2].



Obr. 3.2: Konstrukce valivého ložiska [3, 4]

Podle směru síly, pro jejíž přenášení jsou převážně určena, dělíme valivá ložiska do dvou základních skupin na:

- radiální (síla působí kolmo k ose ložiska)
- axiální (síla působí ve směru osy ložiska)

Podle tvaru valivých tělísek rozeznáváme v každé skupině ložiska:

- kuličková
- válečková
- soudečková
- jehlová
- kuželíková

Podle počtu řad rozlišujeme valivá ložiska:

- jednořadá
- víceřadá

Další skupiny tvoří ložiska:

- kloubová
- speciální

Velká většina radiálních ložisek je schopna přenášet i síly v axiálním směru a některé druhy axiálních ložisek mohou zachytit i radiální zatížení. Z hlediska působících sil neexistuje přesná hranice mezi oběma uvedenými základními skupinami ložisek [1].

V rozměrových tabulkách se u radiálních ložisek uvádí základní únosnost pro radiální zatížení a obdobně u axiálních ložisek základní únosnost pro axiální zatížení. U radiálních ložisek se ve zkráceném označení slova radiální nepoužívá, zatímco u axiálních ložisek musí být slovo axiální při pojmenování vždy uvedeno [1].

3.1.3.2 Materiály na valivá ložiska

Materiál pro valivá ložiska musí za provozu snášet velmi vysoké smykové a tlakové napětí. Případné vměstky či karbidy mohou iniciovat nukleaci únavové trhliny. Proto jsou oceli na valivá ložiska velmi pečlivě kontrolovány na obsah, morfologii a rozložení vměstků a karbidů v matici [3].

Protože vměstky snižují podstatně trvanlivost ložisek, vyrábí se oceli na valivá ložiska mimopecní rafinací nebo elektrostruskovým přetavováním. Pro výrobu valivých ložisek pracujících v podmínkách běžného uložení se používají nízkolegované chromové nebo chrommanganové oceli, kalené a popuštěné za nízkých teplot [1].

Základní matici ložiska po tepelném zpracování tvoří nízkopopuštěný jemný martenzit a asi 10% zbytkového austenitu. V matici se má vyloučit asi 10% rovnoměrně rozložených karbidů typu $(\text{Fe,Cr,Mn})_3\text{C}$. Oceli s touto strukturou mají dobrou obrusitelnost, což umožňuje získat přesné tvary valivých těles a ložiskových kroužků [1].

Základní požadavky na vlastnosti ložiskových ocelí:

- tvrdost matrice 61 ÷ 65 HRC
- vysoká mez únavy ložiska při kontaktním namáhání po dobu několika tisíc hodin
- vysoká mez kluzu, dostatečná pevnost a houževnatost ložiskového materiálu
- rovnoměrné rozložení karbidické fáze a nízký obsah oxidických vměstků v matici
- absence vnitřních vad (poréznost, trhlinky,...)

Podle podmínek uložení se rozděluje ložiskové oceli do dvou základních skupin:

- oceli na ložiska pracující v podmínkách běžného uložení
- oceli na ložiska pracující v uložení s vyššími teplotami nebo v korozním prostředí

Většina ložiskových ocelí patří do první skupiny. Tyto typy ložiskových ocelí obsahují okolo 1% uhlíku. Pro zvýšení prokalitelnosti a tvrdosti po kalení se přidává 1,5% chromu. Z našich ocelí patří do této skupiny chromové oceli 14 109 a chrommanganové oceli 14 209. Užívají se pro výrobu valivých tělísek a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm. Na ložiskové kroužky s větší tloušťkou stěny se používají oceli s přísadou

molybdenu, který zvyšuje prokalitelnost. Typickými zástupci jsou například oceli 100CrMnMo6, CRK3R + Mo nebo DIN 20NiCrMo2 [1, 3, 5].

V případě použití ložisek v korozním prostředí se používá vysokolegovaná ocel s vysokým obsahem chromu (např. 17 042 nebo X45Cr13), který zaručuje odolnost proti korozi. Na ložiska pracující ve velmi namáhaných uloženích (např. uložení rotorů turbín), která pracují za teplot nad 250°C se používají nástrojové rychlořezné oceli. Vhodné jsou např. oceli 19 802 či X80MoCrV42-16 [1, 3].

Dalším materiálem používaným pro výrobu valivých ložisek je keramika na bázi ZrO_2 . Jedním z hlavních požadavků na valivá ložiska je houževnatost materiálu, která je u ZrO_2 splněna bezdifúzní změnou krystalové struktury. Pro konstrukci ložisek se používá nestabilní tetragonální ZrO_2 . Jakmile se ložiskem začne šířit trhlinka, dojde na čele trhliny k fázové transformaci z tetragonální struktury na monoklinickou, které je stabilní a je doprovázena změnou objemu o 6%. Tím dojde k uzavření šířící – se trhliny. Keramická ložiska se používají ve zvláště agresivních korozních prostředích a jsou také odolná vůči průchodu elektrickým proudem [3].

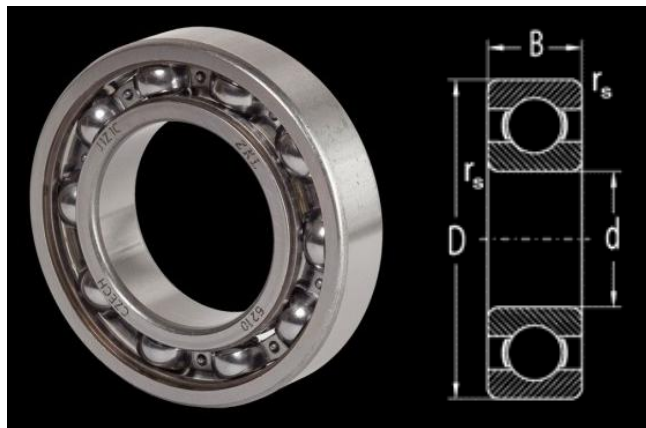
Kombinací oceli a keramických valivých tělísek vznikají hybridní ložiska. Pro výrobu se využívá oxidická keramika nebo keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 . Nitrid křemíku se kromě odolnosti proti průchodu elektrického proudu vyznačuje vysokou tvrdostí, houževnatostí a pevností v tlaku. Hmotnost těchto tělísek je o 40% nižší než v případě oceli, což zaručuje nižší odstředivé síly působící na valivá tělíska a tedy jejich vyšší provozní rychlost [3].

3.1.3.3 Druhy valivých ložisek a jejich vlastnosti

Jednořadá kuličková ložiska (ČSN 02 4630 až 02 4640)

Jednořadá kuličková ložiska jsou nejvíce užívanými valivými ložisky ve všech průmyslových oborech. Jsou levná, snášejí poměrně vysoké frekvence otáčení a mohou přenášet radiální i axiální síly v obou směrech díky relativně hlubokým drahám a vysokému stupni přimknutí mezi valivými tělesy a oběžnými drahami. Vyznačují se tichým chodem, nízkým třením a nejmenší stykovou plochou mezi valivými tělisky a oběžnými drahami ložisek [1, 2, 6].

Jednořadá kuličková ložiska jsou nerozebíratelná, vyrábějí se v několika řadách jako otevřená, jednostranně nebo oboustranně zakrytovaná a ve všech stupních přesnosti chodu. U zakrytovaných ložisek jsou otáčky limitovány typem použitého krytu. Pro jednořadá kuličková ložiska je přípustná jen malá naklopitelnost ložiskových kroužků [1, 2, 6].

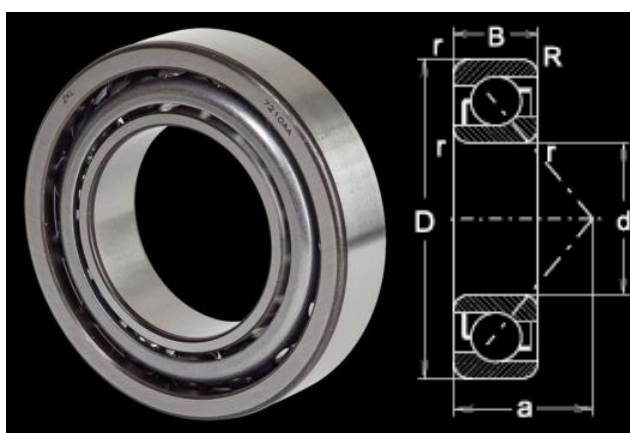


Obr. 3.3: Jednořadá kuličkové ložisko (3D pohled + příčný řez) [6]

Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem (ČSN 02 4645)

Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem jsou vhodná pro přesná uložení u vřeten obráběcích strojů, protože snášejí poměrně vysoké frekvence otáčení. Dobré přimknutí mezi oběžnými drahami a kuličkami zajišťuje jejich vysokou únosnost. Vyznačují se tichým chodem, nízkým třením a vysokou tuhostí [1, 2, 6].

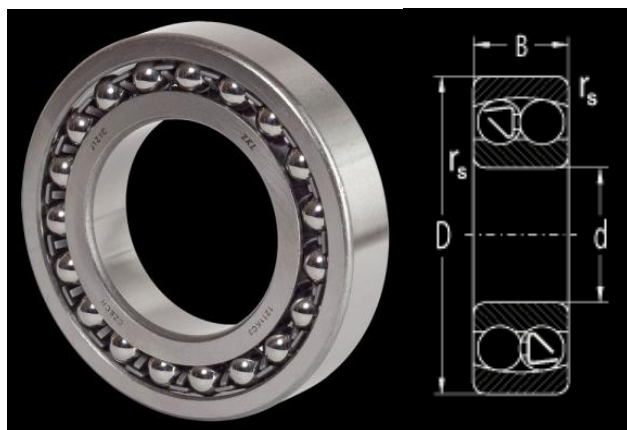
Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem mají oběžné dráhy ložiskových kroužků konstruované tak, že spojnice jejich stykových bodů s kuličkami svírá s kolmicí na osu ložiska ostrý úhel (tzv. stykový úhel). Axiální únosnost daného ložiska vzrůstá s rostoucím stykovým úhlem. Ložiska jsou schopna přenášet radiální a axiální síly současně, axiální síly ale pouze v jednom směru. Vhodným uspořádáním ložisek (dvojice ložisek sdružené zády nebo čely k sobě) lze dosáhnout obousměrné axiální zatížitelnosti. Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem jsou nerozebíratelná, vyrábějí se v několika řadách a ve všech stupních přesnosti chodu [1, 2, 6].



Obr. 3.4: Jednořadá kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem (3D pohled + příčný řez) [6]

Dvouřadá naklápěcí kuličková ložiska (ČSN 02 4650)

Dvouřadá naklápěcí kuličková ložiska se vyznačují dvěma řadami kuliček se společnou kulovou oběžnou dráhou na vnějším kroužku. Tím je umožněno určité naklopení vnitřního kroužku ložiska vůči vnějšímu kroužku okolo středu ložiska bez narušení správné funkce [1, 2, 6].



Obr. 3.5: Dvouřadá naklápěcí kuličkové ložisko (3D pohled + příčný řez) [6]

Dvouřadá naklápěcí kuličková ložiska se používají v případech vyšších zatížení a velké vzájemné vzdálenosti ložisek ke kompenzaci průhybu a kmitání hřídele. Jsou vhodná i tam, kde lze předpokládat větší nesouososti děr v ložiskových tělesech. Vyznačují se nízkým třením, snášejí poměrně vysoké frekvence otáčení a mají značnou radiální únosnost. Axiální zatížení ale vlivem nepříznivého přimknutí kuliček k vnější oběžné dráze přenášejí jen omezeně [1, 2, 6].

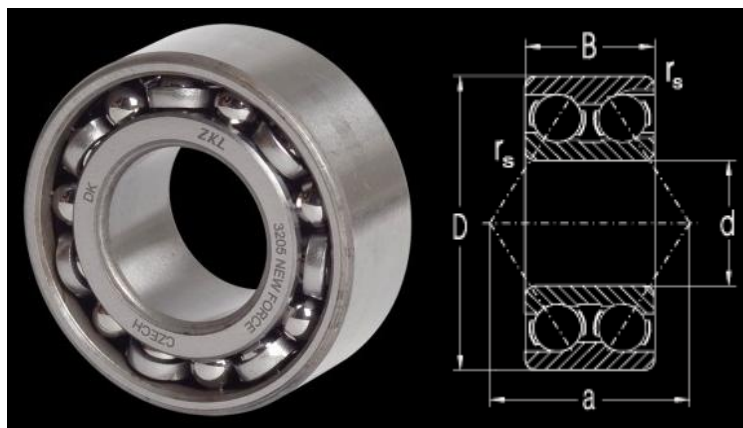
Dvouřadá naklápěcí kuličková ložiska jsou nerozebíratelná, vyrábějí se v několika řadách jako otevřená a v normálním stupni přesnosti [1, 2, 6].

Dvouřadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem (ČSN 02 4665)

Dvouřadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem se používají např. pro uložení kladek a vložených ozubených kol. Oběžné dráhy jsou provedeny tak, že spojnice stykových bodů oběžných drah s kuličkami protínají osu mimo ložiska. Mohou proto přenášet i poměrně velké klopné momenty [2, 6].

Vyznačují se tichým chodem, vysokou tuhostí a schopností přenášet relativně vysoké současně působící radiální a axiální zatížení. Výhodou je velká axiální únosnost v obou směrech a menší zástavbová šířka oproti dvojici jednořadých kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem [2, 6].

Dvouřadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem jsou nerozebíratelná, jsou vyráběna v několika řadách a v normální přesnosti, pro uložení náročnější na přesnost nebo uložení s vyšší frekvencí otáčení se používají ložiska s vyšší přesností chodu [6].



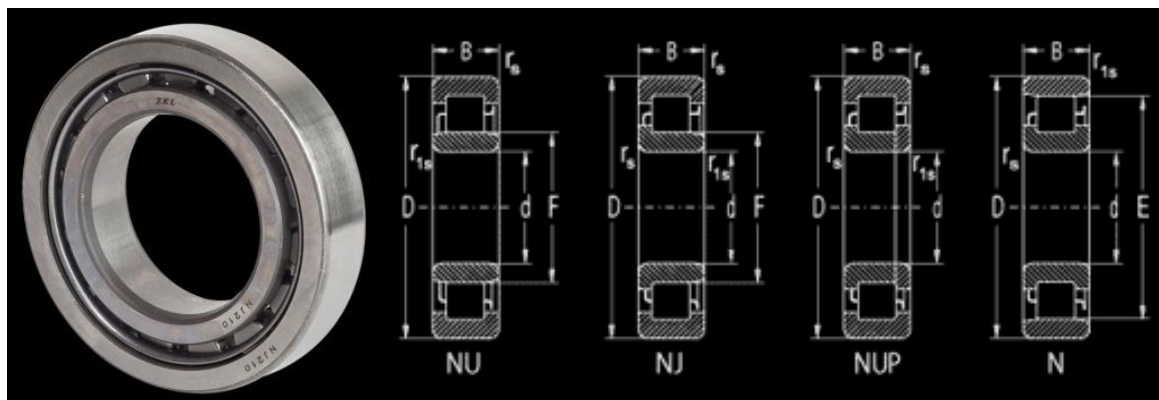
Obr. 3.6: Dvouřadá kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem (3D pohled + příčný řez) [6]

Jednořadá válečková ložiska (ČSN 02 4670)

Jednořadá válečková ložiska jsou vyráběna v několika základních provedeních, lišících se především konstrukcí přírub na kroužcích. Vyznačují se nízkým třením, schopností přenášet vysoké frekvence otáčení a vysokou tuhostí, takže se hodí i pro proměnlivé rázové zatížení. Jejich další předností je schopnost přenášet velká radiální zatížení (v radiálním směru mají válečková ložiska až o 60% větší únosnost než stejně velká ložiska kuličková) [2, 6].

Jednořadá válečková ložiska jsou rozebíratelná, jsou vyráběna v několika řadách a v základních provedeních NU, N, NJ a NUP. Je – li jeden z kroužků zcela bez přírub, nemůže ložisko přenášet žádnou axiální sílu, kroužky jsou vzájemně lehce posuvné, což umožňuje vyrovnávání délkových změn hřídelů, způsobených např. teplotní dilatací. Podle

konstrukce kroužků mohou některá provedení jednořadých válečkových ložisek přenášet i axiální síly v jednom či obou směrech [6].



Obr. 3.7: Jednořadá válečková ložiska (3D pohled + příčný řez) [6]

- **provedení NU** – vnější kroužek má dvě vodící příruby, vnitřní kroužek je bez vodících přírub. Axiální posuv hřídele vzhledem k tělesu je možný v obou směrech [6].
- **provedení N** – vnitřní kroužek má dvě vodící příruby, vnější kroužek je bez vodících přírub. Axiální posuv hřídele vzhledem k tělesu je možný v obou směrech [6].
- **provedení NJ** – vnější kroužek má dvě vodící příruby, vnitřní kroužek má jednu vodící přírubu. Ložisko může přenášet axiální síly v jednom směru [6].
- **provedení NUP** – vnější kroužek má dvě vodící příruby, vnitřní kroužek má jednu pevnou vodící přírubu a jednu volnou přírubu, kterou tvoří přírubový kroužek. Ložisko může přenášet axiální síly v obou směrech [6].

Jehlová ložiska (ČSN 02 4680 a ČSN 02 4683)

Jehlová ložiska jsou zvláštním druhem válečkových ložisek s dlouhými válečky malého průměru – tzv. jehlami. Jehlové válečky jsou v axiálním směru vedeny vodícími nákržky na vnějším kroužku, lze jich použít i bez vnitřního kroužku, přičemž oběžná dráha vytvořená přímo na povrchu čepu musí mít stejný průměr, stejnou tvrdost a jakost jako oběžná dráha vnitřního kroužku. Jejich předností je nízká stavební výška [1, 2].

Jehlová ložiska jsou vhodná pro přenášení velkých radiálních sil při menších obvodových rychlostech čepu. Neschopnost přenášet axiální zatížení je jejich jedinou, ale podstatnou nevýhodou [1, 2].

Využívají se zejména v aplikacích vystavených nárazovému zatížení – např. pro uložení výkyvných pák, kladek a pístních čepů [1, 2].

Dvouřadá soudečková ložiska (ČSN 02 4705)

Dvouřadá soudečková ložiska mají dvě řady soudečků se společnou kulovou dráhou na vnějším kroužku. Tím je umožněno určité naklopení vnitřního kroužku ložiska vůči vnějšímu kroužku okolo středu ložiska bez narušení správné funkce. Při zatížení se soudečky svou funkční plochou opírají o pevný nebo plovoucí vodící nákržek, kterým jsou vedeny [1, 6].

Dvouřadá soudečková ložiska se používají v případě velkých zatížení a všude tam, kde lze s výhodou využít jejich naklopitelnost ke kompenzaci nesouososti a průhybu hřídele. Vyznačují se vysokou tuhostí a schopností přenášet současně působící radiální a axiální zatížení v obou směrech. Z tohoto důvodu jsou určena do těžkých provozních podmínek, používají se zejména pro vibrační stroje, vytřásací síta a rošty, vibrační běhouny a trakční stroje [1, 6].

Dvouřadá soudečková ložiska jsou nerozebíratelná, jsou vyráběna v několika řadách s válcovou nebo kuželovou dírou s kuželovitostí 1:12 nebo 1:30. Ložiska s kuželovou dírou jsou montována buď přímo na kuželový čep hřídele, nebo pomocí upínacího pouzdra na válcový čep. Ložiska jsou ve standardním provedení vyráběna vždy s mazací drážkou a třemi otvory ve vnějším kroužku [6].



Obr. 3.8: Dvouřadá soudečková ložisko (3D pohled + příčný řez) [6]

Jednořadá kuželíková ložiska (ČSN 02 4720)

Jednořadá kuželíková ložiska mají jednu řadu kuželíků, které funkčním čelem dosedají na vodící přírubu vnitřního kroužku. Použití je rozsáhlé, např. u kol automobilů, traktorů a v převodovkách [1, 2].

Vyznačují se vysokou tuhostí, nízkým třením a schopností přenášet velká radiální a jednosměrná axiální zatížení. Axiální zatížitelnost těchto ložisek je závislá na velikosti stykového úhlu. Vhodným uspořádáním ložisek (dvojice ložisek sdružené zády nebo čely k sobě) lze dosáhnout obousměrné axiální zatížitelnosti [1, 6].

Jednořadá kuželíková ložiska jsou rozebíratelná, vnitřní kroužek s klecí a valivými tělesy a vnější kroužek se montují zvlášť. Vyrábějí se v několika řadách, v metrických i palcových rozměrech a v normální a vyšší přesnosti chodu [6].



Obr. 3.9: Jednořadá kuželíkové ložisko (3D pohled + příčný řez) [6]

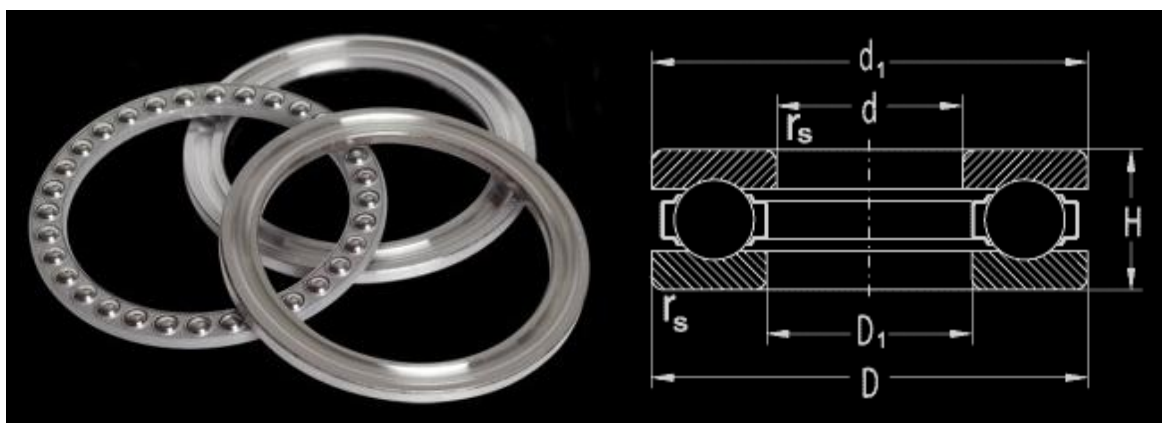
Axiální kuličková ložiska

Axiální kuličková ložiska jsou rozebíratelná, hřídelový kroužek, tělesový kroužek a klec s kuličkami se montují zvlášť. Jsou vyráběna v několika řadách a v normální přesnosti, pro uložení náročnější na přesnost se používají ložiska s vyšší přesností chodu. Jsou dodávána jako jednosměrná nebo obousměrná [6].

Jednosměrná axiální kuličková ložiska (ČSN 02 4730)

Jednosměrná axiální kuličková ložiska se skládají z hřídelového kroužku s oběžnou dráhou, klece s kuličkami a tělesového kroužku s oběžnou dráhou. Kroužky mají rovné dosedací plochy a proto musí být podepřeny tak, aby byly všechny kuličky rovnoměrně zatíženy [1, 6].

Jednosměrná axiální kuličková ložiska mohou přenášet axiální zatížení pouze v jednom směru. Nejsou vhodná pro uložení s vysokými otáčkami a nemohou přenášet radiální zatížení [1, 2, 6].



Obr. 3.10: Jednosměrné axiální kuličkové ložisko (3D pohled + příčný řez) [6]

Obousměrná axiální kuličková ložiska (ČSN 02 4730)

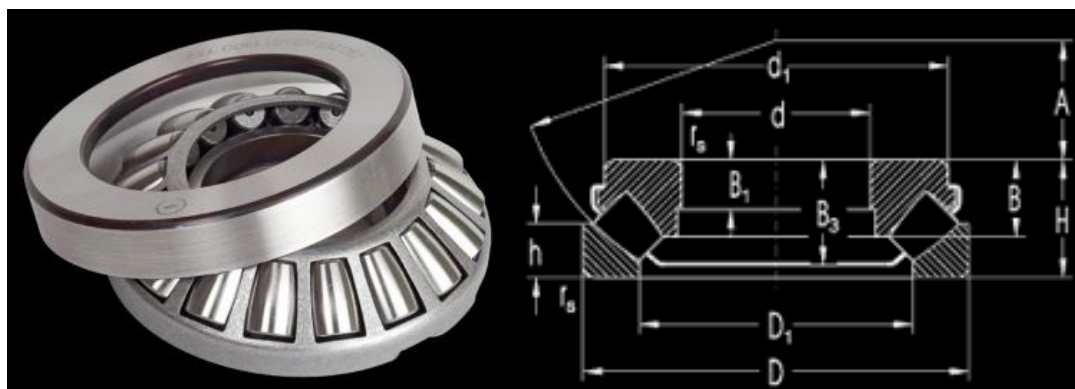
Obousměrná axiální kuličková ložiska mají dvě klece s kuličkami. Tyto klece jsou umístěny mezi hřídelovým kroužkem a dvěma tělesovými kroužky s rovnou dosedací plochou. Střední hřídelový kroužek má oběžné dráhy pro valivá tělesa na obou stranách a upevňuje se na čep. Tělesové kroužky mají oběžnou dráhu jen na jedné straně [1, 6].

Obousměrná axiální kuličková ložiska mohou při nižších otáčkách přenášet axiální zatížení v obou směrech. Na ložiska rovněž nesmí působit radiální zatížení [1, 2, 6].

Jednosměrná axiální soudečková ložiska (ČSN 02 4760)

Jednosměrná axiální soudečková ložiska jsou značně únosná. Zatížení je přenášeno z jedné oběžné dráhy na druhou pod určitým stykovým úhlem, což umožňuje přenášet kromě axiálního zatížení i určité radiální síly. Konstrukce těchto ložisek zároveň umožňuje určité naklopení hřídelového kroužku vůči tělesovému kroužku bez narušení správné funkce ložiska. Vyznačují se vysokou tuhostí a schopností kompenzovat nesouosost a průhyb hřídele [1, 6].

Jednosměrná axiální soudečková ložiska jsou rozebíratelná, hřídelový kroužek s klecí a soudečky a tělesový kroužek se mohou montovat jednotlivě. Jsou vyráběna v několika řadách a v normální a vyšší přesnosti chodu [6].



Obr. 3.11: Jednosměrné axiální soudečkové ložisko (3D pohled + příčný řez) [6]

Speciální ložiska

Speciální ložiska zahrnují široký sortiment všech typů ložisek dle zvláštních požadavků zákazníků na rozměry, schopnost přenášení provozního zatížení, přesnost, naklopitelnost a snadnost montáže [6].

Zpravidla jsou vyráběna z hlediska zástavbových rozměrů mimo rozměrový plán ISO. Zahrnují rozsáhlý sortiment ložisek určených pro energetiku, těžební a zpracovatelský průmysl, textilní a automobilový průmysl, oblast kolejových vozidel a ostatní průmyslová odvětví, kde nelze z různých důvodů použít standardní ložiska [6].

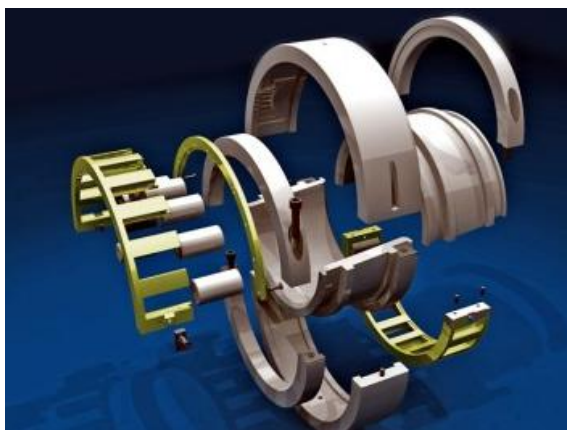


Obr. 3.12: Speciální ložisko (3D pohled) [6]

Příčně dělená ložiska

Příčně dělená ložiska jsou používána zejména v báňském průmyslu, v zemědělství a v mnoha dalších průmyslových odvětvích. Tato speciální ložiska jsou určena především pro obory těžkého průmyslu a jejich sortiment je neustále rozšiřován. S výhodou se používají hlavně v těch podmínkách, kdy axiální montáž ložiska do uložení je nemožná, což se týká např. vícenásobně uložené hřídele, klikové hřídele nebo v případech, kdy by byla montáž ložisek do uložení příliš zdlouhavá a delší odstávka zařízení by způsobovala velké výpadky v provozu [6].

Nejčastěji používanými příčně dělenými ložisky jsou jednořadá válečková a dvouřadá soudečková ložiska. Vnější kroužek, vnitřní kroužek i klec pro vedení valivých elementů jsou dělené. Masivní klece jsou vyráběny především z mosazi. Spojení obou polovin klece je provedeno tak, aby odolávalo dynamickým silám, kterým je klec za provozu vystavena. Obě poloviny vnitřního kroužku jsou na hřídeli upevněny pomocí opásacích kroužků vybavených šroubovým spojem s pojištěním proti uvolnění. Dělicí spára mezi polovinami vnějšího kroužku může být kolmá na čelo kroužku. Naproti tomu se dělicí rovina u vnitřního kroužku navrhuje skloněna pod úhlem, aby při odvalování valivých těles nedocházelo v zatíženém pásmu na hraně dělicí plochy k rázům [6].



Obr. 3.13: Příčně dělená ložiska [6]

3.2 ZÁKLADNÍ TYPY ZATÍŽENÍ VALIVÝCH LOŽISEK

3.2.1 Rozdělení typů zatížení

Potřebná velikost ložiska se stanoví na základě působících vnějších sil a podle požadavků na trvanlivost a spolehlivost ložiska v uložení. Velikost, směr, smysl, charakter zatížení ložiska či provozní frekvence otáček jsou rozhodující pro volbu druhu a velikosti ložiska. Přitom se musí také přihlížet na další zvláštní nebo důležité podmínky každého jednotlivého případu (provozní teplota, prostorové možnosti, způsob montáže, požadavky na mazání, ...), které mohou ovlivnit výběr nejvhodnějšího ložiska. Pro dané konkrétní podmínky mohou v mnohých případech vyhovovat různé typy ložisek [6].

Z hlediska působení vnějších sil a funkce ložiska rozlišujeme v ložiskové technice dva základní typy zatížení valivého ložiska: [6]

- pokud se ložiskové kroužky navzájem relativně vůči sobě otáčejí a ložisko je za tohoto stavu vystaveno působení vnějších sil, jde o **dynamické zatížení ložiska** [6].
- pokud se ložiskové kroužky buď navzájem nepohybují, nebo se pohybují velmi pomalu, ložisko přenáší kývavý pohyb nebo vnější síly působí kratší čas, než je čas jedné otáčky ložiska, jde o **statické zatížení ložiska** [6].

Pro výpočet bezpečnosti ložiska je rozhodující trvanlivost limitovaná poruchou zapříčiněnou únavou materiálu některé ze součástí ložiska a trvalé deformace funkčních ploch v místech styku valivých těles a oběžných drah [6].

3.2.2 Základní dynamická únosnost

Základní dynamická únosnost je stálé neproměnné zatížení, které může ložisko teoreticky přenášet při základní trvanlivosti jednoho milionu otáček [6].

- pro radiální ložiska se **základní dynamická únosnost** C_r vztahuje na stálé neproměnné, čistě radiální zatížení [6].
- pro axiální ložiska se **základní axiální dynamická únosnost** C_a vztahuje na neproměnné, čistě axiální zatížení, působící v ose ložiska [6].

Pro každé ložisko jsou v tabulkové části uvedeny základní dynamické únosnosti C_r a C_a , jejichž velikost závisí na rozměru ložiska, počtu valivých těles, materiálu a konstrukci ložiska. Hodnoty základních dynamických únosností byly stanoveny podle normy STN ISO 281. Tyto hodnoty jsou ověřeny na zkušebních zařízeních a potvrzeny provozními výsledky [6].

3.2.3 Trvanlivost

Trvanlivost ložiska je dána počtem otáček, které vykoná jeden kroužek vzhledem k druhému kroužku, dokud se neobjeví první příznaky únavy materiálu na jednom z kroužků nebo na valivém tělese [6].

Mezi ložisky stejného typu mohou být však značné rozdíly v trvanlivosti, a proto se pro výpočet trvanlivosti podle STN ISO 281 používá za základ základní trvanlivost, tj. trvanlivost, prezentovaná dobou provozu, kterou dosáhne nebo překročí skupina ložisek při spolehlivosti 90% [6].

3.2.3.1 Rovnice základní trvanlivosti

Základní trvanlivost ložiska je matematicky definována rovnicí trvanlivosti, která platí pro všechny typy ložisek [6].

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \text{ nebo } \frac{C}{P} = (L_{10})^{1/p} \quad [5, 6].$$

kde: L_{10} základní trvanlivost [10^6 otáček]

C základní dynamická únosnost [kN]

P ekvivalentní dynamické zatížení ložiska [kN]

p exponent – pro kuličková ložiska (bodový styk): $p = 3$

– pro válečková, jehlová, kuželíková a soudečková ložiska: $p = 10/3$

V případě, že se frekvence otáček nemění, může se pro výpočet trvanlivosti použít upravená rovnice, která vyjadřuje základní trvanlivost v provozních hodinách [6].

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad [5, 6].$$

kde: L_{10h} základní trvanlivost [h]

n frekvence otáček [min^{-1}]

U uložení náprav silničních a kolejových vozidel se základní trvanlivost může vyjádřit upraveným vztahem v počtu ujetých kilometrů [6].

$$L_{10km} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{\pi \cdot D}{1000} \quad [6].$$

kde: L_{10km} základní trvanlivost [10^6 km]

D průměr kola [m]

3.2.3.2 Rovnice upravené trvanlivosti

Upravená trvanlivost je korigovaná základní trvanlivost. Při výpočtu se kromě zatížení zohledňuje vliv materiálu ložiskových součástí, fyzikálně – mechanické a chemické vlastnosti maziva a teplotní režim pracovního prostředí ložiska [6].

$$L_{na} = a_1 \cdot a_{23} \cdot L_{10} \quad [6].$$

kde: L_{na} upravená trvanlivost pro spolehlivost $(100 - n)\%$ a jiné než běžné provozní podmínky [10^6 otáček]

a_1 koeficient spolehlivosti pro jinou než 90% spolehlivost

a_{23} koeficient materiálu, maziva, technologie výroby a provozních podmínek

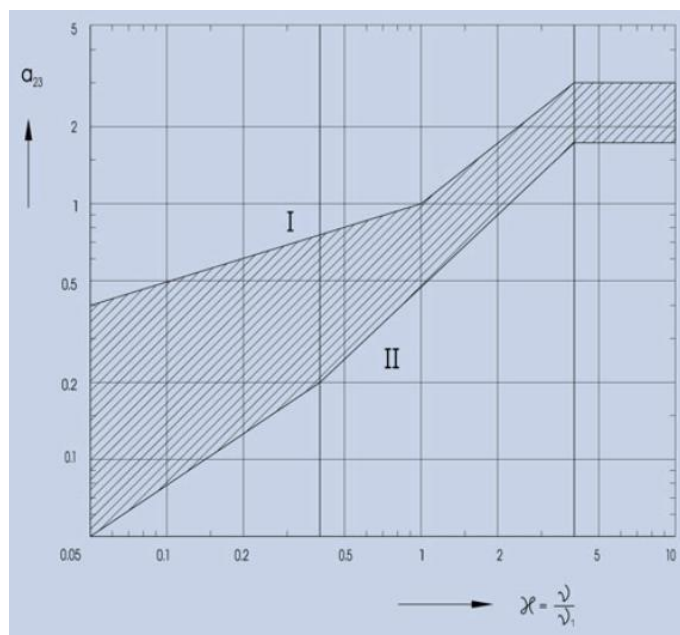
L_{10} základní trvanlivost [10^6 otáček]

Pro stanovení hodnot koeficientu a_{23} se vychází z níže uvedeného diagramu a ze vztahu:

$$\kappa = \frac{v}{v_1} \quad [6].$$

kde: v kinematická viskozita maziva při provozní teplotě ložiska [mm^2/s]

v_1 kinematická viskozita pro definovanou frekvenci otáček a zvolený rozměr ložiska [mm^2/s]



Obr. 3.14: Diagram pro stanovení koeficientu a_{23} [6]

Čára I platí pro radiální kuličková ložiska, která pracují ve velmi čistém prostředí. V ostatních případech se koeficient a_{23} volí nižší v závislosti na čistotě prostředí, přičemž klesající tendence je závislá na konstrukční skupině ložiska v tomto pořadí: [6]

- kuličková ložiska s kosoúhlým stykem
- kuželíková ložiska
- válečková ložiska
- dvouřadá naklápěcí kuličková ložiska
- soudečková ložiska

Čára II se může použít pro stanovení koeficientu a_{23} pro soudečková ložiska, která pracují v prašném prostředí [6].

3.2.4 Ekvivalentní dynamické zatížení

V provozu je ložisko vystaveno všeobecně působícím silám různé velikosti, při různé frekvenci otáček a s různou dobou působení. Z hlediska metodiky výpočtu je potřebné přepočítat působící síly na konstantní zatížení, při kterém bude mít ložisko stejnou trvanlivost, jakou dosáhne v podmínkách skutečného zatížení [6].

Toto přepočítané konstantní radiální nebo axiální zatížení nazýváme ekvivalentní zatížení P resp. P_r (radiální) nebo P_a (axiální) [6].

3.2.4.1 Způsob zatížení konstantní

Nastává v případě, že vnější síly působící na ložisko se nemění ani co do velikosti ani v závislosti na čase [6].

Radiální ložiska

Pokud současně působí na radiální ložisko **konstantní síly** v radiálním i axiálním směru, platí pro výpočet radiálního ekvivalentního dynamického zatížení rovnice:

$$P_r = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad [6].$$

kde: P_r radiální ekvivalentní dynamické zatížení [kN]

F_r radiální síla působící na ložisko [kN]

F_a axiální síla působící na ložisko [kN]

X koeficient radiálního zatížení

Y koeficient axiálního zatížení

Koeficienty X a Y jsou závislé na poměru axiální a radiální síly F_a/F_r . Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulkové části před každou konstrukční skupinou ložisek, kde jsou uvedeny bližší údaje pro výpočet ložisek příslušné konstrukční skupiny [6].

Axiální ložiska

Axiální kuličková ložiska mohou přenášet jen síly působící v axiálním směru a pro výpočet axiálního ekvivalentního dynamického zatížení platí rovnice:

$$P_a = F_a \quad [6].$$

kde: P_a axiální ekvivalentní dynamické zatížení [kN]

F_a axiální zatížení ložiska [kN]

Axiální soudečková ložiska mohou přenášet i určitá radiální zatížení, avšak jen při současném působení axiálního zatížení, přičemž musí být splněna podmínka:

$$P_a = F_a + 1,2 \cdot F_r \quad [6].$$

3.2.4.2 Způsob zatížení proměnný

Skutečné proměnné zatížení, jehož časový průběh je znám, se pro výpočet nahrazuje středním působícím zatížením. Toto působící zatížení má na ložisko stejný vliv jako skutečné proměnné zatížení [6].

Základní typy proměnného zatížení

- **změna velikosti zatížení při stálé frekvenci otáček** – je zatížení, jehož velikost se mění v závislosti na čase, přičemž frekvence otáček je konstantní.

- **změna velikosti zatížení při změně frekvence otáček** – je zatížení, jehož velikost se mění v závislosti na čase a mění se přitom i frekvence otáček.
- **ložisko vykonávající kývavý pohyb** – při kývavém pohybu s amplitudou kývání se nahrazuje kývavý pohyb myšlenou rotací [6].

Pro určení středního působícího zatížení F_s při uvedených typech proměnného zatížení existuje řada vztahů, detailní popis těchto výpočtů však není předmětem této bakalářské práce.

3.2.5 Vliv teploty

Valivá ložiska jsou určena pro použití v prostředí s teplotou do 120°C. Výjimku tvoří dvouřadá soudečková ložiska, která mohou pracovat při teplotách až do 200°C. Pro vyšší provozní teploty jsou valivá ložiska vyrobena tak, aby byly zabezpečeny jejich potřebné fyzikálně – mechanické vlastnosti a rozměrová stabilita [6].

V případě vyšších provozních teplot je třeba hodnoty základní dynamické únosnosti C_r nebo C_a přenásobit opravným koeficientem f_t pro danou teplotu. Hodnoty součinitele f_t pro konkrétní provozní teploty jsou uvedeny v Tab. 1.

Provozní teplota do [°C]	150	200	250	300
Součinitel f_t	0,95	0,9	0,75	0,6

Tab. 3.1: Hodnoty součinitele f_t [6].

3.2.6 Základní statická únosnost

Základní statická únosnost je zatížení, které odpovídá vypočítaným stykovým napětím v nejvíce zatíženém pásmu styku valivého tělesa a oběžné dráhy ložiska: [6].

- 4600 MPa – pro dvouřadá naklápěcí kuličková ložiska
- 4200 MPa – pro ostatní kuličková ložiska
- 4000 MPa – pro válečková, jehlová, kuželíková a soudečková ložiska

Radiální základní statická únosnost C_{or} a axiální základní statická únosnost C_{oa} je pro každé ložisko uvedena v tabulkách. Hodnoty základních statických únosností C_{or} a C_{oa} byly stanoveny výpočtem podle mezinárodní normy STN ISO 76 [6].

3.2.6.1 Ekvivalentní statické zatížení

Ekvivalentní statické zatížení je přepočítané radiální zatížení P_{or} pro radiální ložiska a axiální osově zatížení P_{oa} pro axiální ložiska. Koeficienty X_0 a Y_0 jsou uvedeny pro jednotlivá ložiska v tabulkách [6].

$$P_{or} = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a \quad [5, 6].$$

$$P_{oa} = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a \quad [5, 6].$$

kde: P_{0r} radiální ekvivalentní statické zatížení [kN]
 P_{0a} axiální ekvivalentní statické zatížení [kN]
 F_r radiální zatížení [kN]
 F_a axiální zatížení [kN]
 X_0 koeficient radiálního zatížení
 Y_0 koeficient axiálního zatížení

3.2.6.2 Bezpečnost ložisek při statickém zatížení

Bezpečnost ložisek při statickém zatížení se zjišťuje z poměru C_{0r} / P_{0r} nebo C_{0a} / P_{0a} a porovnává se s údaji v tabulkách pro dané typy ložisek, kde jsou uvedeny hodnoty nejmenších přípustných koeficientů s_0 pro různé provozní podmínky [6].

$$s_0 = \frac{C_{0r}}{P_{0r}} \quad \text{nebo} \quad s_0 = \frac{C_{0a}}{P_{0a}} \quad [5, 6].$$

kde: s_0 koeficient bezpečnosti při statickém zatížení
 C_{0r} radiální základní dynamická únosnost [kN]
 C_{0a} axiální základní dynamická únosnost [kN]
 P_{0r} radiální ekvivalentní statické zatížení resp. maximální nárazová síla $F_{r \max}$ [kN]
 P_{0a} axiální ekvivalentní statické zatížení resp. maximální nárazová síla $F_{a \max}$ [kN]

3.2.7 Mezní frekvence otáček

Mezní frekvence otáček závisí na typu ložiska, jeho přesnosti, provedení klece, vnitřní vůli, provozních poměrů v uložení, způsobu mazání a na řadě dalších okolností. Souhrn těchto vlivů určuje vývin tepla v ložisku a tím i omezenou frekvenci otáček, která je především omezena provozní teplotou maziva [6].

Vliv většího zatížení se projevuje zejména u ložisek větších rozměrů s trvanlivostí $L_{10h} < 100000$ h, kde je potřebné počítat se snížením hodnot mezní frekvence otáček. Obdobně je třeba redukovat hodnoty mezní frekvence otáček i u radiálních ložisek, která jsou trvale zatížena relativně velkou axiální silou. Výsledná hodnota frekvence otáček je závislá na poměru axiálního a radiálního zatížení F_a/F_r [6].

Uváděnou mezní frekvenci otáček lze překročit u kuličkových ložisek až 3x, u válečkových ložisek 2x, pro ostatní ložiska kromě soudečkových a kuželíkových ložisek až 1,5x a pro soudečková 1,3x [6].

Překročení mezní frekvence otáček zpravidla vyžaduje:

- úpravu mazání a chlazení
- zvýšenou přesnost ložiska
- větší radiální vůli
- klec vhodné konstrukce a materiálu [6].

3.2.8 Mazání ložisek

Správné mazání ložiska má přímý vliv na jeho trvanlivost. Mazivo vytváří mezi valivými tělísky a ložiskovými kroužky nosný mazací film, který brání jejich kovovému styku. Dále maže místa, kde dochází ke tření, má chladicí účinek a chrání ložisko před korozi [6].

Ve většině případů se ložiska mažou plastickým mazivem nebo olejem. Výjimečně se používají jiné mazací prostředky. Při rozhodování o druhu maziva a způsobu mazání je potřebné zohlednit zejména provozní podmínky a charakteristické vlastnosti použitého maziva [6].

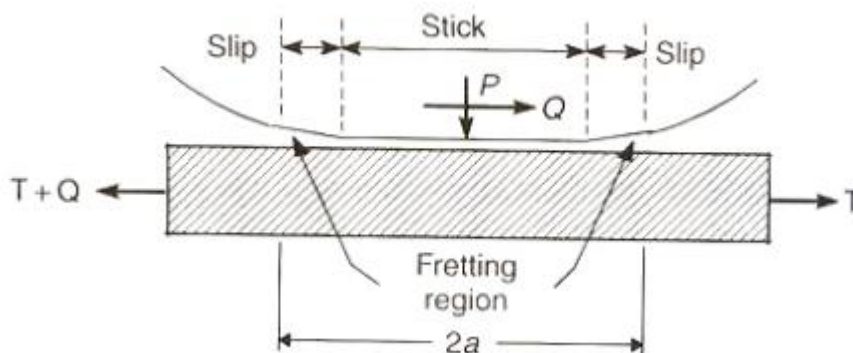
3.3 STYKOVÁ ÚNAVA

3.3.1 Styková únava při posuvném pohybu

Vzájemný pohyb dvou dotýkajících – se těles může být podle jejich geometrie buď posuvný nebo valivý. Při posuvném pohybu nazýváme stykovou únavou takový typ poškození, který se vyskytuje v oblastech kontaktu dvou těles s malým vzájemným tečným pohybem působícím současně s tlakovým zatížením. Často je přidruženo objemové zatížení, které způsobuje vznik trhlin šířících se z okrajů kontaktní plochy. Tyto podmínky mohou vést k předčasné iniciaci trhlin a následnému porušení. S nárůstem amplitudy vzájemného pohybu v kontaktní oblasti se podstata poškození mění a je označována jako otěr nebo opotřebení [1].

I za laboratorních podmínek je pro velké množství současně působících a vzájemně se ovlivňujících parametrů velmi obtížné popsat proces a vytvořit mechanický model stykové únavy [1].

Pokud použijeme značného zjednodušení, můžeme říci, že styková únava je většinou spojována s vysokocyklovou únavou (HCF), zatímco otěr a opotřebení se častěji vyskytují u nízkocyklové únavy (LCF). Základní předpoklad stykové únavy při vysokocyklovém namáhání je takový, že část stykové plochy je v úplném kontaktu, tzv. lpění (stick), zatímco na okrajích styku dochází k malému vzájemnému posunu v tečném směru, tzv. klouzání (slip). Velikost vzájemného posunu je řádově do desítek mikronů. Oblast klouzání může být velmi malá, pouze na okraji kontaktní plochy, nebo může zabírat značnou část celé plochy styku. Hranice mezi oblastí klouzání a lpění se může měnit a nikdy nedosáhne jednoznačné neměnné polohy a velikosti. Schéma kontaktu je znázorněno na Obr. 3.15, kde vzorek (dole) je pod vlivem objemového zatížení T , normálná a tečná síla je označena jako P a Q [1].

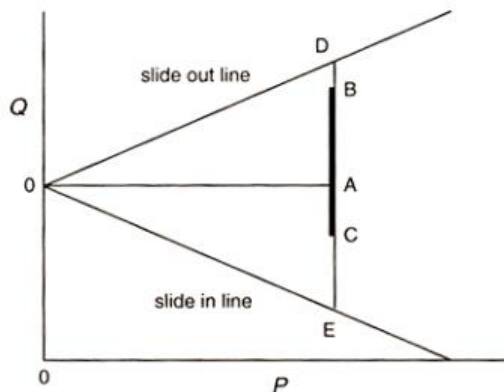


Obr. 3.15: Schéma kontaktu a rozložení sil [1]

K maximálnímu klouzání dochází v deformovaných okrajích kontaktu, tedy v místech, která jsou na Obr. 3.15 ve vzdálenosti $2a$. Za tímto místem již ke styku nedochází. Za působení velkých smykových sil může celá styková oblast přejít do klouzání. Stykové podmínky se mění se změnou amplitudy vzájemného posunu kontaktních těles [1].

3.3.1.1 Popis celkových kontaktních zatížení Q a P

K popisu hlavních podmínek stykové únavy, respektive k odlišení podmínek částečného a úplného klouzání, slouží zobrazení celkové smykové síly Q v závislosti na celkové normální síle P [1].



Obr. 3.16: Graf závislosti celkové smykové síly na normální síle [1].

Pro výpočet celkové smykové síly Q platí vztah:

$$Q = \pm \mu \cdot P \quad [1].$$

kde: Q celková smyková síla [N]

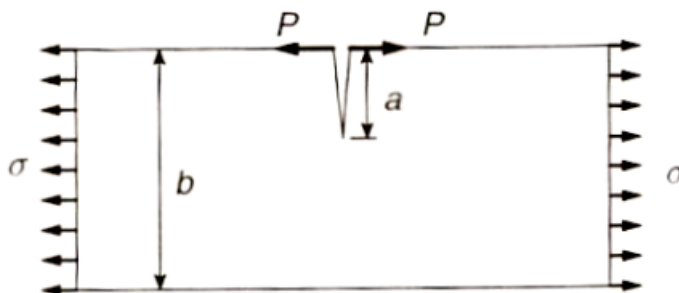
P celková normální síla [N]

μ průměrný koeficient tření

Tento graf podává informaci o změně výskytu oblasti klouzání a lpění v rámci stykové plochy. Polopřímky **OD** a **OE** ohraničují oblast částečného klouzání, k úplnému klouzání dochází vně oblasti **ODE** [1].

OD reprezentuje pohyb v kladném směru vzhledem k zvolenému souřadnému systému, zatímco **OE** představuje pohyb ve směru záporném [1].

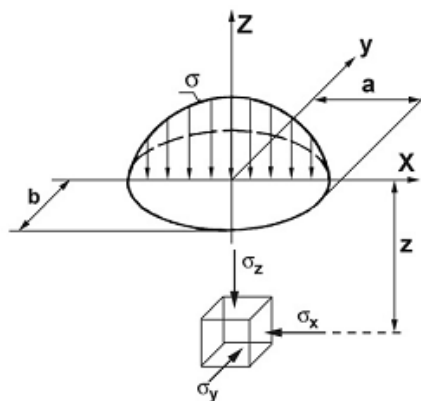
Pro iniciaci trhliny je určující lokální kontaktní napětí, zatímco pro její šíření má větší význam napětí objemové. Zjednodušeně lze uvažovat lokální stykové napětí jako bodové zatížení P na okraji trhliny a objemové napětí jako napěťové pole σ působící na okraji vzorku – viz Obr. 3.17 [1].



Obr. 3.17: Zjednodušené napěťové pole působící na okraji vzorku [1].

3.3.2 Styková únava při valivém pohybu

Valivý odpor nebo valivé tření vzniká tím, že se rotační těleso (např. koule nebo válec) a podložka při dotyku deformují, takže dotyk nenastává v bodě nebo přímce, ale v plošce. Hertz v roce 1881 ze známého tvaru těles v místě styku, velikosti přitlačné síly a vlastností materiálů těles vypočítal velikost stykové plochy, přiblížení těles vlivem pružných deformací a průběh napětí ve stykové ploše na povrchu. V obecném případě je tvar stykové plošky eliptický s poloosami stykové elipsy **a**, **b** – viz Obr. 3.18 [1].



Obr. 3.18: Tvar obecného stykového pole a výsledné napětí [1].

Maximální Hertzovo stykové napětí $\sigma_{\max}$ se nachází uprostřed stykové plošky. Pro bodový styk (např. pro styk kuličky a oběžné dráhy – případ valivých ložisek), je maximální stykové napětí definováno jako: [1].

$$\sigma_{\max} = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b} \quad [1].$$

Hertzova analýza je použitelná jenom pro stanovení stykových napětí na povrchu. Výpočet podpovrchových stykových napětí je složitější. Mezi podpovrchovým stykovým napětím a odolností vůči stykové únavě je největší význam připisován vlivu maximálního smykového napětí $\tau_{\max}$ (τ_{yz}) a maximálního proměnného – orthogonálního smykového napětí τ_0 (τ_{zy}). Maximální stykové napětí na povrchu $\sigma_{\max}$ působí uprostřed stykové elipsy na ose „z“. Maximální smykové napětí $\tau_{\max}$ působí v určité hloubce pod povrchem pod úhlem 45° ke stykovému povrchu [1].

- Při valení kuličky ve směru osy „y“ se smykové napětí $\tau_{\max}$ mění od nuly na obou koncích stykové elipsy po maximum uprostřed stykové elipsy, a to ve shodě s průběhem $\sigma_{\max}$.
- Při valení kuličky ve směru osy „y“ působí na libovolný prostorový prvek materiálu v rovině „yz“ pod stykovým povrchem mimo normálních napětí také proměnné smykové napětí τ_0 , a to v rovině rovnoběžné se směrem zatížení a v rovině kolmé na směr zatížení.
- Při valení kuličky se smykové napětí střídá, resp. cykluje od maximální tlakové hodnoty – τ_0 v místě jednoho okraje stykové elipsy přes nulovou hodnotu uprostřed stykové elipsy až po maximální tahovou hodnotu + τ_0 na druhém okraji stykové elipsy. Důležitá je hodnota rozkmitu $2\tau_0$ a hloubka jeho působení [1].

Pod stykovým povrchem působí tedy na libovolný objem materiálu maximální smykové napětí $\tau_{\max}$ (pod úhlem 45° ke stykovému povrchu) a maximální proměnné – orthogonální smykové napětí τ_0 v rovině rovnoběžné a kolmé na směr zatížení [1].

V závislosti na $\sigma_{\max}$ dosahuje $2\tau_0$ vyšší hodnoty než $\tau_{\max}$, ale působí v menší hloubce pod stykovým povrchem. Proměnnost smykového napětí $2\tau_0$ – tzn. cyklické působení tlakového a tahového smykového napětí na objem materiálu je rozhodující únavové namáhání v procesu podpovrchového stykového únavového porušení [1].

3.3.2.1 Podpovrchové stykové únavové porušení

Vznik a šíření únavové trhliny při cyklickém zatěžování kovových materiálů je dokonale popsáno pro podmínky objemové únavy – tzn. při cyklickém zatěžování tahem, ohybem, krutem apod. Pro podmínky cyklického zatěžování povrchových vrstev ve valivém styku chybí ucelená představa o mechanismu vzniku a šíření únavové trhliny. Změny mechanických a strukturních vlastností matrice (změkčení nebo zpevnění, rozpad zbytkového austenitu, přerozdělení zbytkových napětí apod.) nejsou na rozdíl od objemové únavy ukončeny v první fázi únavového procesu, ale probíhají až do vyčerpání trvanlivosti a mají kumulativní charakter [1].

Maximální napět'ové pole se tedy nachází v oblasti pod stykovým povrchem a nikoliv na stykovém povrchu. Při podmínkách dokonalého valení (bez přídavných třecích napětí) je rozhodujícím mechanismem vzniku podpovrchového stykového porušení nukleace trhliny na rozhraní inkluze a kovové matrice [1].

Mechanismus vzniku únavové trhliny v okolí vměstku probíhá následovně. Nejprve vznikají skluzová pásma na rozhraní vměstku a matrice. Porušením vměstku nebo jeho oddělením od kovové matrice poté dochází ke vzniku trhliny. Postupná změna mechanických vlastností v zatěžovaném objemu (především rozpad martenzitu), snižuje kritické napětí nutné pro vznik trhliny [1].

Šíření a zastavení únavové trhliny v podpovrchové stykové únavě závisí např. na cyklicky proměnném poli víceosé napjatosti, změnách strukturních parametrů základní kovové matrice a vzájemné interakci šířících – se a zastavených únavových trhlin [1].

Hnací síla trhliny, převažující směr šíření trhliny a úhel šíření vůči stykovému povrchu jsou určovány proměnným polem víceosé napjatosti. Trhlina vzniklá pod stykovým povrchem se šíří do hloubky pod úhlem $20^\circ \div 30^\circ$. Potom se trhlina až do vylomení šíří rovnoběžně se stykovým povrchem. Náklon šíření trhliny tedy nemůže ovlivňovat smykové napětí $\tau_{\max}$, protože působí pod úhlem 45° ke stykovému povrchu. Hlavní smykové napětí $\tau_{\max}$ ovlivňuje plastickou deformaci ve stykově namáhaném objemu. Proti vlivu $\tau_{\max}$ na šíření trhliny dále hovoří skutečnost, že únavová trhlina se může šířit ve směru i proti směru valení, což ovšem nemůže ovlivnit smykové napětí $\tau_{\max}$, které je jednosměrné [1].

Šíření trhliny rovnoběžně s povrchem ovlivňuje složka proměnného smykového napětí $2\tau_0$, působící kolmo na směr valení. Hloubka šíření trhliny (dno pittingu) je rovněž významně ovlivňována smykovým napětím $2\tau_0$, které má tedy rozhodující vliv na šíření trhliny [1].

Členitost dna pittingu, postupné vydrolování a přítomnost většího počtu trhlinek v okolí pittingu svědčí o tom, že v mechanismu podpovrchového stykového únavového porušení nepřevažuje systém jedné hlavní magistralní trhliny. Převažuje mechanismus zastavení, růstu a spojování většího počtu trhlin. Tento mechanismus je z napět'ového hlediska podporován přítomností poměrně velkých tlakových napětí, které působí na zavírání a tím zastavování trhliny [1].

3.3.2.2 Povrchové stykové únavové porušení

V podmínkách nedokonalého elastohydrodynamického mazání je možno pozorovat na povrchu valení vznik velkého počtu mělkých vydrolenin materiálu. Tato vada se označuje jako „surface distress“, neboli poškození povrchu kovové součásti způsobené přílišným místním napětím. Její vznik je spojen se vznikem a růstem mikrotrhlíčky při překročení kritického smykového napětí materiálu v objemu profilu nerovnosti, a to v důsledku působících smykových napětí na povrchu valení. Iniciační stadium vzniku mikrotrhlín na povrchu je spojeno s únavovým mechanismem probíhajícím v objemu profilu nerovnosti a vzniklá porucha se nazývá „pitting z povrchu“ [1].

Mikrotrhlíčky kolmé k povrchu se šíří pod úhlem $20^\circ \div 30^\circ$ převážně proti směru valení. V důsledku toho nepřevažuje vliv smykového napětí na šíření trhliny. Rozhodující vliv má napětí tahové, které vzniká následujícím mechanismem: Mazivo vnikající pod tlakem do mikrotrhlíčky přítomné na povrchu přenáší hertzovské tlakové napětí, které na čele mikrotrhlíčky vyvolá napětí tahové [1].

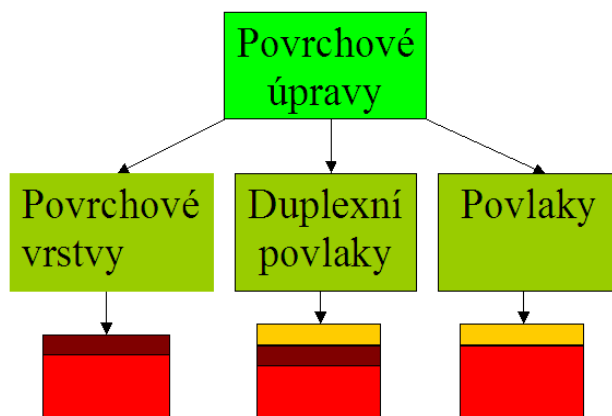
Při nízkém koeficientu tření je trhlina na povrchu zavřena, mazivo nemůže vnikat dovnitř a trhlina obtížně roste. Při vyšším koeficientu tření na povrchu se však trhlina otevře a mazivo přenáší zatížení dovnitř. Přítomnost maziva v trhlíně snižuje koeficient tření na plochách trhliny, což je další pozitivní vliv v mechanismu růstu povrchové trhliny v tlakovém poli hertzovského styku [1].

3.4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY VALIVÝCH LOŽISEK

3.4.1 Typy povrchových úprav

Aplikace různých povrchových úprav na jednotlivé materiály je dnes prakticky nezbytnou úpravou každé součásti. Chrání součást před korozním prostředím, zvyšuje odolnost proti opotřebení, kontaktní únavě a má také dekorativní funkci. Cílem výzkumu a vývoje povrchových úprav je zajistit zvýšení spolehlivosti součásti (bezporuchovost, dlouhou životnost, udržitelnost), zvyšování technických parametrů povrchových úprav, snižování výrobních nákladů a omezení znečištění prostředí [3].

Základní dělení z hlediska strukturní povahy povrchových úprav je na povlaky a vrstvy – viz Obr. 3.19 [3].



Obr. 3.19: Základní dělení povrchových úprav [7].

Povrchové vrstvy

Při vytváření povrchových vrstev se modifikuje chemické složení, struktura nebo substruktura na povrchu a v podpovrchových vrstvách základního materiálu. Od povrchu do jádra materiálu se vytváří gradient fyzikálně – mechanických i chemických vlastností bez jejich náhlé změny [7].

Vrstva je tedy součástí materiálu, u níž dochází vnějším působením k chemické a strukturní změně materiálu, funkční gradient změn vlastností je pozvolný [3].

Povlaky

Povlaky se nanášejí na původní povrch materiálu, zvětšují rozměr součásti a obvykle mají odlišné chemické složení i strukturu než základní materiál. Mezi povlakem a součástí vzniká rozhraní se skokovou změnou fyzikálních, mechanických a chemických vlastností. Tato nestejnorodost vlastností může vést k problémům při nanášení povlaků na povrch materiálu. Tloušťka povlaku závisí na základním materiálu a druhu aplikace. S rostoucí tloušťkou klesá přilnavost, protože roste tahové napětí v povlaku [3, 7].

Duplexní povlaky

Duplexní povlaky kombinují modifikaci povrchových vrstev s nanášením povlaku. Zabrání se tak náhlé změně fyzikálně – mechanických i chemických vlastností směrem od povrchu do jádra a docílí se požadované vlastnosti povrchu. Duplexní procesy vyžadují kombinaci dvou i více technologických postupů [7].

Z hlediska chemické podstaty povlaky a vrstvy dělíme na anorganické a organické – viz Obr. 3.20 [3].



Obr. 3.20: Rozdělení povrchových úprav z hlediska chemické podstaty [3].

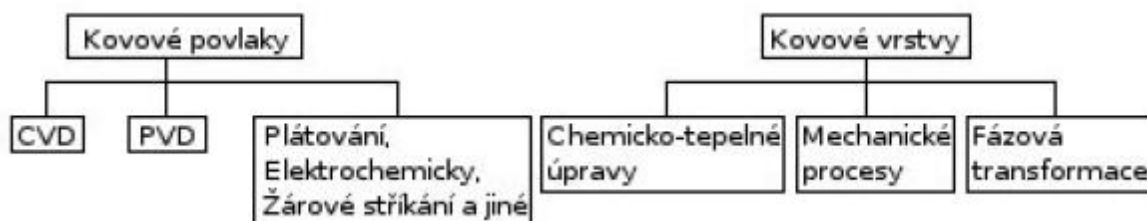
Organické povlaky mají funkci bariéry mezi součástmi a prostředím. Pro svoji cenu a jednoduchou aplikaci se stále hojně využívají nátěrové hmoty (asfaltové, olejové, silikonové, syntetické, atp.), které mají vysoký ochranný účinek proti chemickým vlivům, ale špatný proti vlivům mechanickým. Plastové povlaky se nejčastěji nanášejí na součást elektrostatickým naprašováním, které se po roztavení spojí a vytvoří souvislý celek. Další způsoby nanášení jsou např. žárové stříkání nebo plátování [3].

Anorganické povlaky dělíme na kovové a nekovové. Mezi nekovové povrchy patří různé keramické povlaky (oxidová keramika Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2) a konverzní povlaky (fosfátování, chromátování, oxidové povlaky) [3].

Podrobnější rozdělení anorganických kovových povlaků a vrstev s uvedením konkrétních výrobních metod je na Obr. 3.21 [3].

Kovové povlaky se nejčastěji zhotovují metodami CVD a PVD. Dalším způsobem je například plátování, využívané při výrobě kluzných ložisek. Dlouho známou metodou v tvorbě povlaků na tvarově složitých součástech je elektrochemické pokovování. Kovové povlaky lze také zhotovovat bez využití vnějších zdrojů proudu – např. žárovým ponorem nebo žárovým stříkáním [3].

Kovové vrstvy se vytváří chemicko – tepelným zpracováním, při němž se uplatňují difuzní pochody a povrch materiálu je obohacován vhodnými prvky (C, N, B, Cr, ...). Povrch součástí lze také zpevnit plastickou deformací za studena pomocí mechanických procesů – kuličkování, válečkování, otryskávání. V poslední řadě je možné zpevnit povrch fázovou transformací – povrchovým kalením [3].



Obr. 3.21: Rozdělení kovových povlaků a vrstev [3].

Rozdělení povlaků

Podle struktury:

- homogenní
- heterogenní

Podle počtu:

- jednovrstvé
- dvouvrstvé
- vícevrstvé

Podle tloušťky:

- nanometrické
- tenké (v μm)
- tlusté ($\mu\text{m} \div \text{mm}$)

Podle vlastností:

- odolné proti korozi (Zn, Sn, Al, Cr, Cu, oxidy, slitiny)
- odolné proti opotřebení (karbidy, nitridy, karbonitridy, keramika)
- se specifickými vlastnostmi – odrazivost nebo absorbivita světla
– nízký nebo vysoký koeficient tření

Podle způsobu vytváření:

- atomy, ionty, molekuly v podobě par (PVD, CVD)
- tekutá forma (kapky), tuhé částice (nástříky, navařování)
- kompaktní materiály (plátování)
- disperzní forma (organické povlaky, nátěry) [7].

Další dělení povrchových úprav

Podle účelu použití na:

- ochranu proti klimatickým a korozním vlivům
- dekorativní účely
- speciální účely (zvýšení tvrdosti, odolnosti proti opotřebení, ...)

Podle funkce na povlaky:

- izolující kov od znehodnocujícího prostředí
- izolující kov od znehodnocujícího mechanického vlivu
- se specifickou funkcí (s pasivačním účinkem, maskovacím účinkem, ...)

Z technologického hlediska dělíme povlaky a vrstvy na:

- fyzikální (PVD)
- chemické (CVD, nitridace, anorganické nekovové vrstvy) [3].

3.4.2 Příprava povrchu výrobků před povlakováním

Tvorba povlaků požadovaných vlastností je podmíněna mimo jiné správnou a dokonalou přípravou povrchu. Zvláště při zhotovování galvanických povlaků a speciálních vrstev jsou požadavky na čistotu povrchu velmi vysoké [8].

Cíle:

- odstranění všech nežádoucích nečistot z povrchu (mastnoty, okuje aj.)
- úprava mikrogeometrie a mikrostruktury povrchu pro zabezpečení přilnavosti povlaku, jeho celistvosti a vzhledu
- dosažení vhodného vzhledu výrobku, pokud se úprava považuje za konečnou [7, 8].

Kovový povrch se vyznačuje často značně mnohotvárným znečištěním, majícím svůj původ nejen při zhotovování výrobků, ale i při jejich skladování, přepravě, opravách a provozu. Obvykle se jedná o tři základní druhy nečistot:

- mastnoty, zahrnující zbytky konzervačních, mazacích a jiných olejů, vazelin, vosků a pomocných prostředků použitých při výrobě, skladování či přepravě
- okuje a jiné analogické látky, vznikající při výchozím zpracování kovových materiálů nebo vytvořených vlivem klimatického působení na výrobky
- ostatní částice, zahrnující např. zbytky abraziv z brusných a leštících prostředků, prašné depozity apod. [8].

Rozdílnost se neprojevuje pouze v charakteru nečistot, ale též jejich vazbě ke kovovému povrchu. Mezi základní druhy nečistot vyskytující se na kovovém povrchu se řadí především:

- částice kovů, nekovů a slitin
- oxidy kovů a nekovů, karbidy kovů, hydroxidy kovů, sulfidy kovů
- soli kovů
- alkoholy
- nízkomolekulární organické látky
- vyšší mastné kyseliny a vysokomolekulární produkty [8].

Dalším základním cílem technologií přípravy povrchu je úprava mikrogeometrie a mikrostruktury povrchu, neboť povrch kovového výrobku nemá před zhotovováním povlaku vyhovující jakost [8].

Vedle nečistot je třeba odstranit i všechny nežádoucí změny, vzniklé během výroby v důsledku výrobního procesu a tím vytvořit předpoklady pro dosažení dostatečné přilnavosti, celistvosti a tloušťky povlaku, jeho vyhovujícího vzhledu apod. K dosažení tohoto cíle se využívá obvykle tři základních metod:

- mechanické úpravy (otryskávání, broušení, kartáčování, leštění, omílání)
- chemické úpravy (odmašťování, moření, odrezování pomocí rozpouštědel a kyselin)
- elektrochemické postupy (odmašťování, moření, leštění, pasivace) [7, 8].

Při výběru metod, prostředků a technologií přípravy povrchu je třeba přihlížet k řadě činitelů, především k:

- druhu kovového výrobku, zejména k druhu použitých výchozích materiálů a jejich chemickému složení
- stavu povrchu výrobku, kde je nutné vzít v úvahu všechny technologické operace zpracování, druh a stupeň znečištění povrchu a jeho vazbu ke kovovému povrchu
- rozměrům a konstrukci výrobku, zejména k použitým kombinacím kovů, druhu spoje, počtu a rozměrům dutin, spár apod. Konstrukční uspořádání ovlivňuje výběr prostředků, rozměry limitují možnost použití technologických postupů a zařízení
- množství výrobků, které hraje významnou roli z hlediska výběru technologie a zařízení i ekonomie provádění povrchových úprav [8].

MECHANICKÉ ÚPRAVY

Hlavním cílem mechanických úprav je vytvoření podmínek k zakotvení zhotovovaného povlaku a dosažení požadovaných vlastností, např. korozní odolnosti a tvrdosti. Během výrobního procesu a skladování totiž dochází na povrchu výrobků k řadě změn, vzniku nepravidelností a poruch [8].

Při volbě mechanické úpravy povrchu je třeba hledat optimální variantu pro každý předpokládaný povlak tak, aby rozhodující znaky jakosti byly vyhovující. Jedná se o přilnavost, tloušťku a pórovitost povlaku. Z tohoto pohledu má velký význam analýza drsnosti povrchu. Pro daný typ povlaku je dána maximální přípustná drsnost povrchu směrnou hodnotou. Požadované drsnosti povrchu se dosahuje především: [8].

- otryskáváním
- broušením
- kartáčováním
- leštěním
- omíláním

Otryskávání

Otryskávání je druh mechanického opracování povrchu kovových výrobků proudem tryskacího prostředku, který je vrhán určitou vyhovující rychlostí na povrch otryskávaného výrobku. Je – li nosným médiem vzduch, musí být pro otryskávání i pro ofukování suchý, bez stop vlhkosti nebo olejovitých látek [8].



Obr. 3.22: Schéma otryskaného povrchu výrobku a reaktivní místa zvyšující přilnavost [8].

Podle účelu se rozděluje otryskávání na:

- čistící – odstraňování povrchových nečistot (např. okují, korozních zplodin apod.)
- pro úpravu povrchu před nanesením kovových povlaků žárovými nástříky nebo nekovových povlaků (např. nátěrů)
- pro zpevnění povrchu materiálu zvýšením únavové pevnosti [8].

Tryskací prostředky se volí podle:

- materiálu a tloušťky stěn otryskávaného výrobku
- výchozího stavu povrchu
- požadovaného výsledku otryskávání [8].

Broušení

Při broušení sice dochází k úběru tenké vrstvy materiálu brousícím nástrojem přitlačovaným k povrchu, ale na rozdíl od obrábění je tento úběr veden snahou odstranit nepravidelnosti povrchu, oxidové vrstvy, rez apod. a upravit vyhovujícím způsobem drsnost povrchu [8].

Kartáčování

Kartáčování je povrchová technologie, při které lze z povrchu výrobků odstraňovat hrubé nečistoty (zejména vrstvy oxidů nebo zbytky brusiva po broušení) a snižovat drsnost povrchu po broušení [8].

Omílání

Omílání je operací často zařazovanou před zhotovováním povlaků. Může být též konečnou úpravou, např. výrobků z neželezných kovů [8].

CHEMICKÉ ÚPRAVY

Lze charakterizovat z hlediska tvorby povlaků jako souhrn fyzikálních, chemických a chemicko – fyzikálních interakcí mezi chemickým činidlem a znečištěným povrchem kovového výrobku, jejichž účelem je upravit jakost povrchu na úroveň vyhovující pro daný druh povlaku, který se předpokládá následně zhotovit [8].

Nečistoty dělíme v tomto případě na dvě základní skupiny, a to:

- nečistoty, které nejsou chemicky vázány k podkladovému kovu. Do této skupiny se řadí všechny druhy mastnot typu olej, vazelína, vosk, dále zbytky volného brusiva uvolněného z brousících a leštících prostředků, a to včetně zbytků nosných médií. Tento druh nečistot se na povrchu vyskytuje v různých variantách, často v kombinaci s prašným depozitem.
- nečistoty, které vznikly chemickou nebo chemicko – fyzikální přeměnou povrchové vrstvy kovového výrobku při interakci s okolním prostředím. Jedná se především o oku a korozní produkty [8].

Ze skladby obou skupin nečistot lze odvodit, že se chemická příprava povrchu neřeší pouze odstraněním mastnoty. Vedle procesu odmašťování jsou dalšími chemickými úpravami moření a odrezování k odstranění okují a rzi. Odmaštěný, mořený nebo odrezaný povrch je však velmi náchylný ke koroznímu napadení. Proto se po těchto operacích často zařazují další úpravy jako neutralizační oplach a pasivace [8].

Odmašťování

Odmašťování je proces, kterým se kovový povrch zbavuje ulpívajících nečistot, a to především mastnoty [8].

Moření

Moření je proces, jímž se povrch výrobků zbavuje především těch nečistot, které jsou s povrchem chemicky vázány. Jedná se o okuje a oxidové vrstvy vytvářené vlivem okolního prostředí, mechanického, tepelného a chemického zpracování [8].

Odrezování

Odrezování je proces založený převážně na bázi anorganických kyselin pro odstraňování korozních zplodin atmosférické koroze železných a ocelových výrobků – rzi [8].

Chemické leštění

Chemické leštění se zpravidla využívá při úpravě výrobků z hliníku, mědi, případně z jejich slitin [8].

Elektrochemické odmašťování

Elektrochemické odmašťování je zvláště významné před galvanickým pokovováním. Je to v podstatě ponorové odmašťování, při kterém se využívá účinku elektrického proudu na tvorbu plynného vodíku a kyslíku pro zvýšení mechanického účinku na nečistoty vyskytující se na kovovém povrchu [8].

Elektrolytické leštění kovových výrobků

Elektrolytické leštění kovových výrobků je zvláštním druhem elektrochemického moření. Na rozdíl od moření, při kterém dochází k rozpouštění kovu a zvyšuje se drsnost povrchu, leštěním dochází k odstraňování povrchové vrstvy a odstranění poruch povrchu [8].

Pasivace

Pasivace je chemická nebo elektrochemická úprava, kterou se zvyšuje odolnost kovového povrchu proti korozi. Pasivační vrstva je velmi slabá a proto je její ochranná účinnost omezená. Z tohoto důvodu je pasivace určena především pro mezioperační ochranu při přepravě a skladování před následnou úpravou povrchu výrobků [8].

3.4.3 Chemické metody vytváření povlaků ve vakuu

Základní parametry CVD (Chemical Vapour Deposition)

Energie:	teplotní (CVD patří mezi tepelně – chemické procesy)
Teplota procesu:	$800 \div 1100^{\circ}\text{C}$
Tloušťka povlaku:	do $10\ \mu\text{m}$
Tvrdość:	$1800 \div 5200\ \text{HV}$ (podle typu povlaku)
Základní materiál:	oceli, SK
Druhy povlaků:	TiN, TiCN, Al_2O_3 , HfN,... [7, 9].

Historie & důležité události

Jako první využili CVD Powel, Oxley a Blocher v roce 1880 při výrobě žárovek, které měly vlákna pokrytá uhlíkem nebo kovem [10].

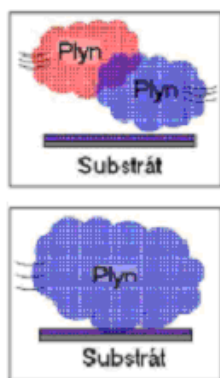
V následujících padesáti letech se metoda CVD vyvíjela pomalu, po druhé světové válce však došlo v tomto oboru k prudkému vývoji [10].

- 1960 – vznik pojmu CVD, tentýž rok průnik CVD do polovodičového průmyslu
- 1963 – využití CVD v přítomnosti plazmy v elektronice
- 1968 – průmyslové využití slinutých karbidů upravených pomocí CVD
- 80. léta – výroba umělých diamantů metodou CVD
- 90. léta – prudká expanze MOCVD, vývoj CVD v oblasti optiky a optoelektroniky [10]

Princip CVD

Chemická depozice z plynné fáze je tepelně – chemický proces využívaný pro přípravu tenkých filmů (např. polovodičový průmysl). Aplikované vrstvy se vyznačují vysokou tvrdostí, odolností proti otěru a opotřebení [10].

Celý proces probíhá za vysokých teplot ($800 \div 1100^{\circ}\text{C}$). Povlakovaný předmět (substrát) je ohřát ve směsi chemicky reaktivních plynů, které reagují na jeho povrchu mezi sebou, nebo se rozkládají za vzniku požadovaného materiálu. Reagující látky jsou do depoziční komory CVD zařízení přiváděny v podobě jejich plynných chemických sloučenin. Výsledkem těchto reakcí je růst (depozice) povlaků požadovaných materiálů na povrchu vyhřívaného substrátu. Výchozí chemické sloučeniny jsou do reaktoru a produkty chemických reakcí jsou z reaktoru transportovány nosným plynem. Schéma děje – viz Obr. 3.23 [8, 10, 11].



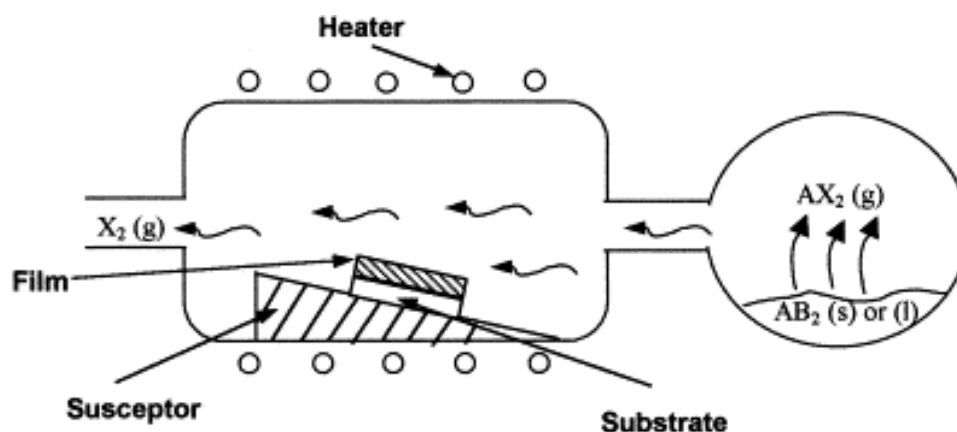
Obr. 3.23: Princip CVD [12].

CVD je proces použitelný k vytváření vrstev z téměř všech kovových i nekovových prvků. Deponovány mohou být i sloučeniny. Patří tedy k těm transportním procesům, jejichž povaha je atomistická (stejně jako u PVD), protože deponovány jsou atomy, molekuly, nebo jejich kombinace [7].

V procesu se uplatňuje řada typů chemických reakcí (např. tepelný rozklad, oxidace, redukce, nauhličení, ...). Tyto reakce probíhají buď samostatně, nebo se navzájem kombinují. Jsou ovlivňovány (resp. charakterizovány) zejména jejich termodynamikou a kinetikou, teplotou, tlakem a chemickou reaktivitou [7].

Tak jako všechny chemické reakce, i CVD vyžadují k realizaci aktivační energii. Tu lze v praxi dodat různými způsoby. Původní CVD využívala tepelnou aktivaci a dosud je to nejfrekventovanější postup pro CVD kovů a keramiky. Reakce je v tomto případě aktivována vysokou teplotou, obvykle nad 900°C. Udržování substrátu při vysoké teplotě nutné pro rovnovážnou chemickou reakci je ale zároveň základní nevýhodou této technologie – vlivem vysoké teploty působící na substrát po delší časový úsek totiž dochází ke změkčení původní matrice [7, 11].

Typická CVD aparatura má v tomto případě tři části – zdroj reaktantu (plynu), depoziční komoru (reaktor) a systém pro odsávání – viz Obr. 3.24 [7, 8, 11].



Obr. 3.24: Schéma CVD zařízení [7].

Vytváření povlaků v klasickém chemickém reaktoru může probíhat podle následujícího postupu:

- transport reagujících látek do pásma růstu povlaku
- přenos aktivních částic k povrchu substrátu
- adsorpce částic na povrchu
- disociace, chemické reakce, migrace, růst povlaku
- desorpce vedlejších produktů chemických reakcí
- transport vedlejších produktů chemických reakcí do nosného plynu
- transport vedlejších produktů nosným plynem z reaktoru [8].

Klasické CVD metody tvorby povlaků

Pro klasické metody CVD využívající reakce v plynech jsou charakteristické vysoké tlaky reakčních plynů ($p \geq 100$ kPa) a nízké kinetické energie částic. Chemické reakce jsou zde pomalejší a jejich rychlost R_A závisí na teplotě T podle klasického Arrheniova vztahu: [8].

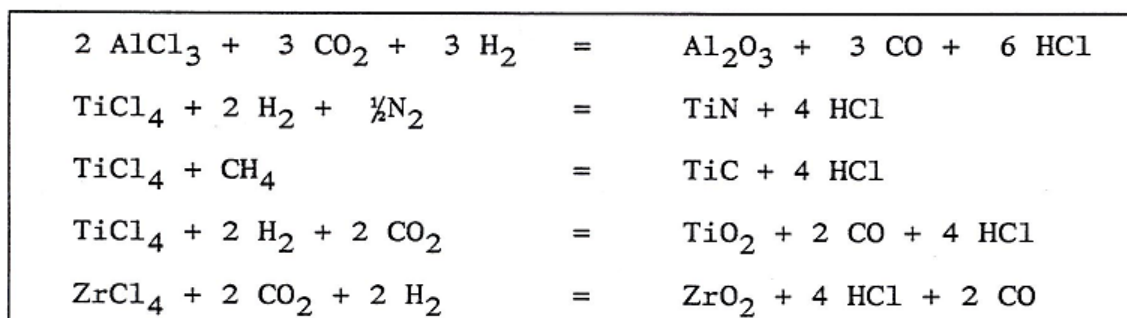
$$R_A(T) = k_A \cdot \exp\left(\frac{-W_A}{k \cdot T}\right) \quad [8].$$

kde: k_A je rychlostní konstanta

W_A je aktivační energie reakce A

k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)

Příklady chemických reakcí vedoucích k vytvoření vybraných povlaků jsou uvedeny v Tab. 3.2. Vlastnosti některých typů povlaků vytvářených technologií CVD jsou pak uvedeny v Tab. 3.3 [8].



Tab. 3.2: Chemické reakce při vytváření povlaků technologií CVD [8].

Chemické složení	Tvrdost HV	Teplota tání °C	Tepelná vodivost cal/cm.s.K	α_1 ($10^{-6}/\text{K}$)
BC	4900 - 5000	2350	0,07	4,5
TiC	2980 - 3800	3180	0,041 - 0,08	7,61
VC	2800	2830	0,01	6,5
HfC	2700	3890	0,015	6,73
ZrC	2600	3530	0,049	6,93
NbC	2400	3480	0,034	6,84
WC	2000 - 2400	2730	0,07	6,2
TaC	1800	3780	0,053	6,61
Cr ₃ C ₂	1300	1890	0,045	10,3
TiN	2400	2930	0,069	9,35
VN	1500	2050	0,027	8,1
HfN	2000	2700	0,027	6,9
ZrN	1900	2980	0,026	7,9
NbN	1400	2300	0,009	10,1
TaN	1300	2090	0,023	5,0
BN	4700	1200-1500	0,43 - 0,48	4,8
Al ₂ O ₃	2100	2030	0,072	8,6

Tab. 3.3: Vlastnosti vybraných povlaků vytvářených technologií CVD [8].

Podle podmínek (teplota, tlak), za kterých probíhají chemické reakce a růst povlaků, rozlišujeme následující metody CVD: [8].

Rozdělení podle teploty:

- Vysokoteplotní **HTCVD (High Temperature CVD)**
- Nízkoteplotní **LTCVD (Low Temperature CVD)**

Podle tlaku:

- Při normálním tlaku **APCVD (Atmospheric Pressure CVD)**
- Za sníženého tlaku **SBCVD (Subatmospheric Pressure CVD)**
- Za nízkého tlaku **LPCVD (Low Pressure CVD)**

Iniciované a zesílené plazmatem:

- Iniciované plazmatem **PACVD (Plasma Activated/Assisted CVD)**
PICVD (Plasma Induced CVD)
- Zesilované plazmatem **PECVD (Plasma Enhanced CVD)**
- Mikrovlnně generované **MPCVD (Microwave Plasma CVD)** [8].

Existuje celá řada dalších variant CVD procesů, jako např.:

- Laserový CVD (tepelný laser nebo fotolaser)
- MOCVD (Metal – Organic CVD), kde se jako prekursorů používají organokovové látky a další, které lze nalézt v literatuře [7].
- Metody PECVD může být dále využito k tvorbě DLC filmů, které se skládají ze směsi sp^2 a sp^3 vazeb. Poměr sp^2 : sp^3 se může lišit v závislosti na obsahu vodíku (až do 40% vodíku) [13].

Aplikací CVD na součásti valivých ložisek dochází ke snížení tření mezi valivými tělisky a kroužky a zvýšení odolnosti proti otěru, opotřebení a kontaktní únavě. Tato technologie se stává extrémně důležitou zejména u těchto aplikací:

- výroba polovodičů a jiných elektronických komponent, mikroelektronika (čipy)
- ve strojírenství (tvrdé a otěruvzdorné povlaky nástrojů a strojních dílů, kde je kladen důraz na vysokou odolnost proti opotřebení)
- výroba součástí pro optiku (filtry, odrazné vrstvy), optoelektroniku a součástí korozně odolných
- v elektrotechnice a počítačové technice (záznamová média, displeje)
- výroba ultrajemných pásků, vysokopevných vláken, nanotubic apod.
- v medicíně (tvrdé a biokompatibilní povlaky implantátů)
- výroba syntetického diamantu
- ve spotřebním průmyslu (např. dekorativní povlaky) [7, 10, 11].

Plazmochemické metody tvorby povlaků

Rozhraním mezi CVD a PVD metodami jsou metody CVD s asistencí plazmatu (PACVD, PICVD, PECVD), které jsou sice nízkoteplotní jako metody PVD, ale všechny komponenty pro tvorbu vrstvy jsou plynné. Reakce jsou v tomto případě aktivovány plazmou, a to za teplot v rozmezí $300 \div 700^{\circ}\text{C}$. Tento postup byl vyvinut především s cílem zabránit nežádoucímu tepelnému ovlivnění substrátu [7, 8].

Plazmochemické metody tedy pracují s nižšími teplotami než klasická, tj. termální CVD, jak je patrné z následujícího příkladu typických teplot [$^{\circ}\text{C}$] [7].

	Termální CVD	Plazma CVD
nitrid křemíku	900	300
nitrid titanu	900 – 1100	500
karbid titanu	900 – 1100	500
karbid wolframu	1000	325 – 525

Tab. 3.4: Porovnání teplot termální a plazmochemické metody CVD [7].

Plazmatické prostředí v případě metod CVD umožňuje efektivnější způsob iniciace chemických reakcí. Plazmochemické systémy jsou charakteristické nízkými tlaky reakční plynné směsi ($p \ll 100 \text{ kPa}$), ve které je vytvořen elektrický výboj. Plazma je definováno jako kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic vykazujících kolektivní chování. Vzhledem k nízké hmotnosti dosahují elektrony v plazmatu podstatně vyšších rychlostí než ionty nebo neutrální molekuly plynu. Elektrony proto nabývají kinetickou energii dostatečnou pro udržování nepružných srážek s neutrálními molekulami, pohybová energie těžkých částic se mění jen málo. Při nepružných srážkách předávají elektrony svou energii na ionizaci neutrálních částic, na disociaci molekul a na změny jejich vnitřní energie. Chemická aktivita vybuzených částic je výrazně vyšší než jejich chemická aktivita v základním stavu. Plazmochemické reakce vedoucí k vytváření povlaků na substrátech v plazmatu mohou proto probíhat při nižších teplotách a tudíž, na rozdíl od klasických chemických metod, se plazmochemické metody považují za nízkoteplotní [8].

Povlak se na povrchu substrátů vytváří v důsledku fyzikálně – chemických procesů probíhajících v objemu plazmatu (homogenní reakce) a procesů probíhajících přímo na rozhraní mezi plazmatem a povrchem substrátu (heterogenní reakce) [8].

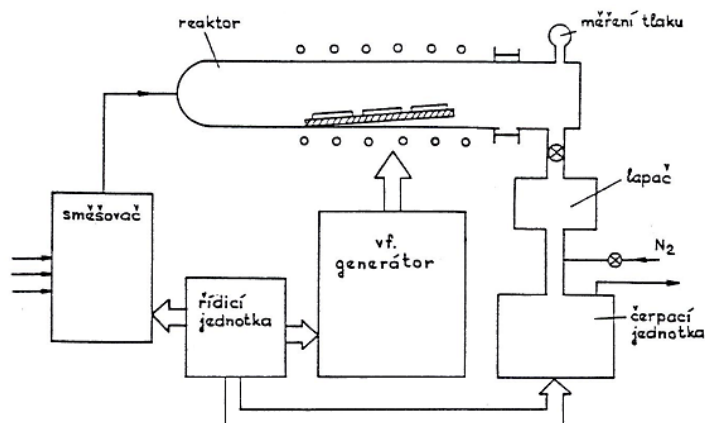
Rychlost chemických reakcí v plazmochemických systémech

Ačkoliv chemické reakce probíhají mezi těžkými částicemi (ionty, molekulami, atomy či radikály), hlavní roli při vytváření chemicky aktivních částic hrají nepružné srážky elektronů s těmito těžkými částicemi. Rychlost chemických reakcí v plazmochemických systémech může být vyšší než v klasických chemických systémech a dá se vyjádřit ze vztahu: [8].

$$R_A(T) = n_e \cdot n_A \cdot \int_0^{\infty} \left(\frac{W}{2 \cdot m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_A(W) \cdot f(W) \cdot dW \quad [8].$$

kde: n_e je koncentrace elektronů
 n_A je koncentrace reagující složky A
 m_e je hmotnost elektronů
 W je energie
 $\sigma_A(W)$ je efektivní srážkový průřez
 $f(W)$ je energetická distribuční funkce elektronů

Často používaným způsobem generace plazmatu pro plazmochemické vytváření povlaků je vysokofrekvenční generace. Vysokofrekvenční generátory pracují obvykle s kmitočtem 13,56 MHz nebo 27,12 MHz. Příklad uspořádání plazmochemického reaktoru s vysokofrekvenčním buzením je uveden na Obr. 3.25 [8].



Obr. 3.25: Plazmochemický reaktor s vysokofrekvenčním buzením [8].

U všech metod tvorby povlaků za účasti plazmatu se tvoří povlaky při interakci chemicky aktivních částic se substrátem. Aby se omezil vliv iontového bombardování rostoucího povlaku, byly vyvinuty reaktory využívající dohasínajícího nebo rozpadajícího se plazmatu. Substráty se zde umísťují mimo oblast aktivní generace plazmatu [8].

Nejnověji se objevují zdroje plazmy založené např. na optimální kombinaci elektrického a magnetického pole [7].

3.4.4 Fyzikální metody vytváření povlaků ve vakuu

Základní parametry PVD (Physical Vapour Deposition)

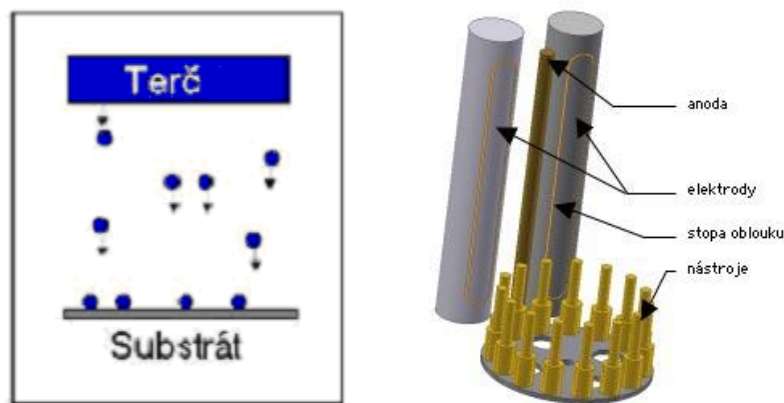
Energie:	plazma, oblouk (PVD patří mezi tepelně – fyzikální procesy)
Teplota procesu:	250 ÷ 550°C
Tloušťka povlaku:	2 ÷ 8 μm
Tvrдость:	1750 ÷ 3000 HV (podle typu povlaku)
Základní materiál:	oceli, SK
Druhy povlaků:	TiN, TiCN, CrN, TiAlN + Me, AlCrN + Me, ... [7, 9].

Princip PVD

V případě fyzikálních metod vytváření tenkých povlaků jsou atomy materiálů získávány fyzikálními principy – odpařováním materiálu nebo jeho odprašováním a následně nanášeny na povrch substrátu. Tyto metody jsou označovány jako metody **PVD (Physical Vapour Deposition)** a řadí se mezi tepelně – fyzikální procesy. Schéma děje – viz Obr. 3.26 [8, 12].

PVD proces, na rozdíl od CVD, nevyužívá k tvorbě deponovaného produktu chemických reakcí v plynné fázi. Je to však také proces atomistický, tj. film je na substrátu vytvářen kondenzací atomů („adatomů“), a to v následující sekvenci: [7].

- odpaření materiálu („adatomů“), který má být deponován
- transport materiálu k substrátu
- kondenzace a nukleace adatomů
- růst nukleí
- tvorba rozhraní
- nárůst filmu – nukleace a reakce s dříve deponovaným materiálem
- změny ve struktuře během depozičního procesu – rozhraní a filmu
- postdepoziční změny v důsledku postdepozičního zpracování – vystavení prostředí



Obr. 3.26: Princip PVD [12, 14].

Všechny výše uvedené kroky významně ovlivňují kvalitu (vlastnosti) deponovaných vrstev a zaslouží si proto detailnějšího popisu.

Odpaření depozičního materiálu může probíhat v zásadě dvěma postupy – termálním a atermálním. V prvním případě je nutný ohřev (procesy vakuového odpařování). Do druhé kategorie spadají postupy naprašování (sputtering) [7].

Přenos odpařeného materiálu na substrát se může dít prostřednictvím plynu, vakua nebo plazmy. Prostředí vakua umožňuje udržet kontaminaci na požadované úrovni. Plyné prostředí může vyvolat nukleaci odpařené fáze. Prostředí plazmy zvyšuje chemickou reaktivitu deponovaného materiálu [7].

Podle povahy substrátu, deponovaného materiálu a technologických podmínek depozice, nabývá rozhraní substrát/plyn nejrůznějších podob. Difuzní rozhraní je charakterizováno plynulou změnou složení napříč přechodovou vrstvou, bez tvorby sloučenin. Pseudodifuzní rozhraní je charakterizováno gradientním povlakem vytvořeným postupným promícháváním, s tvorbou sloučenin, často křehkých [7].

Deponovaný film narůstá kontinuální nukleací deponovaných atomů na dříve deponovaný materiál. Drsnost filmu, jeho morfologii a mikrostrukturu lze během růstu filmu ovlivnit změnou depozičních podmínek. V průběhu deponování mohou probíhat významné strukturní změny s dopadem na vlastnosti povlaku – např. rekrytalizace a růst zrn, precipitace a růst fází, růst oblasti rozhraní, koalescence dutin, atd. Reakcí deponovaného materiálu s plynným prostředím (při tzv. reaktivním nanášení) lze vytvářet sloučeniny filmu [7].

Tenké povlaky pro strojírenství a jejich vlastnosti

Tenké tvrdé povlaky, aplikované technologií PVD, se ve strojírenství používají především ke zvýšení povrchové tvrdosti, oteuvzdornosti, odolnosti proti opotřebení a ke zvýšení životnosti strojních součástí. Využívá se také zlepšené odolnosti proti korozi a nízkého součinitele tření. Uvedené vlastnosti představují požadavky kladené na součásti valivých ložisek, proto se PVD procesy využívají k povrchovým úpravám těchto strojních součástí [8].

PVD vrstvy se dále v hojné míře aplikují na obráběcí nástroje a podstatně tak zvyšují jejich životnost a současně i kvalitu obrobku. Některé z nich umožňují i suché obrábění. Nanesením vhodného povlaku na strojní součásti je možné významně snížit rychlost otěru, koeficient tření či přestup tepla [11].

Rychle expandující oblastí PVD metod je povlakování tzv. dekorativními vrstvami, které buď velmi dokonale napodobují zlato či mosaz, nebo mají jinou atraktivní barvu. Dlouhodobě stálý vzhled těchto povlaků je zajištěn jejich vysokou tvrdostí zabraňující otěru a odolností proti korozi. Uplatňují se například při výrobě koupelnových baterií, nábytkového kování, hodinek, bižuterie a jinde [11].

Používají se povlaky následujících typů:

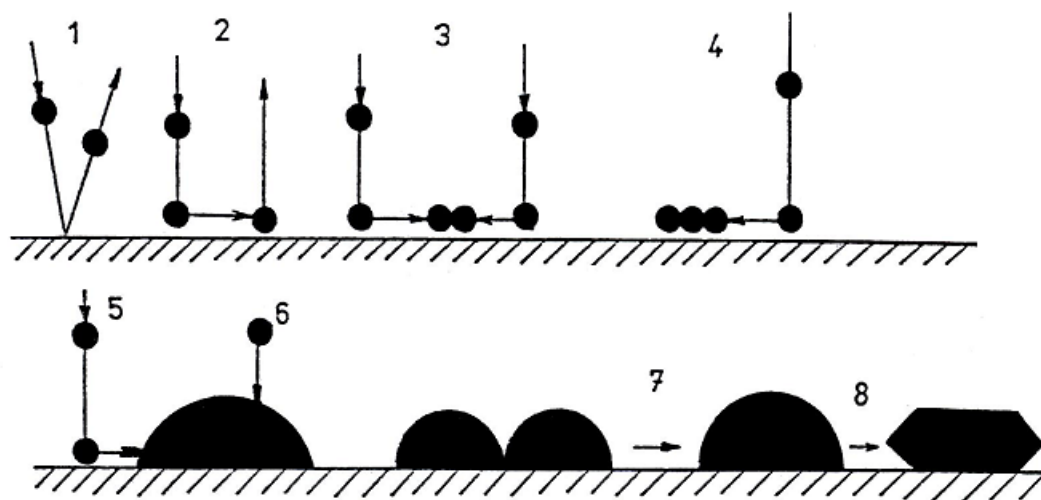
- kovové povlaky.....Ti, Mo, Ni
- slitinové povlaky
- sloučeninové povlaky – s převažující iontovou vazbou..... Al_2O_3 , ZrO_2
– s převažující kovalentní vazbou....SiC, C
– s převažující kovovou vazbou.....TiN, TiC, ZrN
- multifázové povlaky.....(Ti,Al)N, (Ti,Zr)N, (Ti,W)N, (Ti,C)N
- sendvičové struktury.....TiN + (Ti,Zr)N + ZrN, Ni + CrN
- povlaky s proměnným chemickým složením... $\text{Ti}_x\text{Al}_y\text{N}_z$
- kompozitní povlaky [8].

Růst povlaků a jejich struktura

Po dopadu atomu na povrch substrátu může daný atom setrvat na povrchu vzhledem k desorpci po určitou dobu. Adsorbovaný atom se může po povrchu substrátu pohybovat (povrchová difúze, migrace). Po určité době pobytu na povrchu může být adsorbovaný atom zpětně desorbován (vypařen). Za určitých podmínek může atom setrvat na povrchu substrátu velmi dlouhou dobu, navíc mohou na povrchu existovat místa se zvýšenou vazebnou energií, ze kterých je zpětná desorpce jen velmi málo pravděpodobná. Atomy migrující po povrchu substrátu mohou vytvořit dimer s větší vazebnou energií a menší pohyblivostí. K tomuto dimeru se mohou povrchovou migrací připojit další atomy a vytvořit tak větší, složitější útvar. Od určité velikosti je za daných podmínek rozpad vzniklého útvaru prakticky nemožný a vzniká tzv. kritické jádro. Proces vzniku kritických jader se nazývá nukleace. Jádra rostou povrchovou difúzí v ostrůvky, uplatňuje se i mechanismus přímého zachytu atomů z plynné fáze na jádro. Ostrůvky dále srůstají, tento jev se nazývá koalescence [8].

Na čistotu rostoucího povlaku mají vliv především atomy a molekuly zbytkového plynu, které bombardují povrch substrátu. Kromě částic zbytkového plynu se mohou uplatnit i částice desorbované ze stěn vakuové aparatury a částice uvolňované do vakuové aparatury v důsledku technologického procesu. Čistota rostoucího povlaku bude tím větší, čím bude:

- menší tlak zbytkových plynů
- větší rychlost depozice [8].



Obr. 3.27: Povrchové procesy při vzniku povlaku [8].

1. odraz částice od povrchu substrátu
2. adsorpce částice na povrchu substrátu, její povrchová migrace a zpětné vypaření
3. spojení dvou částic, vytvoření dimeru
4. připojování další částice k dimeru povrchovou migrací
5. připojování dalších částic k ostrůvku povrchovou migrací
6. připojování dalších částic k ostrůvku přímým dopadem
7. koalescence dvou ostrůvků
8. rekrytalizace ostrůvku [8].

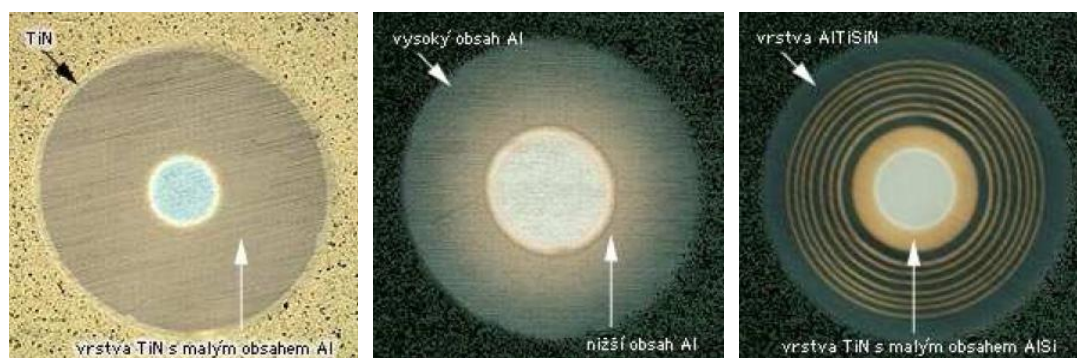
Se vzrůstem kinetické energie dopadajících částic se čistota nanášených povlaků a jejich struktura zlepšuje. Působí zde následující mechanismy:

- vlivem vysoké energie dopadajících částic se povrch substrátu očišťuje od adsorbovaných atomů a nečistot
- částice s vysokou energií překoná dráhu ze zdroje na substrát v kratším čase a pravděpodobnost její reakce s jinými atomy nebo s molekulami plynů v prostoru vakuové komory se zmenší
- kinetická energie dopadající částice se částečně transformuje na energii povrchové migrace a tím se pohyblivost atomu na povrchu substrátu zvětší [8].

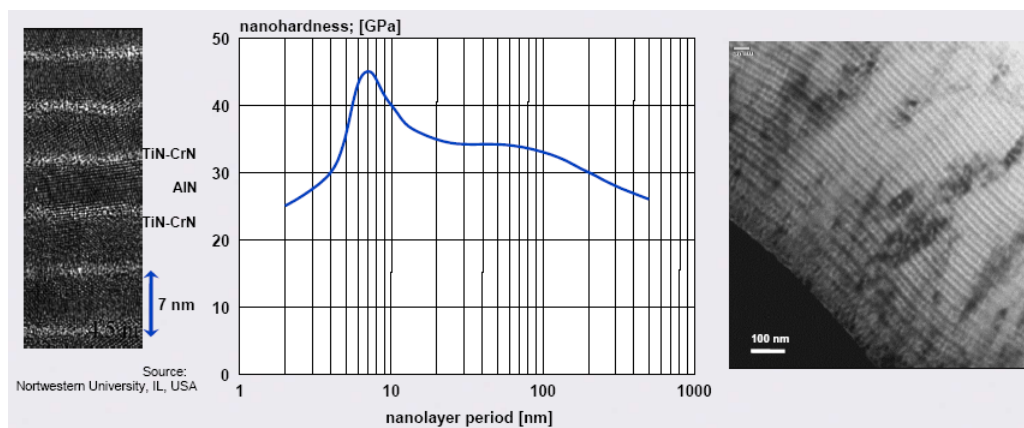
S rostoucím úhlem mezi trajektorií částice a normálou k povrchu substrátu se zvýší složka rychlosti částice rovnoběžná s povrchem substrátu. To má za následek zvýšení migračního pohybu částice po povrchu. Šikmým dopadem se tedy zvýší vliv kinetické energie deponovaných částic na strukturu povlaku [8].

Bombardováním povrchu substrátu elektronovým nebo iontovým svazkem se povrch čistí od adsorbovaných nečistot. V případě bombardování elektrony dochází k ohřevu a difúzi. Bombardováním povrchu ionty dojde k čištění, přičemž energie čistících iontů nemá překročit hodnotu 100 eV, aby se tyto ionty nevstřelovaly a nezabudovávaly do objemu povlaku [8].

Architektura povlaků



Obr. 3.28: Struktura multifázových povlaků [9].



Obr. 3.29: Nanovrstevná struktura [9].

3.4.4.1 Depozice povlaků odpařováním

Je PVD proces, při kterém jsou páry materiálu získávány s pomocí tepla (odpařením nebo sublimací). Prvky, sloučeniny a slitiny jsou odpařovány ve vakuu a deponovány na substrát, teplota substrátu se pohybuje od pokojové do 500°C. K vypařování látek dochází za každé teploty, přičemž rychlost vypařování intenzivně roste s teplotou. Pro dosažení rychlého vypařování je nutné odpařovanou látku zahřát na vyšší teplotu, přičemž ohřev odpařované látky může být realizován v celém objemu nebo lokálně. Během vypařování musí být tlak zbytkových plynů ve vakuové aparatuře co nejmenší [7, 8].

Metoda je běžně používána pro depozici čistých kovů (např. Al, Cr, Ni, Ti, Mo, W), některých slitin (Cr-Ni, Pb-Sn, nerezové oceli) a vybraných sloučenin, např. AlO_3 , TiC. Filmy mohou být vytvářeny i tzv. reaktivním odpařováním – nejčastěji jde o reakci deponovaného filmu (např. Ti, Zr, Al a plynným prostředím O_2 , N_2) [7, 8].

Jako zdroj tepla pro odpařování slouží např.:

- odporový ohřev přímým průchodem stejnosměrného nebo střídavého proudu
- nízkoenergieový a vysokoenergieový svazek elektronů
- induktivní ohřev s využitím vířivých proudů indukovaných do odpařovaného materiálu
- ohřev svazkem urychlených elektronů
- ohřev laserem
- ohřev obloukem [7, 8].

Reaktivní odpařování

Používá se pro vytváření povlaků chemických sloučenin, přičemž reaktivní látka bývá do vakuové komory přiváděna ve formě plynu. Pro vytváření nitridů se používá dusík N_2 , oxidů CO_2 , karbidů CH_4 . Pro aktivaci, disociaci, resp. ionizaci molekul reaktivního plynu se využívá srážek s urychlenými elektrony nebo těžkými částicemi (atomy nebo ionty). K intenzivní ionizaci dochází především při srážkách s nízkoenergetickými elektrony. Za účelem zvýšení ionizace byla vyvinuta řada systémů se zvýšenou ionizací reaktivního plynu [8].

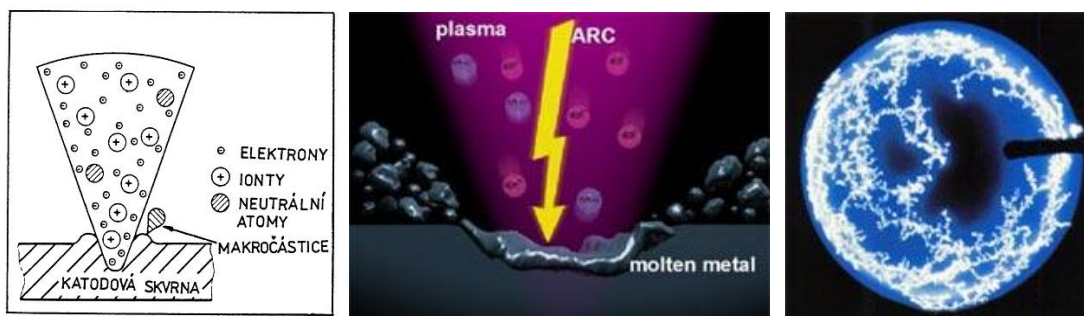
Obloukové odpařování

Nanášená látka je katodou (terčem) vakuového obloukového výboje (anodou bývá vakuová komora) a je jím lokálně odpařována a současně ionizována. Katoda jako celek zůstává pevná, taví se jen v místě katodové skvrny výboje, která se po jejím povrchu pohybuje. Tento náhodný pohyb lze magnetickým polem usměrnit a zvýšit tak kvalitu vrstev i využití terče [11].

Výhodou této metody je velmi variabilní uspořádání (obdélníková, kruhová či jiná katoda v libovolné poloze). V katodových skvrnách dochází k emisi elektronů a k vypařování katody ve formě atomů, iontů a makročástic. Podstatná část odpařené látky je ionizována (podíl iontů činí asi 80 %), což zlepšuje přilnavost vrstvy k substrátu. Lze odpařovat pouze vodivé materiály a slitiny [8, 11].

Povlak však obsahuje makročástice (mikroskopické kapičky odpařovaného kovu), které negativně ovlivňují některé jeho vlastnosti (povrchovou drsnost, koeficient tření, odolnost proti korozi). Dopadu makročástic na povlakované předměty lze zabránit použitím elektromagnetického filtru, který ale mnohonásobně snižuje rychlost nanášení,

takže je vhodný jen pro speciální aplikace (např. v mikroelektronice). Tvar katodové skvrny je schematicky znázorněn na Obr. 3.30 [8, 11].



Obr. 3.30: Katodová skvrna při odpařování obloukem a její pohyb [8, 9].

Nízkonapěťový oblouk je výhodný pro svoji vysokou rychlost odpařování a vysokou ionizaci plazmatu. Velmi zajímavé jsou jeho parametry. Hoří v místě katodové skvrny o průměru řádově 10 μm , kde dosahuje teploty cca 15 000°C. Za těchto podmínek lze odpařit prakticky každý elektricky vodivý materiál [14].

3.4.4.2 Depozice povlaků naprašováním (sputter deposition)

Princip tzv. katodového naprašování je atermální proces odpařování, při kterém jsou povrchové atomy vyráženy z povrchu vhodným fyzikálním procesem – nejčastěji za použití doutnavého svazku nebo pomocí iontového svazku a za přítomnosti inertního (pracovního) plynu, např. argonu. Katodové naprašování se používá v řadě různých variant a jejich kombinací [7, 8].

Při jistém parciálním tlaku argonu jsou elektrony přítomné v systému urychlovány elektrickým polem a na své dráze ionizují atomy argonu na ionty Ar^+ , Ar^{2+} , ... Tyto relativně těžké ionty urychlené elektrickým polem dopadají na zápornou elektrodu – katodu (terč, target) a vyrážejí z ní atomy, které dopadají na substrát, kde mohou kondenzovat. Energie naprašovaných částic je obecně vyšší než v případě naparování. Ionty argonu dopadající na katodu, uvolňují z ní zároveň s naprašovaným materiálem i elektrony, čímž se proces udržení doutnavého výboje reprodukuje [8].

Odpařování je tedy postup, používaný jako zdroj atomů, které jsou následně redeponovány na jiný povrch – na substrát. V porovnání s jinými metodami depozice má tato metoda řadu předností, a to zejména: [7, 8].

- je použitelná pro neomezené množství materiálů zdrojů a filmů (kovy, polovodiče, izolátory, slitiny a sloučeniny)
- snadná nízkoteplotní depozice vysokotavitelných kovů
- snadná tvorba multikomponentních filmů
- rovnoměrná tloušťka filmů na velké ploše
- vysoká adheze filmů
- proces je šetrný k životnímu prostředí [7].

Technologie má samozřejmě i některá omezení, např. že:

- odpařovaný materiál musí být ve tvaru plechu nebo trubky
- problémy s napařováním složitých tvarů (napařit lze jen to, co je viditelné pro zdroj)
- rychlosti depozice jsou malé (většinou menší než 30 nm/min)
- pořizované náklady na zařízení jsou vysoké (je třeba vakuové prostředí) [7].

Vysokofrekvenční naprašování

V případě vysokofrekvenčního naprašování se ke stejnosměrnému napětí na systému superponuje střídavé elektrické pole s kmitočtem 13,56 MHz nebo 27,12 MHz. Elektrony v ionizovaném plynu stačí sledovat změny tohoto pole svým pohybem a po celé jejich dráze dochází k dodatečné ionizaci atomů nebo molekul plynu a tím ke zhuštění plazmatu. Těžké kladné ionty argonu naopak nestačí sledovat změny vysokofrekvenčního pole a jsou urychlovány pouze stejnosměrnou složkou pole směrem ke katodě [8].

Velkou výhodou vysokofrekvenčního způsobu naprašování je možnost odprašování nevodivých materiálů, nevýhodou nutnost přizpůsobení impedance vysokofrekvenčního zdroje (generátoru) impedanci doutnavého výboje [8].

Magnetronové naprašování

Magnetronové naprašování je založeno na prodloužení dráhy elektronů ve zkříženém elektrickém a magnetickém poli, kdy na volné elektrony působí jak síla od elektrického pole, tak Lorentzova síla [8].

Síla od elektrického pole: $F_E = q \cdot E$

Lorentzova síla: $F_L = q \cdot (v \times B)$

kde: **q** je náboj částice

E je elektrická intenzita

v je rychlost částice

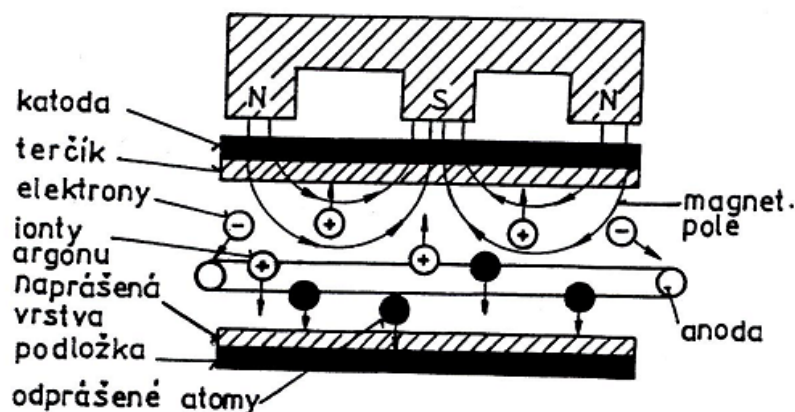
B je magnetická indukce

Nanášená látka je katodou (terčem) magnetronového výboje. Výboj hoří ve velmi zředěném inertním plynu (zpravidla argonu) ve vakuové komoře, která je současně jeho anodou. Od jiných povrchových technologií se liší tím, že větší část plazmy je soustředěno v těsné blízkosti záporně nabitého terčíku, který má tvar prstence a je odprašován pomocí silného magnetického pole nad povrchem terčíku (odtud název magnetron). Zvýšení hustoty plazmatu má za následek snížení pracovního napětí na hodnotu pohybující – se mezi 300 až 700 V. Vhodně uspořádaným magnetickým polem se docílí rozšíření plazmatu až k povlakovaným předmětům. Pro udržení výboje je nezbytný pomocný inertní plyn (Argon) [7, 8, 11].

Výhodami magnetronového naprašování oproti klasickým diodovým a triodovým systémům jsou vysoké rychlosti depozice povlaků (10^2 až 10^3 nm/min), celkový tlak pracovního plynu 10^{-2} až 10^{-1} Pa, zanedbatelný ohřev substrátu a velmi dobrá reprodukovatelnost vlastností deponovaných povlaků. Vrstvy neobsahují makročástice vyskytující – se u obloukového odpařování. Lze naprašovat libovolný materiál včetně slitin a nevodičů. Snadno lze nanášet povlaky tvořené více vrstvami různého chemického složení (multivrstvy) a povlaky s průběžně – se měnícím složením (gradientní vrstvy) [8, 11].

Samostatným problémem, který do jisté míry limituje účinnost magnetronu, je chlazení velkého parazitního tepelného výkonu na katodě [11].

Magnetrony se používají ve dvou základních provedeních – jako válcové (kolíkové nebo s dutou katodou) a jako planární (kruhové nebo obdélníkové). V moderních velkoplošných planárních magnetronech je magnetické pole realizováno buď pomocí výkonných permanentních magnetů, nebo pomocí říditelných elektromagnetů. Princip magnetronového naprašování je znázorněn na Obr. 3.31 [8, 11].



Obr. 3.31: Magnetronové naprašování [8].

Reaktivní naprašování

Při reaktivním naprašování **RS (Reactive Sputtering)** se kromě inertního pracovního plynu do vakuové aparatury přivádí ještě reaktivní plyn, který vytváří s rozprašeným materiálem katody chemické sloučeniny. Ve směsi:

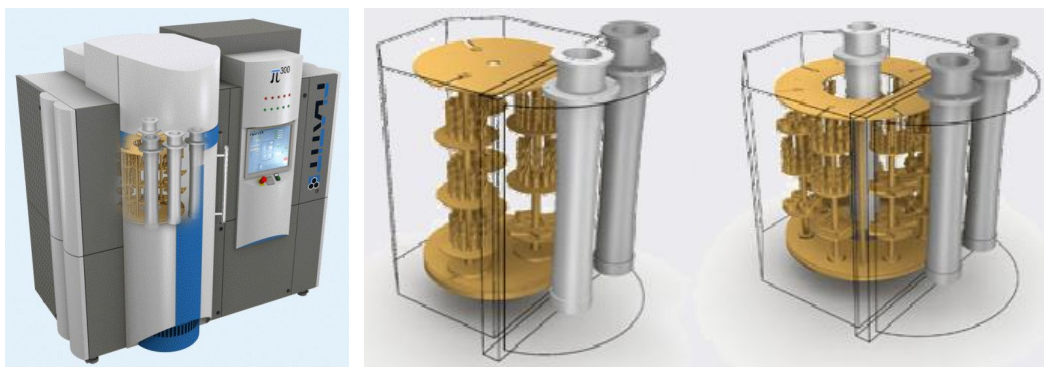
- $\text{Ar} + \text{O}_2$ se vytvářejí oxidy
- $\text{Ar} + \text{N}_2$ se vytvářejí nitridy
- $\text{Ar} + \text{CH}_4$ se vytvářejí karbidy [8].

Chemické složení, struktura a vlastnosti deponovaných povlaků závisí na procesech probíhajících na terči magnetronu, dále na objemových plazmochemických procesech (aktivace, ionizace atomů a iontů rozprašeného terče, jejich energie) a na povrchových procesech substrátu závislejících především na teplotě substrátu, energii dopadajících částic a v neposlední řadě na předpětí substrátu [8].

PVD zařízení

Pro kvalitu povlakování je nesmírně důležitá také celková koncepce vakuové komory a konstrukce substrátového stolku, nesoucího povlakované předměty. Závisí na tom totiž jak rovnoměrnost teploty substrátů během růstu vrstvy a tloušťky vrstvy v rámci jedné vsázky, tak i rychlost povlakování, velikost jedné vsázky a doba nutná k její výměně [11].

Vždy však platí, že klíčová je volba technologie vhodné pro zamýšlenou aplikaci, takže sice na špatném zařízení opravdu kvalitní povlaky nanášet nelze, lze však udělat špatný nebo nevhodný povlak i na zařízení špičkovém [11].



Obr. 3.32: PVD zařízení Pi300, umístění targetů [9, 14].

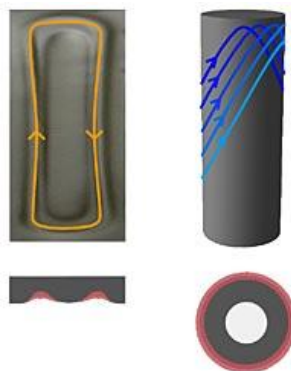
Umístění targetů:

- centrální
- z obvodu
- kombinace

Tvar targetů:

- plochý
- válcový

Konvenční PVD zařízení jsou vybaveny tzv. planárními elektrodami (ploché, ve tvaru desek). Na nich však při použití silného magnetického pole dochází k nadměrné a soustředěné erozi a k jejich podstatně dřívějšímu vyřazení z procesu. Tento problém se podařilo technicky vyřešit pomocí rotujících válcových elektrod, jejichž „účinná plocha“ je v podstatě p-krát větší díky rotaci nedochází ke zmíněné statické erozi [14].



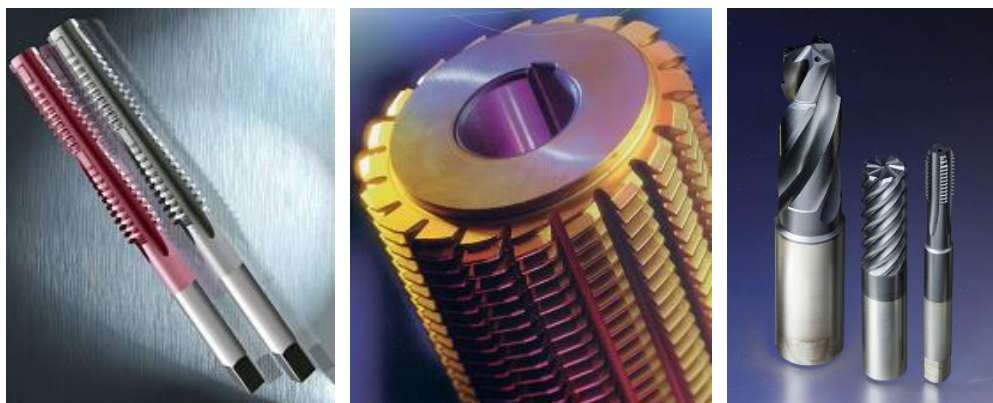
Obr. 3.33: Planární a válcový target [14].

PVD technologie jsou velmi rozšířené v oblasti strojírenství, nezastupitelnou roli hrají především v oblastech strojního obrábění. Jejich aplikací na funkční plochy řezných nástrojů dosahujeme zejména:

- vyšší životnosti nástrojů
- zvýšení řezných parametrů
- možnosti obrobení bez povlaku neobrobitelných materiálů (superslitin)
- minimalizace procesních kapalin
- vysoké tvrdosti povrchu
- otěruvzdornosti
- odolnosti proti abrazivnímu opotřebení
- tepelné stability povlaku

PVD povlaky se opatřují např.:

- řezné nástroje (vyměnitelné břitové destičky, frézy, vrtáky, výstružníky, závitníky,...)
- tvářecí nástroje (razníky, střižníky, tažníky,...)



Obr. 3.34: Aplikace PVD povlaků na různé typy řezných nástrojů [9].

Jakkoli se PVD a CVD technologie jeví jako rozdílné metody, současným trendem je jejich sblížování. Např. CVD nyní začíná v široké míře využívat plazmu (což je typický fyzikální jev), zatímco PVD často pracuje s chemickým prostředím (reaktivní odpařování a naprašování). Obě technologie jsou také často realizovány ve stejném zařízení – sekvenčně, bez přerušení vakua a rozdíl mezi nimi se smazává. Každá z PVD metod má svá pro i proti a vždy záleží na stanovení priority vlastností finálního výrobku (včetně ceny) [7, 11].

3.4.5 Povlaky na bázi DLC (Diamond – Like Carbon)

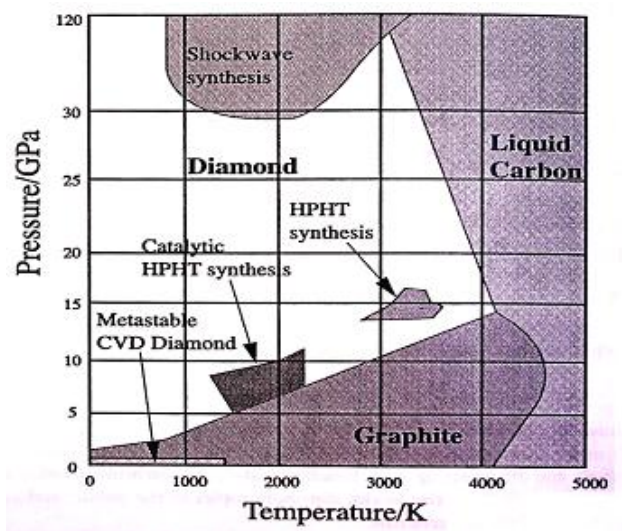
Průmyslové využití DLC a diamantu

Povlaky na bázi DLC, diamant a další podobné materiály, jako např. nitrid uhlíku či CBN (kubický nitrid bóru), se řadí k nejtvrdějším známým materiálům [1].

DLC (Diamond – Like Carbon) je obecný název pro amorfni směs grafitu a uhlíku s vazbou podobnou diamantu. Uhlíkové povlaky podobné diamantu se vyznačují vysokou tvrdostí, nízkým součinitelem tření, dobrou otěruvzdorností a chemickou netečností, čímž přispívají k nižšímu opotřebení a k prodloužení trvanlivosti ložisek. Čím tvrdší jsou kontaktní povrchy ložisek, tím nižší je jejich opotřebení [3, 15].

Tyto požadované vlastnosti splňuje nejlépe diamant, jakožto nejtvrdší známý materiál, avšak výroba celodiamantového ložiska by byla náročná a příliš drahá. Řešení představuje nanesení tvrdého tenkého povlaku o tloušťce několika mikrometrů na používanou ložiskovou ocel. Takový povlak se nazývá DLC (Diamond – Like Carbon) neboli uhlík podobný diamantu. Spojením odolnosti a pevnosti běžné oceli s výjimečně nízkým třením a vysokou tvrdostí DLC povlaku vznikne ložisko, které se vyznačuje vysokou tvrdostí povrchu a nízkým součinitelem tření [3, 15].

Jak již bylo řečeno, přírodní diamant je velmi drahý a těžko obrobitelný, proto se v průmyslových aplikacích prakticky nevyužívá. Před více než třiceti lety byl průmyslově vyráběn a využíván syntetický polykrystalický diamant (PCD). Metodou HPHT (high – pressure/high – temperature) byl PCD vyráběn za vysokých teplot a tlaků ($1600 \div 2000^\circ\text{C}$; $500 \div 1000 \text{ kPa}$) z grafitických nebo jiných uhlíkových prekurzorů. Prekurzor je výchozí látka z níž vzniká chemickou přeměnou výsledný produkt. V 70. letech minulého století byla objevena možnost výroby tenkých diamantových a diamantu podobných filmů depozicí za nízkého tlaku ($10^2 \div 10^3 \text{ Pa}$) metodami CVD (chemical vapour deposition) a PVD (physical vapour deposition). Další modifikace této metody (PECVD, PACVD, ...) umožnily výrazné snížení povlakovacích teplot. Díky snížení depoziční teploty je možné povlakovat materiály, u kterých důsledkem vysokých teplot dochází k ovlivnění struktury (oceli, polymery, ...). Další výhodou je snížení výrobních nákladů a požadavků na výrobní zařízení [1].

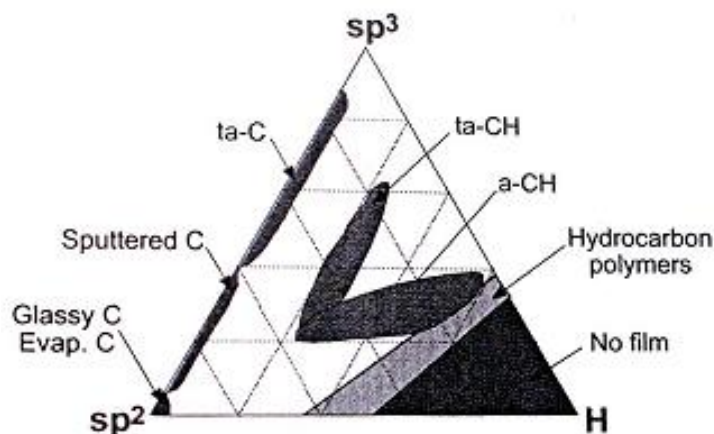


Obr. 3.35: Diagram oblastí stability jednotlivých fází uhlíku v závislosti na teplotě a tlaku [1].

Základní typy DLC povlaků

V závislosti na způsobu výroby je možné u těchto povlaků dosáhnout široké škály struktur, složení a velmi příznivých mechanických, optických, elektrických, chemických a tribologických vlastností. Struktura a vlastnosti filmu jsou určeny obsahem vodíku a poměrem obsahu vazeb sp^2 a sp^3 (grafitová a diamantová vazba). Vodík je v DLC důležitý jednak pro dosažení požadovaných vlastností a jednak pro zabránění rozpadu struktury na grafitickou fázi [1].

Typy DLC povlaků v závislosti na obsahu vodíku a poměru vazeb sp^2 a sp^3 jsou znázorněny na Obr. 3.36 [1].



Obr. 3.36: Ternární fázový diagram zobrazující jednotlivé formy DLC [1].

Amorfní uhlík s vazbou sp^2 je v levém dolním rohu. V pravém dolním rohu se nachází fáze s vysokým obsahem vodíku, které se vylučují jen ve formě plynu nebo v kapalném skupenství. Typy filmů neobsahující vodík jsou nazývány „Sputtered C“ (sputtered amorphous carbon) – s převažující vazbou sp^2 a „ta-C“ (tetragonal amorphous C) – s více než 85% obsahem vazby sp^3 . Nejčastěji používaný typ DLC je povlak $a-CH$, s obsahem vodíku kolem 50% a středním obsahem vazby sp^3 . V současné době jsou vyráběny DLC povlaky s příměsí dalších prvků, např. Si, F, N, W, ... [1].

Díky široké škále dosažitelných struktur a rozmanitosti použitelných výrobních technologií je možné DLC filmy vyrábět „na míru“ s vlastnostmi vyhovujícími konkrétním aplikacím [1].

Vliv povlakovacích metod na strukturu a složení DLC filmu

Z hlediska optimalizace výrobního procesu DLC filmu je primární efektivita procesu, dosažení požadovaných vlastností a dobrá přilnavost k substrátu. V oblasti tribologických aplikací musí povlak dosahovat velmi dobré přilnavosti k substrátu, adhezní síly musí překonat vliv velkých vnitřních napětí, vznikajících vlastní výrobou i během provozu a které mohou způsobit delaminaci filmu. Adheze povlaku je ovlivněna především povahou substrátu a podmínkami depozice. K dobré přilnavosti DLC povlaku dochází při použití substrátů na bázi Si. Na ocelových substrátech je přilnavost povlaku DLC s výhodou zvyšována tvorbou několik nanometrů silné mezivrstvy Si, W, Mo a Ti. Z hlediska zabránění kontaminaci a vzniku defektů je žádoucí tuto mezivrstvu vytvářet ve stejném reaktoru jako vlastní povlak, a to vícenásobnou depozicí [1].

Při dodržení správných depozičních podmínek jsou s ohledem na topografii substrátu u DLC povlaků dosažitelné drsnosti povrchu řádově v desítkách nanometrů. Depozice DLC je nerovnovážný proces, charakterizovaný interakcemi částic s povrchem substrátu, nebo narůstajícího povlaku. Růst a vlastnosti povlaku jsou řízeny teplotou substrátu a energií dopadajících částic [1].

Nejrozšířenější metodou pro tvorbu a-CH povlaků je PECVD (plasma – enhanced CVD). Prekurzorem je některý uhlovodíkový plyn (CH_2 , CH_4 , ...), substrát je připevněn na katodu. Struktura filmu (obsah H a vazeb sp^3) je výrazně závislá na energii dopadajících částic, která je řízena předpětím a tlakem plynného prekurzoru [1].

- Při nižší energii dopadajících iontů nedojde k úplnému rozpadu vazeb plynného prekurzoru a vytváří se film na bázi polymerů s výskytem skupin $=\text{CH}_2$.
- Při středních energiích je dosaženo maxima vazeb $\text{C}-\text{C}$ sp^3 a tedy i diamantu podobných vlastností povlaku.
- Pokud je energie dopadajících částic příliš vysoká, vytváří se grafitu podobná struktura s narůstajícím procentem vazeb $\text{C}-\text{C}$ sp^2 na úkor vazeb $\text{C}-\text{C}$ sp^3 [1].

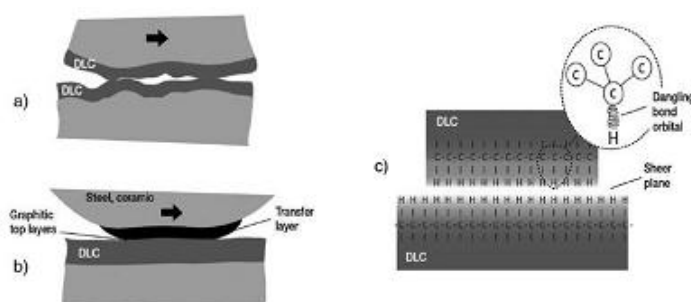
Vliv struktury a chemického složení na vlastnosti DLC povlaku

Struktura a složení filmu (obsah H, podíl H navázaného na C, poměr sp^2/sp^3 a další prvky) jsou silně ovlivněny průměrnou nárazovou energií částic dopadajících na rostoucí povrch a teplotou depozice [1].

Povlaky bez vodíku vykazují zejména vyšší tvrdost, Youngův modul pružnosti a tepelnou stálost. Oproti tomu obsah vodíku snižuje např. koeficient tření a brání rozpadu struktury na grafit. Konkrétní ovlivnění vlastností povlaku nezávisí jen na vlastním obsahu vodíku, ale i na jeho rozložení ve struktuře [1].

Tribologie DLC povlaků

Tření a opotřebení je silně ovlivněno povahou filmu a podmínkami tribologického testu (povahou substrátu, přitlačnou silou, směrem a rychlostí relativního pohybu, teplotou, prostředím, ...). Tribologii povlaků lze rozdělit na tři oblasti podle měřítka, a to na makro, mikro a nano – viz Obr. 3.37 [1].



Obr. 3.37: Rozdílné mechanismy tribologického kontaktu určujícího tření a opotřebení v měřítku a) makro; b) mikro; c) nano [1].

- Makroskopické měřítko sleduje závislost velikosti tření a opotřebení na povaze filmu při různých podmínkách zatěžování.

- Z pohledu mikroskopického se jedná o povrchové smykové mechanismy, tvorbu přenesené vrstvy a třením vyvolané formování vydrolenin.
- Oblast nano je zaměřena na chemickou reaktivitu povrchu s prostředím a chemické vlastnosti povrchů filmů nanesených za různých podmínek [1].

Tvrdost povlaku

Tvrký povrch jednotlivých dílů ložisek ve spojení s nízkým třením přispívá k potlačení oděru a jiným projevům opotřebení a tedy k podstatnému prodloužení životnosti ložisek. Nanesením DLC povlaku dojde ke značnému zvýšení tvrdosti určených částí ložiska. Typické hodnoty tvrdosti DLC povlaku se řádově pohybují kolem 1200 HV, zatímco tvrdost ložiskové oceli je 650 až 850 HV. V současné době lze povlak nanášet ve velmi tenkých vrstvách o tloušťce několika mikronů na jakékoliv ložisko [3, 15].

Součinitel tření

Vhodný součinitel tření ložisek opatřených tímto povlakem závisí na prostředí, v němž se mají používat. DLC povlak může být nanesen buď na valivá tělesa nebo kroužky, případně na obě součásti, proto získáváme různé hodnoty součinitele tření. Největšího zvýšení životnosti a zároveň nejnížší hodnoty součinitele tření se dosahuje při aplikaci DLC povlaku na obě součásti. Životnost při zkoušce prokluzem za suchého tření se však výrazně prodlouží i tehdy, je-li DLC povlak nanesen pouze na jednom z povrchů. Důvod, proč ložiska s povlakem DLC dosahují delší životnosti, spočívá v nízkém součiniteli tření těchto povlaků a velmi vysoké tvrdosti povrchu. Hodnoty součinitele tření DLC povlaků se blíží téměř k hodnotám součinitelů materiálů s nízkým třením, jako PTFE a MoS₂, fungujícím jako pevná maziva [3, 15].

Mezi DLC povlaky a pevnými mazivy je však podstatný rozdíl – DLC se při vyšších tlacích neotírá. Další jedinečnou vlastnost DLC představuje charakteristika při zabíhání tohoto povlaku. I když je povlak velmi tvrdý, jeho malá část vytvoří stykovou oblast s nízkým třením. Tento jev rovněž chrání související plochy z oceli, které by jinak tvrdší povlak poškodil. Ve spojení s tvrdostí tak DLC zajišťuje ideální stav jako při mazání pevnými mazivy [15].

Výhody ložisek s povlakem DLC

Vyhodnocení laboratorních a praktických aplikací ložisek s povlakem DLC ukazují na nižší provozní teploty a delší trvanlivost ložiska. To platí především pro případy s nízkým a nulovým zatížením, kdy za normálních okolností dochází k haváriím způsobeným oděrem. Nízké tření dále brání opotřebení a zadření ložisek a umožňuje tak provoz při nižších teplotách v případech s nedostatečným mazáním anebo při vysokých otáčkách. Této vlastnosti lze využít při zmenšování rozměrů systémů a návrhu řešení, která jsou mnohem příznivější pro životní prostředí [15].

Vysoká tvrdost povrchu ve spojení s chemickou povahou uhlíku umožňuje dosáhnout vyšší odolnosti proti abrazivnímu a adhezivnímu opotřebení a tedy prodloužit životnost ve velmi náročných a znečištěných prostředích. Jelikož DLC povlak funguje i jako pevné mazivo, lze ložiska opatřená tímto povlakem použít v uloženích s nízkou viskozitou maziva, v uloženích s vibracemi nebo uloženích vykonávajících oscilační pohyb. K výraznému snížení opotřebení dochází už při aplikaci DLC povlaku na jeden povrch, což většinou postačí k řešení problému [3, 15].

Příklady aplikace

Až dosud se ložiska s povlakem DLC s úspěchem používala v zařízeních, jako jsou kompresory, papírenské stroje a hydraulické motory. V těchto aplikacích přispívá povlak k ochraně ložisek proti poškození oděrem. Například v kompresorech patří oděr vyvolaný nulovým zatížením, vibracemi a mazivy s nízkou viskozitou k problémům, které lze řešit jen obtížně. Použitím ložisek s povlakem DLC však tyto problémy odpadají. Příkladem je šroubový kompresor pro dopravu čpavku, v němž ložiska s povlakem DLC vyřešila problémy s oděrem. Kromě toho ložiska s povlakem DLC umožňují vyloučit velké vnější mazací systémy a tím dosáhnout úspory místa, hmotnosti, a co je nejdůležitější, i nižšího dopadu na životní prostředí [15].

Další významnou oblast použití ložisek s povlaky DLC představuje hydraulika, např. čerpadla a motory. Nízký součinitel tření DLC povlaku a podstatné snížení opotřebení ložiska nachází uplatnění zejména v hydraulických motorech. V současné době se většina hydraulických zařízení maže olejem o nízké viskozitě, který za určitých okolností způsobuje tření a opotřebení. U ložisek s povlaky DLC se uplatnil mazací efekt tuhého maziva, který prodloužil životnost ložisek v některých hydraulických zařízeních až desetkrát. Jiná hydraulická zařízení vyžadují nákladné uzavřené a samostatné mazací systémy, které zajišťují potřebné provozní podmínky. Ložiska s povlakem DLC odstraňují nutnost použití takových systémů [15].

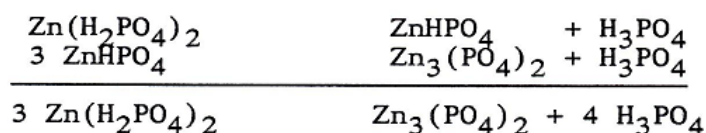
Budoucnost ložisek s ochranným povlakem

Řešení založená na povlacích nacházejí v současné době stále širší uplatnění. Jedním z nejdůležitějších požadavků je, aby povlak dobře přilnul k povrchu ložiska i při vysokém stykovém napětí. Povlaky se nanášejí napařováním, fyzikálním nebo chemickým způsobem. V současné době se pro většinu aplikací nanáší povlak DLC pouze na valivá tělesa. To v mnoha případech postačuje pro řešení určitého problému. Většina ložisek by však mohla být v zájmu dosažení optimální funkce povlakem potažena úplně [15].

Povlak DLC představuje poměrně novou technologii, které je v současné době věnována značná pozornost a na její další vývoj je zaměřena velká část výzkumných prací. Výzkum a vývoj v této oblasti postupuje velmi rychle a neustále se objevují nové koncepty a nové typy povlaků. V případě vhodné výrobní technologie jsou očekávány ještě lepší výsledky, proto jsou prováděny další testy povlaků na bázi DLC, zhotovenými různými způsoby. Současný vývoj DLC povlaků představuje pouze začátek celé řady druhů povlaků [15, 16].

3.4.6 Fosfátové povlaky

Fosfátování je proces povrchové technologie, při kterém se na povrchu železa, oceli a též zinku, hliníku a jejich slitinách vytváří nekovová vrstva nerozpustných nebo obtížně rozpustných fosforečnanů kovů. Hmotnosti aplikovaných vrstev bývají až do 50 g/m². Nejrozšířenější je použití fosfatizačních prostředků na bázi zinku. Tyto prostředky pro fosfátování obsahují dihydrogenfosforečnan zinečnatý a volnou kyselinu fosforečnou v takovém množství, aby docházelo k přeměně na fosforečnan, který je prakticky nerozpustný a ne ke vzniku rozpustnějšího ZnHPO₄ a dobře rozpustného Zn(H₂PO₄)₂: [8].



Zkvalitnění povlaku se dosahuje přidáním urychlovačů, (zejména oxidačních látek), které zkracují fosfatizaci na několik minut. Vznikající fosfátové vrstvy lze rozlišovat podle jejich charakteru na:

- vrstvy hrubě krystalické, silně pórovité a velmi nasákavé, jejich hmotnost je obvykle do 50 g/m². Vytváří se z roztoků na bázi fosforečnanu manganu nebo směsi fosforečnanů železa a manganu.
- vrstvy krystalické, silně pórovité a nasákavé, jejich hmotnost je obvykle do 40 g/m². Vytváří se z roztoků na bázi fosforečnanu zinku, obsahujících urychlovače.
- vrstvy velmi jemné krystalické struktury, jejich hmotnost je obvykle do 4,5 g/m². Zhotovují se z roztoků na bázi fosforečnanu zinku nebo fosforečnanů vápníku a zinku, obsahujících urychlovače.
- vrstvy nemající krystalickou strukturu, pouze interferenční zbarvení, jejich hmotnost je obvykle do 1 g/m². Přípravují se z roztoků alkalických nebo amonných fosforečnanů, obsahujících urychlovače a povrchově aktivní látky [8].

Na chemické složení, krystalickou strukturu a další vlastnosti povlaků má vliv řada činitelů, a proto se fosfatizační procesy rozdělují hlavně podle funkce a cíle jejich použití na:

- fosfatizační procesy sloužící k ochraně proti korozi** – vytváří vrstvy nerozpustné ve vodě, silně pórovité a nasákavé o hmotnosti 10 až 40 g/m². Nejčastěji se využívá fosfatizačních prostředků na bázi zinku. V neupraveném stavu chrání vrstva kovový povrch proti účinkům koroze velmi omezeně. Protikorozní ochranu lze zvýšit impregnační vrstvy konzervačními prostředky nebo laky.
- fosfatizační procesy jako příprava povrchu před nanášením nátěrových hmot** – se využívají pro zvýšení životnosti nátěrového systému na oceli nebo žárově pozinkované oceli. Vhodné jsou zejména fosfatizační procesy, které zajišťují vytvoření velmi jemné, celistvé krystalické fosfátové vrstvy o hmotnosti 0,02 až 6 g/m², která má maximální korozní odolnost. Vytvářené povlaky zajišťují přilnavost nátěru k podkladovému kovu a zabráňují podrezivění.
- fosfatizační procesy ke zlepšení tvářecích technologií** – hrají důležitou roli tím, že tvoří nosnou vrstvu pro mazivo a zamezují bezprostřednímu styku povrchu tvářeného kovu s nástrojem. Fosfátové vrstvy tak pomáhají zvýšit životnost nástrojů, zlepšit

jakost povrchu výrobků, snižovat tření apod. Pro vytváření těchto povlaků se nejčastěji používají zinečnaté fosfatovací prostředky, které poskytují povlaky střední tloušťky o hmotnosti 3 až 15 g/m².

- **fosfatizační procesy k záběhu pohyblivých strojních součástí** – využívají prostředků vytvářejících fosfatové vrstvy o hmotnosti 15 až 30 g/m² na bázi manganu, které mají některé odlišné vlastnosti od zinkových fosfatových vrstev – např. jinou krystalickou soustavu, větší tvrdost, vyšší nasákavost pro oleje. Tyto vlastnosti zaručují rychlejší záběh, zmenšují kluzné tření a snižují hlučnost chodu součástí [8].

Fosfatové povlaky jsou široce využívány především k povrchové úpravě výrobků z uhlíkatých, nízko a střednělegovaných ocelí a litiny. Povlak tvoří obvykle podklad pod organickým povlakem nebo konzervačním prostředkem. Příležitostně se aplikuje fosfatování i u zinku a hliníkových slitin jako konečná úprava [8].

3.4.7 Povlaky z práškových plastů

Povlaky z práškových plastů a práškových nátěrových hmot se řadí mezi povrchové úpravy součástí organickými materiály a v současné době patří mezi nejrozšířenější technologie povrchových úprav zasahující téměř do všech oblastí a oborů. Povlaky jsou levné, ekologické, technologicky nenáročné, kvalitní, nenáročné na energii a předúpravu. Na rozdíl od nátěrů neobsahují povlaky z práškových plastů antikorozní pigmenty a proto jsou kombinovány s anorganickými nekovovými povlaky, např. fosfátovými, které současně zvyšují přilnavost povlaku ke kovovému podkladu. Povlaky jsou vhodné pro ocelové součásti, součásti z pozinkovaného plechu, hliníku, mědi a jejich slitin, případně pro součásti z nekovových materiálů [8, 17].

Povlaky z práškových plastů disponují celou řadou užitečných vlastností jako např.:

- otěruvzdornost
- odolnost vůči vyšším teplotám
- barevná stálost
- antibakteriálnost
- nesmáčivost povrchu
- definovaný elektrický odpor či vodivost
- fasádní kvalita
- neměnnost vlastností i v extrémních podmínkách atmosféry [17]

Technologie povlakování práškovými plasty můžeme rozdělit do dvou skupin:

- Technologie s předeříváním
- Technologie nanášení v elektrickém poli vysokého napětí [18]

Technologie s předeříváním

Nejvýznamnější technologií této skupiny je fluidní (vířivé) nanášení. Fluidním nanášením se vytvářejí povlaky o tloušťce do 1 mm, využití prášku je 100%, doba povlakování je do 10 s, technologie je méně investičně náročná, velikost zboží je omezena ohřívací pecí a fluidní vanou [18].

Postupuje se tak, že předmět se ohřeje nad teplotu tání práškové hmoty a ponoří se do prášku, který je provzdušňován a chová se jako kapalina. Prášek se k povrchu předmětu přitaví, rozlije se a vytvoří souvislý povlak. V případě termoplastů se předmět s povlakem nechá vychladnout, u reaktoplastů se předmět s povlakem dále ohřívá, aby mohla proběhnout síťovací reakce – známá jako vytvrzení [18].

Na principu využití naakumulovaného tepla v předmětu jsou založeny i další technologie a to:

- naprašování
- vysypávání
- obalování [18]

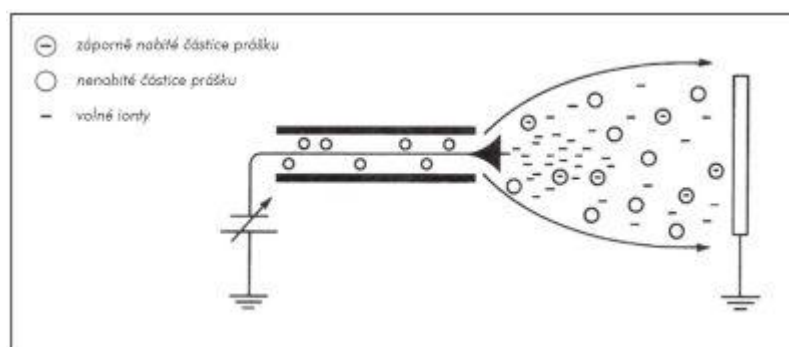
Technologie nanášení práškových plastů v elektrickém poli vysokého napětí

Nejvýznamnější je technologie stříkání. Na zavěšený uzemněný předmět se stříká prášek, jehož jednotlivé částice ve stříkací pistoli získají opačný náboj, takže jsou k předmětu přitahovány. Částice tak k předmětu přilnou vlivem elektrostatických, resp. elektrokinetických sil a vytvoří povlak, který se následně v peci roztaví. Další zpracování je obdobné jako u fluidního způsobu nanášení a závisí na tom, zda jde o termoplast či reaktoplast [18].

U povlaků z práškových plastů velmi významně ovlivňuje kvalitu povlaku předběžná úprava povrchu. U kapalného nátěrového systému se mastnoty mohou částečně rozpustit v organickém rozpouštědle. Povlak z práškového plastu špatně přilne k nedokonale odmaštěnému povrchu. Nejvhodnější povrchovou úpravou je po odmaštění, případně moření, kvalitní konverzní vrstva (fosfátování, chromátování) [18].

Elektrostatické nabíjení

Částice prášku jsou nabíjeny ve stříkací pistoli elektrostaticky v elektrickém poli vysokého napětí ($70 \div 100$ kV) tak, že na hrotu elektrody, která je umístěna v pistoli a je spojena se zdrojem vysokého napětí, dojde ke koronovému výboji. Vysoké napětí soustředěné na trysce stříkací pistole způsobuje ionizaci vzduchu procházejícího pistolí. Při průchodu prášku tímto ionizovaným vzduchem se volné ionty přichytí na určitém počtu částic prášku, čímž se na částicích vytvoří záporný náboj. Cílem je dosáhnout co největšího počtu nabitých částic prášku – viz Obr. 3.38 [17, 18].



Obr. 3.38: Schéma principu elektrostatického nabíjení práškového plastu [17].

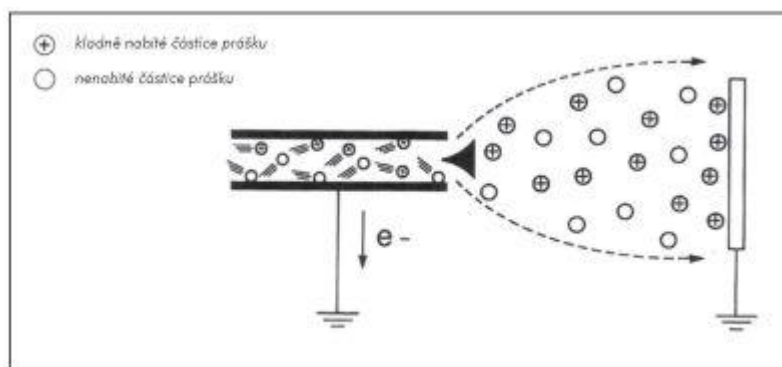
Volné ionty jsou malé a mnohem pohyblivější než částice prášku. Přebytečné volné ionty se rychle pohybují směrem k předmětu a současně na něj přenášejí velké množství záporných nábojů. Množství volných iontů lze snadno regulovat hodnotou napětí. Příliš vysoké napětí způsobuje nadbytečný přísun volných iontů, což ztěžuje získání dobré povrchové úpravy [17, 18].

Tribostatické nabíjení

Částice prášku se tribostatickým efektem (frikčně, elektrokineticky) nabíjejí díky tomu, že se při rychlém pohybu otírají o speciální druh izolantu (obvykle PTFE), kterým je vyložen válec stříkací pistole – viz Obr. 3.39 [17].

U tribostatického nabíjení není přítomno vysoké napětí, které by mohlo generovat volné ionty nebo vytvářet elektrická pole. Optimálního výkonu lze dosáhnout regulací průtoku vzduchu pistolí, resp. poměru množství prášku a vzduchu [17].

Tento způsob je vhodný pouze pro některé druhy prášků (epoxidové), ale má řadu výhod (snadná údržba, výhodné aplikace při povlakování izolantů, snadnější dosažení větších tloušťek), pro které nachází stále širšího uplatnění [18].



Obr. 3.39: Schéma principu tribostatického nabíjení práškového plastu [17].

Podmínky pro úspěšné nanášení a vytváření povlaků:

- **Kvalita stlačeného vzduchu**

Do stříkacího zařízení se smí přivádět jen čistý a suchý stlačený vzduch. Kvalita stlačeného vzduchu může změnit proces nabíjení a transportní vlastnosti prášku. Nečistý stlačený vzduch může také způsobovat vzhledové vady na povlaku [17].

Tlakový vzduch nesmí obsahovat olej, vodu a musí být co nejsušší. Maximální přípustná koncentrace vody ve stlačeném vzduchu je $1,3 \text{ g/m}^3$, oleje $0,1 \text{ g/m}^3$ [17].

- **Kvalita vzduchu v lakovně**

Pro účinnost stříkání má velký význam relativní vlhkost pracovního prostředí (ideální je mezi $45 \div 50 \%$). Regulovanou vlhkostí lze získat rychlejší a rovnoměrnější vytváření povlaků. Zvláště důležitá je vyšší hodnota vlhkosti při stříkání další vrstvy [17].

- **Kvalita práškového plastu**

Vlhkost prášku nesmí být vyšší než cca $0,4 \%$. Teplota skelného přechodu by neměla být nižší než cca 50°C . Práškový plast má obsahovat maximální podíl částic o velikosti $35 \div 40 \mu\text{m}$. Podíl částic menších než $10 \mu\text{m}$ by neměl překročit 10% a prášek nesmí obsahovat částice větších rozměrů. Rozdíl ve velikosti částic má být co nejmenší [17].

- **Dobré uzemnění předmětu**

Při elektrostatickém nanášení prášku se na předmět přenáší velké množství záporného náboje. Nemůže – li být tento velký přebytek elektronů účinně odveden dostatečným uzemněním, vytvoří se rychle na povlakovaném povrchu silný záporný náboj, který pak odpuzuje záporně nabitě částice prášku [17].

Při tribostatickém nanášení vychází ze stříkací pistole prášek s kladným nábojem, to znamená, že má deficit elektronů. Pokud není předmět dostatečně uzemněn, vytvoří se na povlakovaném povrchu silný kladný náboj, který pak odpuzuje kladně nabitý prášek opouštějící pistolí. Důsledkem je pak nedostatečná tloušťka vrstvy prášku [17].

Pro zajištění bezpečnosti provozu je naprosto nezbytné dokonale a účinně uzemnit stříkací zařízení a stříkací kabiny. U tribostatického nanášení je dobré uzemnění stříkací pistole zásadní podmínkou pro úspěšné nanášení. Jelikož prášek získává kladný náboj, je třeba uvolněné elektrony odvádět do země. Bez účinného uzemnění stříkací pistole by se záporný náboj hromadil a prášek by procházel pistolí bez nabití [17].

Tepelné zpracování práškových plastů

Stříkáním lze nanášet povlaky o tloušťce pod 100 μm , povlaky jsou rovnoměrné, dekorativní, tepelné zpracování je obvykle do 200°C po dobu 10 až 20 minut, lze povlakovat tenkostěnné předměty i výrobky o větších tloušťkách, velikost zboží je však omezena velikostí stříkací kabiny a peci (suškou) pro tepelné zpracování [18].

Teplotu a především čas tepelného zpracování je nutno volit s ohledem na tloušťku materiálu, jeho tepelnou vodivost a tvar zboží. Na kvalitním tepelném zpracování závisí přilnavost povlaků i jejich další vlastnosti [17].

Velmi záleží též na průběhu nárůstu teploty vypalovaného zboží. Nedostatečná výkonnost pece je příčinou zhoršení kvality povlaku projevující – se v rozdílnosti kvality povrchů. Rozdílnost (lesku, matu, drsnosti) závisí pak i na způsobu zavěšení a množství zboží. Velmi důležité je přímé proměřování teplot zboží, neboť nelze pouze spoléhat na hodnoty odečtené na ovládání peci [17].

Výhody povlaků z práškových plastů v porovnání s klasickými povlaky z nátěrových hmot jsou především tyto:

- úspora energií
- ochrana životního prostředí (úspora ředidel)
- úspora času (kvalita jednvrstvého povlaku z prášku odpovídá kvalitě nejméně dvouvrstvého kapalného nátěrového systému)
- vysoká využitelnost materiálu
- bezpečnost provozu (menší nebezpečí při přípravě a skladování)
- úspora pracovního prostoru (možnost automatizace)
- úspory materiálu a surovin (vysoká chemická a korozní odolnost)
- lepší krytí nerovností povrchu
- vysoká kvalita povlaku
- snadnost likvidace odpadů [18]

Potřebné zařízení a materiál:

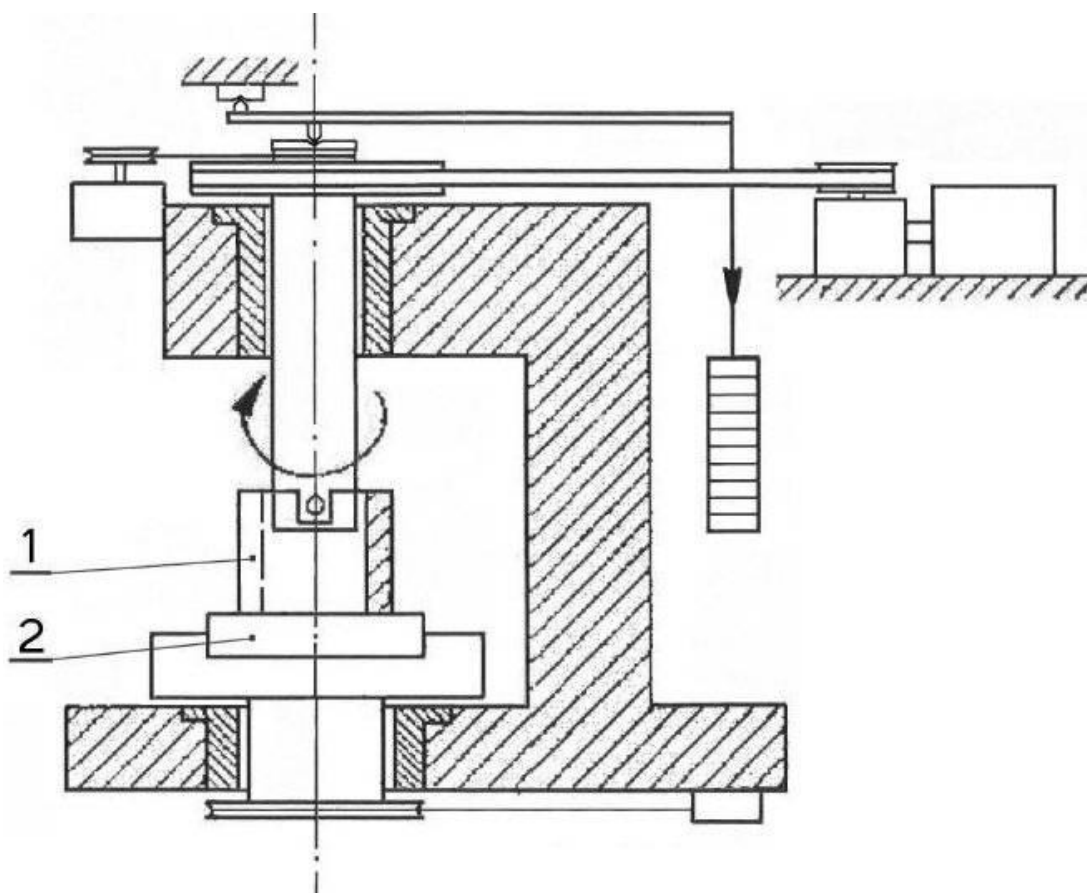
- stříkací pracoviště pro nanášení práškových plastů s příslušenstvím
- práškové plasty [18]

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 METODICKÁ ČÁST EXPERIMENTU

4.1.1 Experimentální materiál

Vzhledem k časovým možnostem byly pro experimentální studium vybrány pouze tři typy povlaků, které ale z hlediska technologie vytváření a vlastností se významně liší. Jmenovitě to byly povlaky typu DLC (tedy amorfni směs grafitu a uhlíku, s vazbou podobnou diamantu), XYLAN 1010 (což je organický tepelně vytvrditelný povlak na bázi PTFE) a představitel fosfátových povlaků, jmenovitě Fe-Mn fosfát. Všechny tři typy povlaků byly nanášeny na běžnou ložiskovou ocel 14 209, ve stavu po standardním tepelném zpracování, (tedy kalení a nízkoteplotním popouštění). Přípravu povlaků zajistila pražská fy SVÚM a.s. Povlak XYLAN 1010 byl nanášen přímo ve SVÚM a.s., zbylé dva povlaky byly nanášeny firmou Hef-Durferril. Fy SVÚM také na vzorcích realizovala tribologickou zkoušku na jejich zadíracím tribometru, jehož schéma je na Obr. 4.1. Při zkoušce jsou do tribometru upnuty dva vzorky, 1 a 2 (viz Obr. 4.1). Horní vzorek (z ložiskové oceli 14 109) se otáčí kolem své osy konstantní rychlostí $0,028 \text{ m.s}^{-1}$ a je přitlačován na dolní nehybný vzorek (což je zkoušený vzorek s naneseným povlakem). Třecí tlak je při zkoušce postupně zvyšován ve 13-ti nastavitelných krocích, a to od 0,362 MPa do 9,834 MPa. Tribometr zaznamenává průměrný třecí moment a koeficient tření pro jednotlivé hodnoty třecího tlaku. Zkoušky byly prováděny jednak za sucha, jednak v olejové lázni (ložiskový olej J4), tedy za podmínek, které se patrně více blíží provozním.



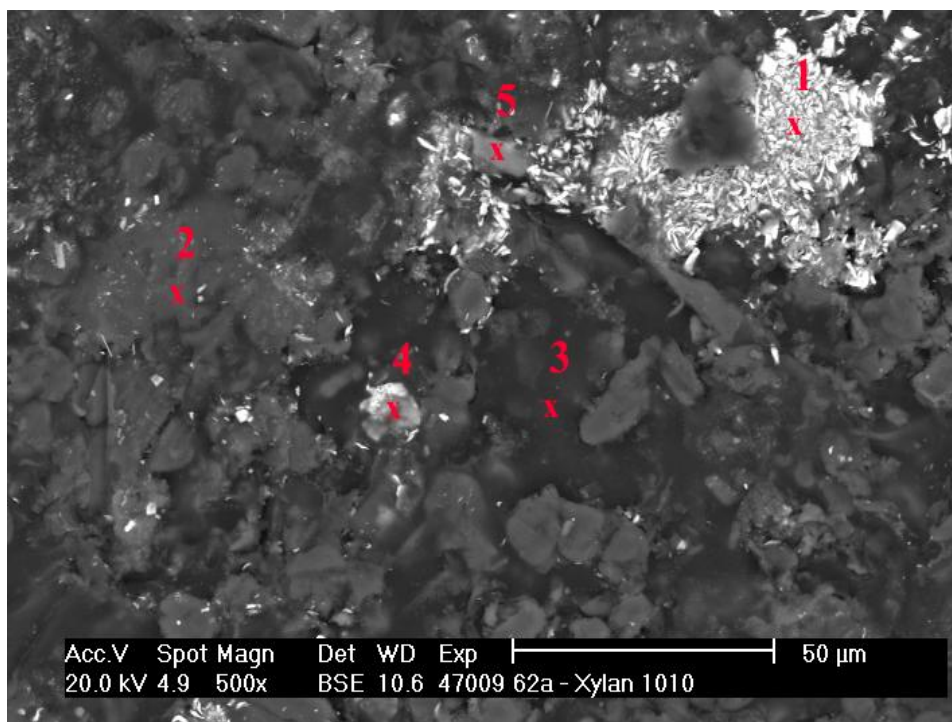
Obr. 4.1: Schéma zadíracího tribometru

4.1.2 Použité přístroje

Na vzorcích po tribologickém testu byla analyzována výchozí mikrostruktura povlaku (tedy v místě neovlivněném zkouškou) a v dráze vytvořené tribometrem. Dále bylo naší snahou zjistit tloušťku naneseného povlaku, a to opět jednak tloušťku výchozí, tedy mimo opotřeбенou vrstvu a zbytkovou tloušťku v místě opotřeбенí. Dále byla také zkoumána rovnoměrnost a soudržnost povlaku. Za tím účelem byly vzorky po zkoušce na tribometru rozřezány na zařízení Discotom 5 fy Struers (za intenzivního chlazení) řezy kolmými k povrchu povlaku. Takto připravené řezy byly poté zalisovány do pryskyřice Struers pro přípravu metalografického výbrusu. Ještě předtím ale byla na povlak ve vakuové napařovačce JEOL-JEE-4B napařena vrstvička Au-Pd, aby se usnadnila identifikace povrchové vrstvičky. Metalografické výbrusy řezů byly připraveny broušením za mokra, leštěním diamantovými pastami a chemicko-mechanickým doleštěním pomocí suspence OP-S (Collodial silica suspension for final polishing).

4.1.3 Experimentální metodiky

Vzhledem k potřebě vysokého rozlišení, očekávané malé tloušťce povlaků, jejich reliéfnosti a v případě polymerního povlaku i nízké odrazivosti světelných fotonů, nebylo vhodné (možné) použít světelnou mikroskopii. Pro studium povrchu povlaků i řezů povlaky byla proto použita rastrovací elektronová mikroskopie (REM), na analytickém REM Philips XL-30. K zobrazení bylo podle potřeby využito buď sekundárních elektronů (SEI – viz Obr. 4.2), nebo elektronů zpětně odražených (BEI), které lépe zviditelňují rozdíly ve složení jednotlivých fází na základě rozdílného průměrného atomového čísla Z. V případě polymerního povlaku XYLAN bylo navíc použito jedno z analytických příslušenství REM, energiově-dispersní spektrometr EDAX k získání chemické informace. Provedené experimenty měly nejen ověřit vlastnosti povlaků, ale také zjistit vhodnost použité metodiky.



Obr. 4.2: SEI – zobrazení pomocí sekundárních elektronů

4.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

4.2.1 Tribologie povlaků

V Tab. 4.1 jsou shrnuty výsledky tribologické zkoušky všech tří studovaných povlaků, získané při nejvyšším třecím tlaku (9,834 MPa) za sucha i v oleji. U vzorku fosfátovaného došlo bohužel při měření za sucha k poruše, takže hodnoty nejsou známy. Za zajímavý poznatek lze označit výrazně lepší hodnotu koeficientu tření při zkoušce za sucha (oproti zkoušce v oleji) u vzorku XYLAN 1010. Patrně je to obecné zjištění i pro jiné typy polymerních povlaků. Obdobné výsledky získali totiž např. Z. Spotz a j. [19] u povlaků typu ISOFLON a PTFE + Niborit.

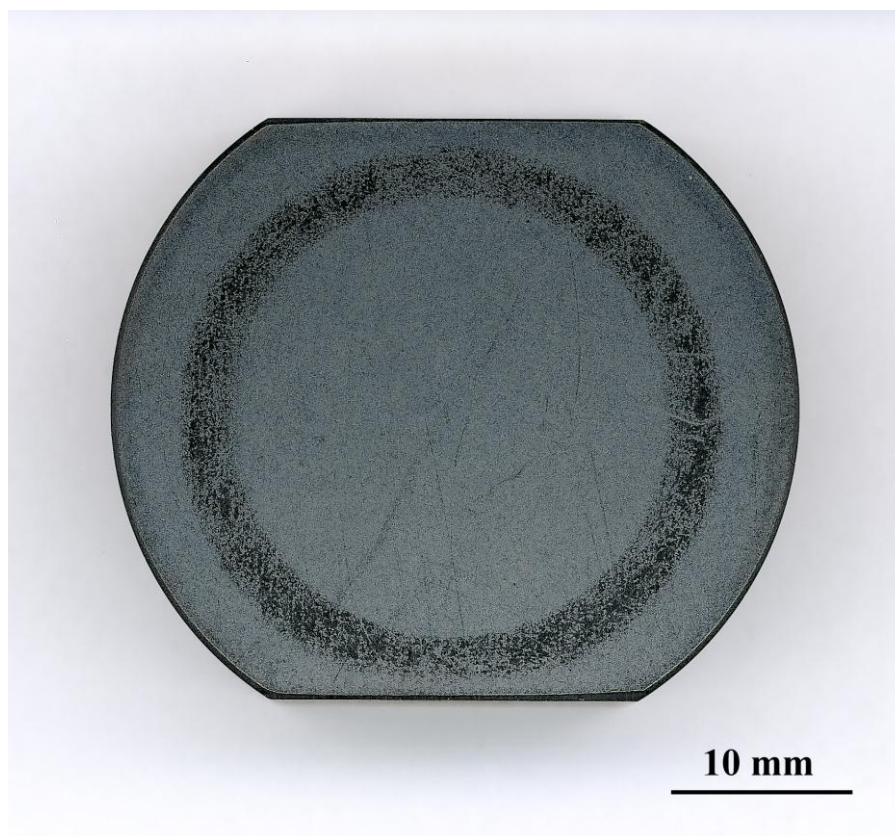
	Za sucha		V oleji	
	Průměrný třecí moment (Nm)	Koeficient tření (-)	Průměrný třecí moment (Nm)	Koeficient tření (-)
XYLAN 1010	1,832	0,054	4,201	0,124
Fe-Mn	-	-	3,50	0,103
DLC	11,539	0,430	2,746	0,081

Tab. 4.1: Třecí momenty a koeficienty tření při nejvyšším třecím tlaku (9,834 MPa)

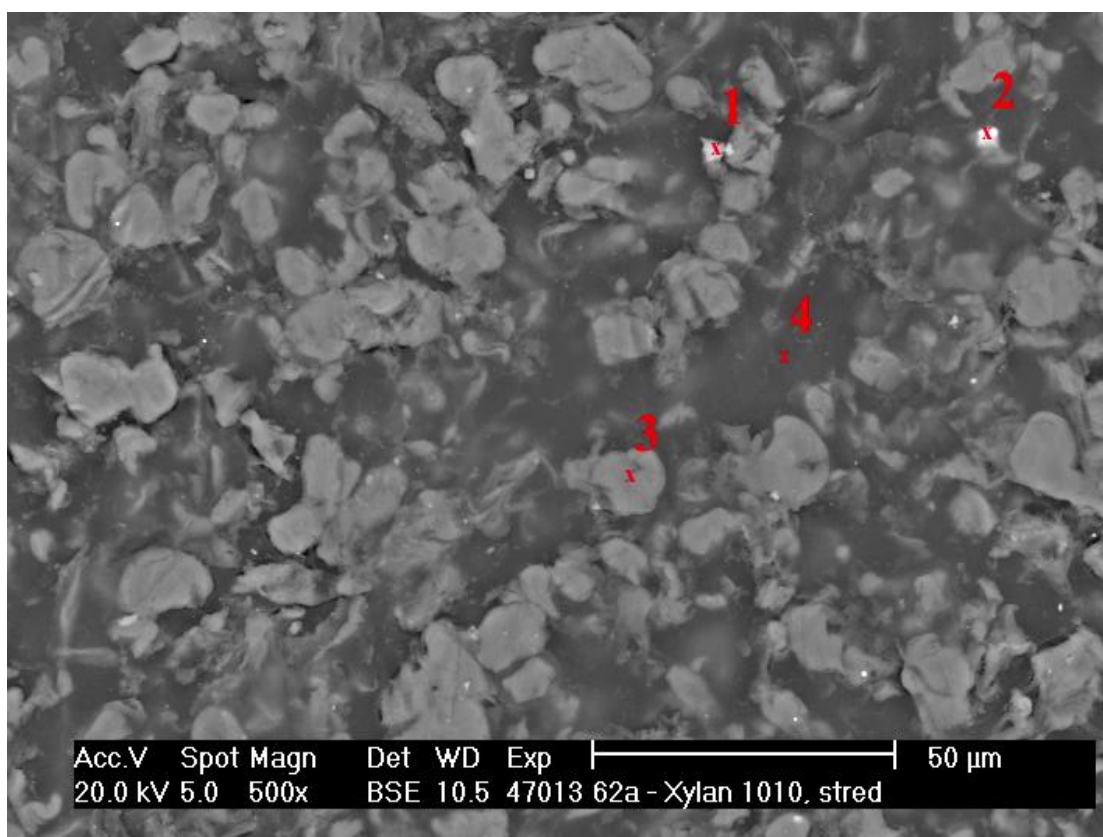
4.2.2 Vzorek XYLAN 1010

Makrosnímek vzorku po tribologické zkoušce (viz Obr. 4.3) dokládá jednak tvar a rozměry vzorku, jednak je z něj patrna dráha, po které docházelo při tribologickém testu ke kontaktu obou vzorků. Analýza jakosti povlaku (jeho povrchu a v příčném řezu jeho přilnavost, rovnoměrnost a tloušťka) byla prováděna přibližně uprostřed vzorku a uprostřed tmavého mezikruží (kontaktní plochy). Ze snímku neopotřebované části povlaku (viz Obr. 4.4a) je patrná strukturní heterogenita povlaku. Analýzou pomocí EDS bylo zjištěno, že světlejší části povlaku obsahují prakticky pouze uhlík a fosfor v poměru cca 1:2, zatímco v tmavé fázi je fluor prakticky zcela nahrazen kyslíkem. V kontaktní (opotřebované) části povlaku je struktura výrazně odlišná. Vizuálně se snížil podíl světlejší fáze (viz Obr. 4.4b). Strukturní heterogenitu si vysvětlujeme technologií přípravy povlaku (stříkání výchozí práškové suroviny vzduchovou pistolí). Tloušťka povlaku, zjišťovaná na příčném řezu se pohybuje v rozmezí 4,8 – 17 μm v místě bez opotřebení (viz Obr. 4.5a) a 3,2 – 12,6 μm v místě opotřebení (viz Obr. 4.5b). Velký rozptyl hodnot je výsledkem velké drsnosti substrátu, která je určitě mnohem vyšší, než jaká je obvyklá u funkčních ploch ložiskových kroužků. Vysoká drsnost byla patrně zvolena záměrně pro zvýšení přilnavosti povlaku.

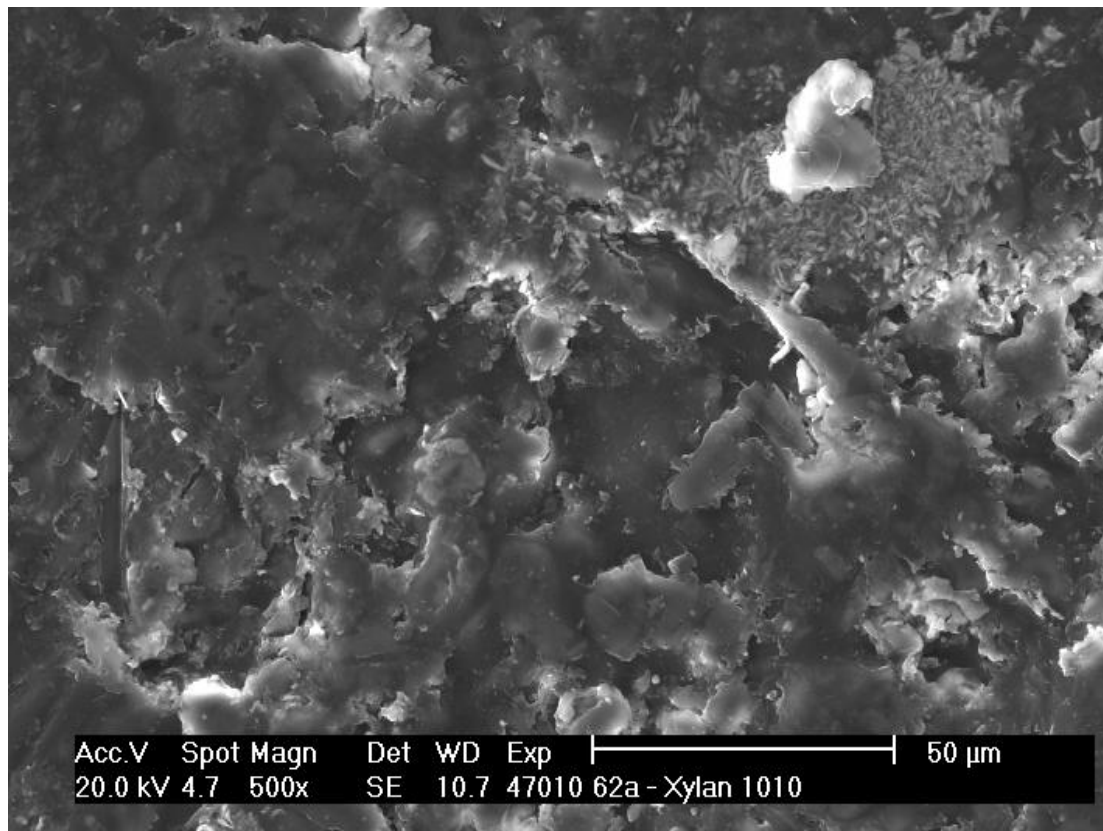
Vzorek XYLAN 1010



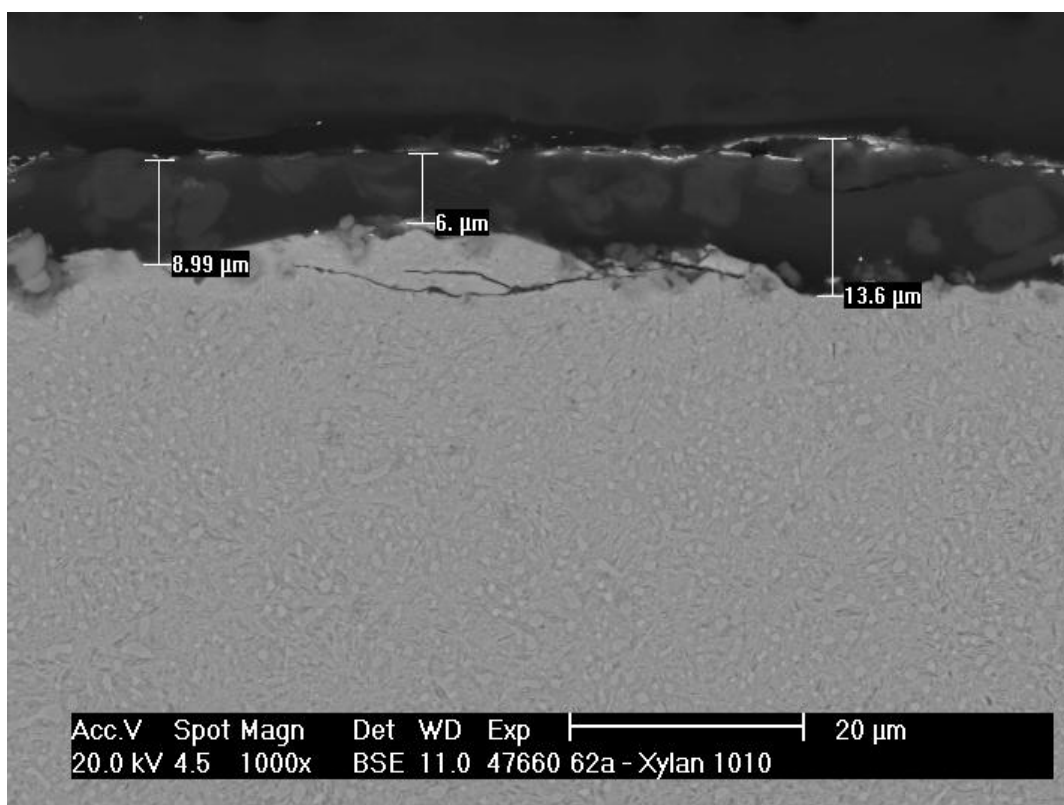
Obr. 4.3: Vzhled povrchu vzorku XYLAN 1010 po tribologické zkoušce



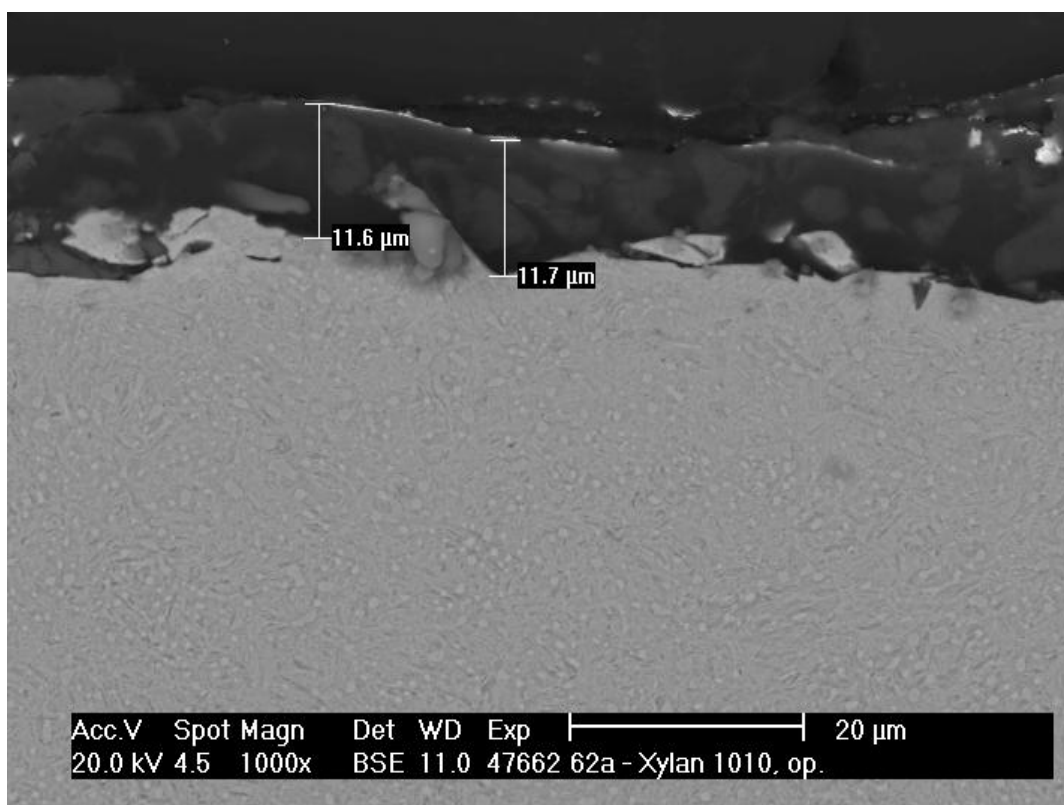
Obr. 4.4a: Vzhled povrchu vzorku XYLAN 1010 v místě bez opotřebení



Obr. 4.4b: Vzhled povrchu vzorku XYLAN 1010 v místě opotřebení



Obr. 4.5a: Tloušťka povlaku v příčném řezu na vzorku XYLAN 1010 v místě bez opotřebení

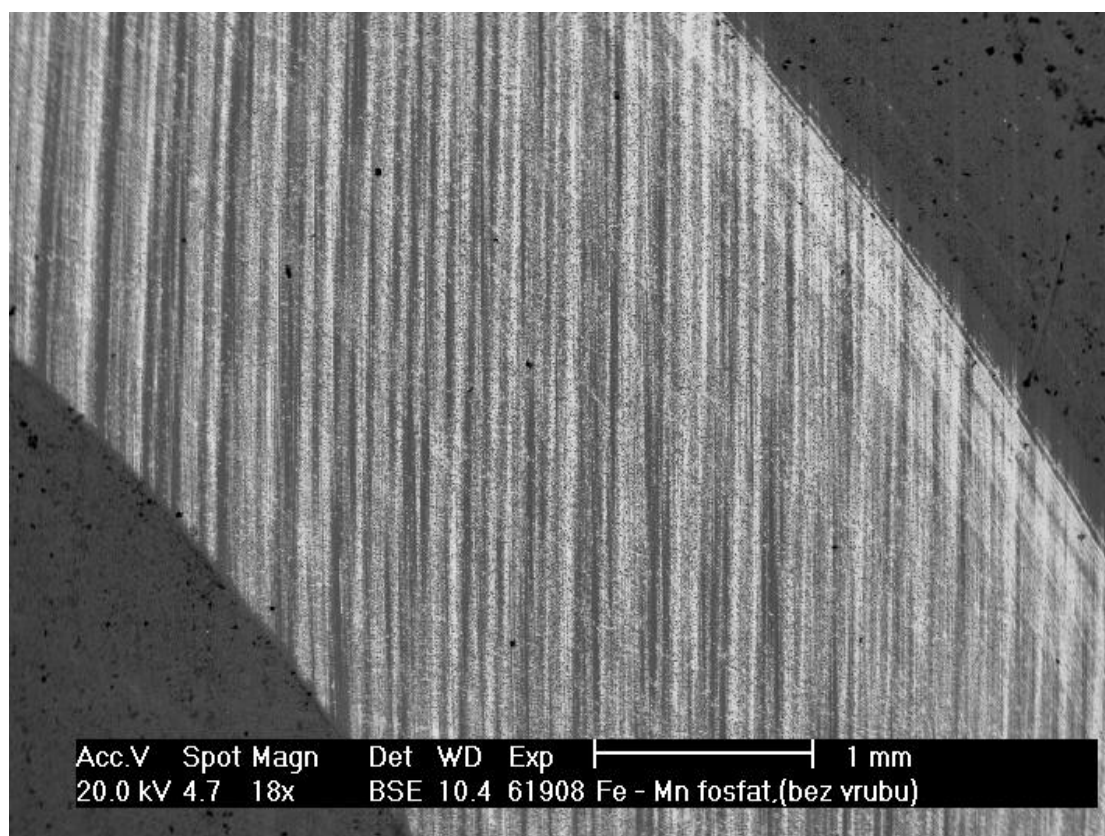


Obr. 4.5b: Tloušťka povlaku v příčném řezu na vzorku XYLAN 1010 v místě opotřebení

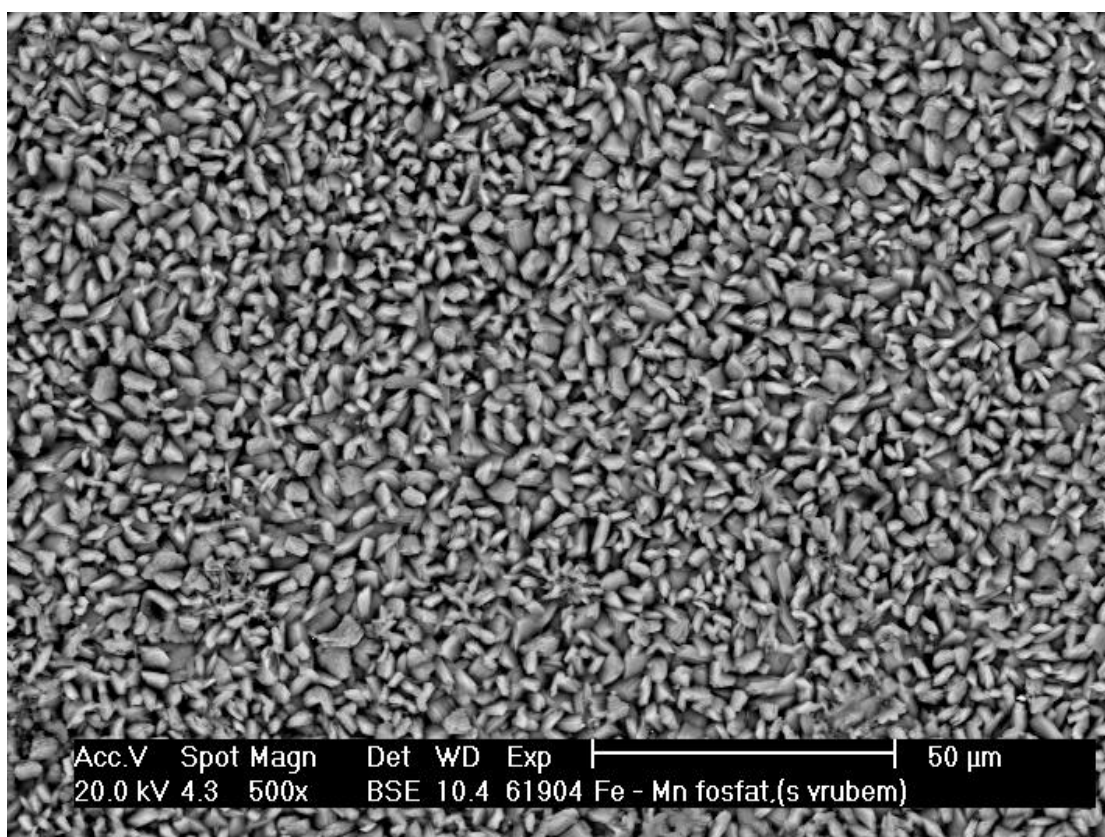
4.2.3 Vzorek Fe-Mn fosfátu

Také na tomto povlaku byla dráha po opotřebení na tribometru velmi dobře patrná (viz Obr. 4.6). Kvalita povlaku byla velmi dobrá, jak ukazují snímky typického vzhledu fosfátovaných povlaků (viz Obr. 4.7a, b). V třecí dráze se ale vzhled struktury výrazně změnil (viz Obr. 4.8). Oproti předchozímu typu povlaku je ale jeho tloušťka, jak ukazují snímky příčných výbrusů (viz Obr. 4.9a z místa mimo dráhu testu a Obr. 4.9b v místě opotřebení) výrazně menší. V neopotřebené části je to cca 2,5 μm , v dráze po tribologickém testu ale pouze 0,7 μm (tedy 700 nm).

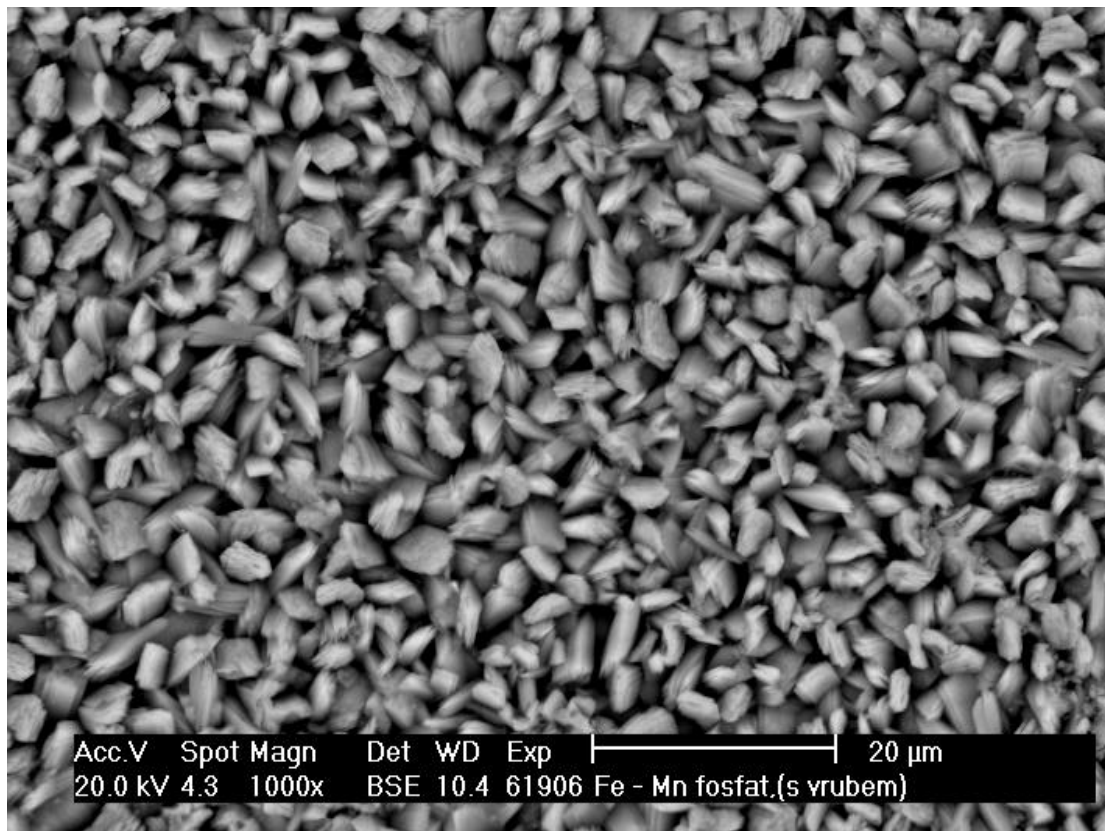
Vzorek Fe-Mn fosfátu



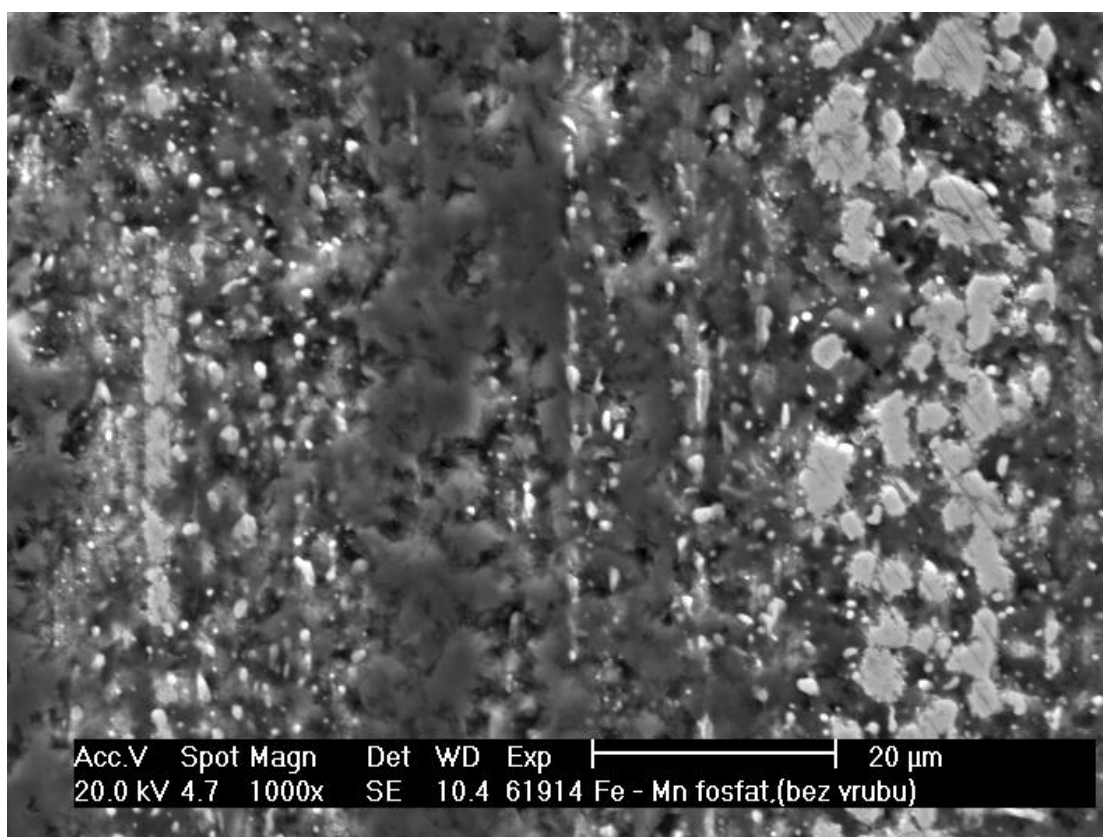
Obr. 4.6: Vzhled povrchu vzorku Fe-Mn fosfát po tribologické zkoušce



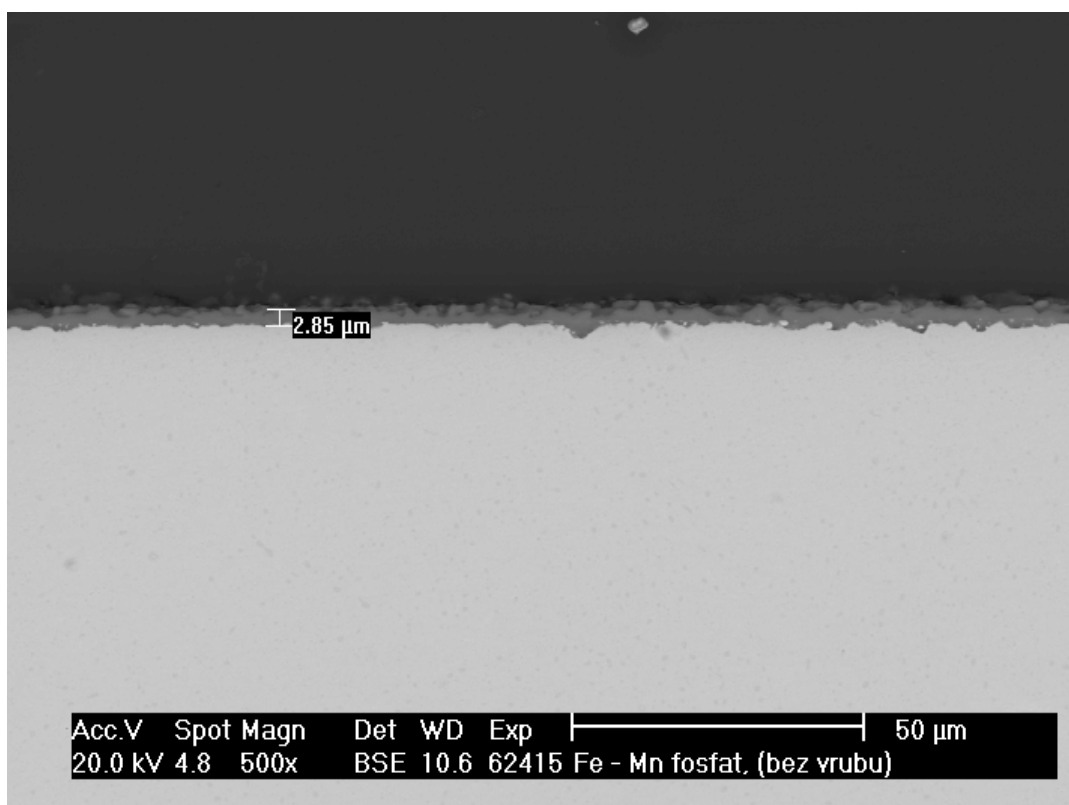
Obr. 4.7a: Vzhled povrchu vzorku Fe-Mn fosfát v místě bez opotřebení



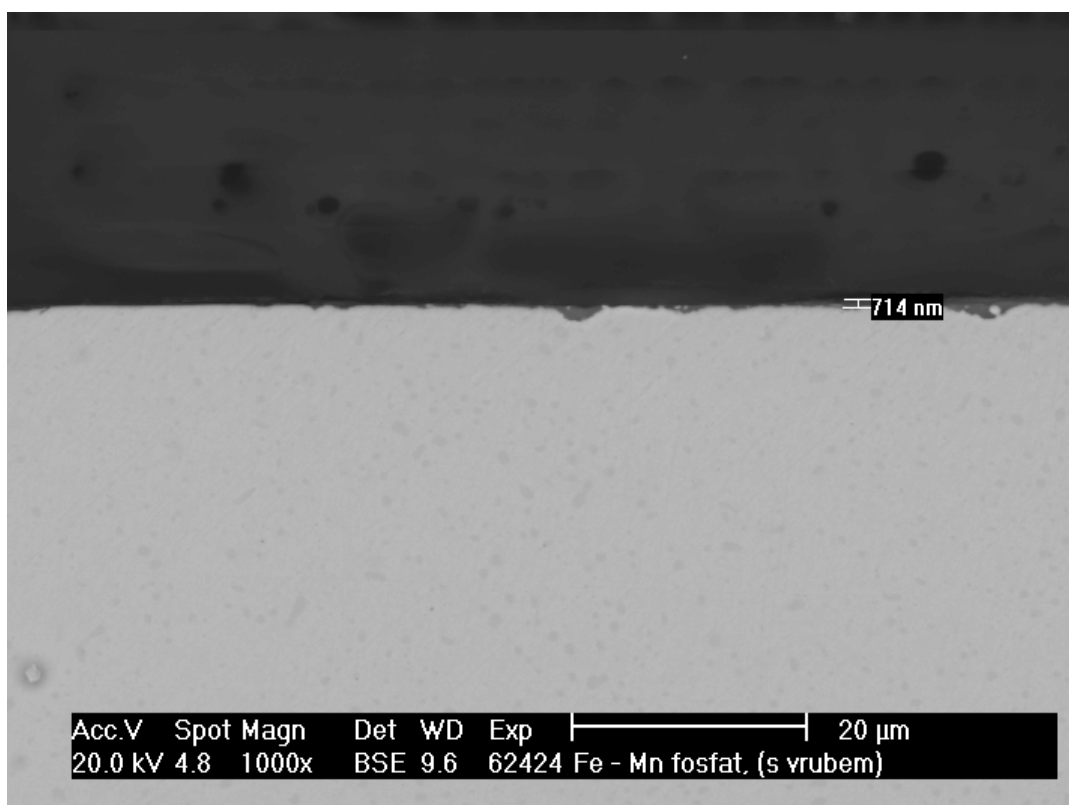
Obr. 4.7b: Vzhled povrchu vzorku Fe-Mn fosfát v místě bez opotřebení



Obr. 4.8: Vzhled povrchu vzorku Fe-Mn fosfát v místě opotřebení



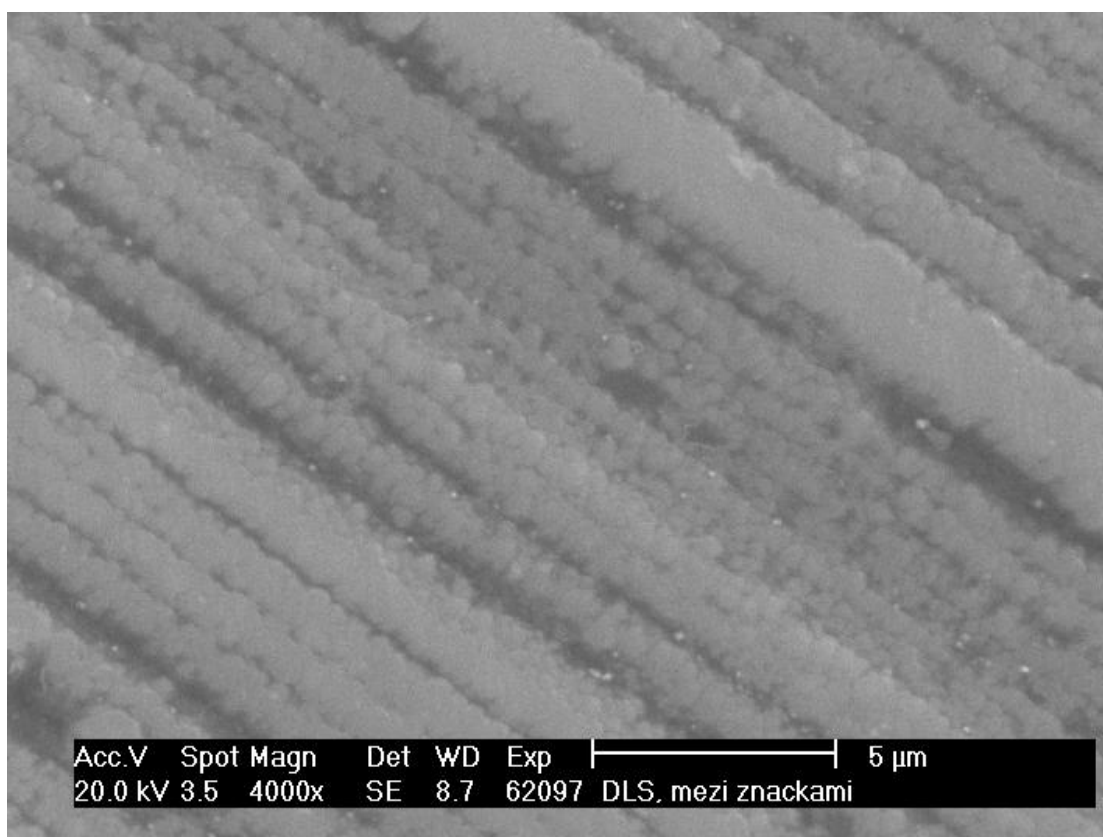
Obr. 4.9a: Tloušťka povlaku v příčném řezu na vzorku Fe-Mn fosfát v místě bez opotřebení



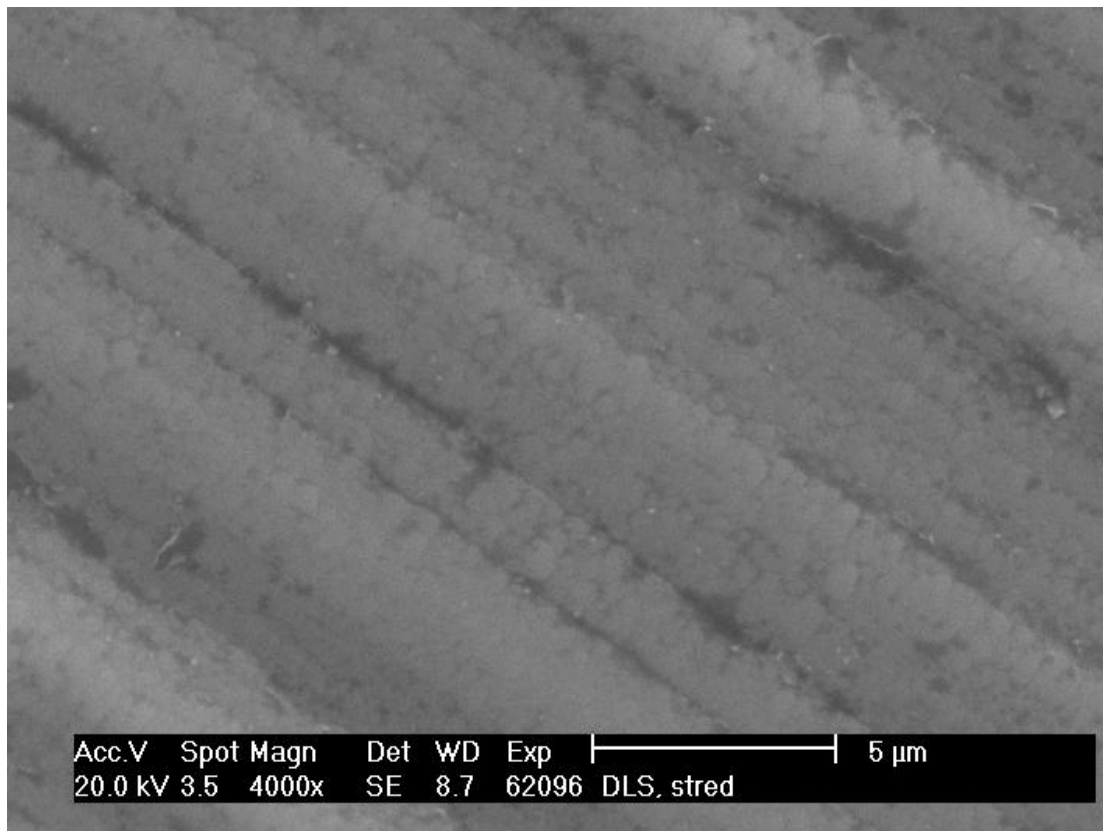
Obr. 4.9b: Tloušťka povlaku v příčném řezu na vzorku Fe-Mn fosfát v místě opotřebení

4.2.4 Vzorek povlaku DLC

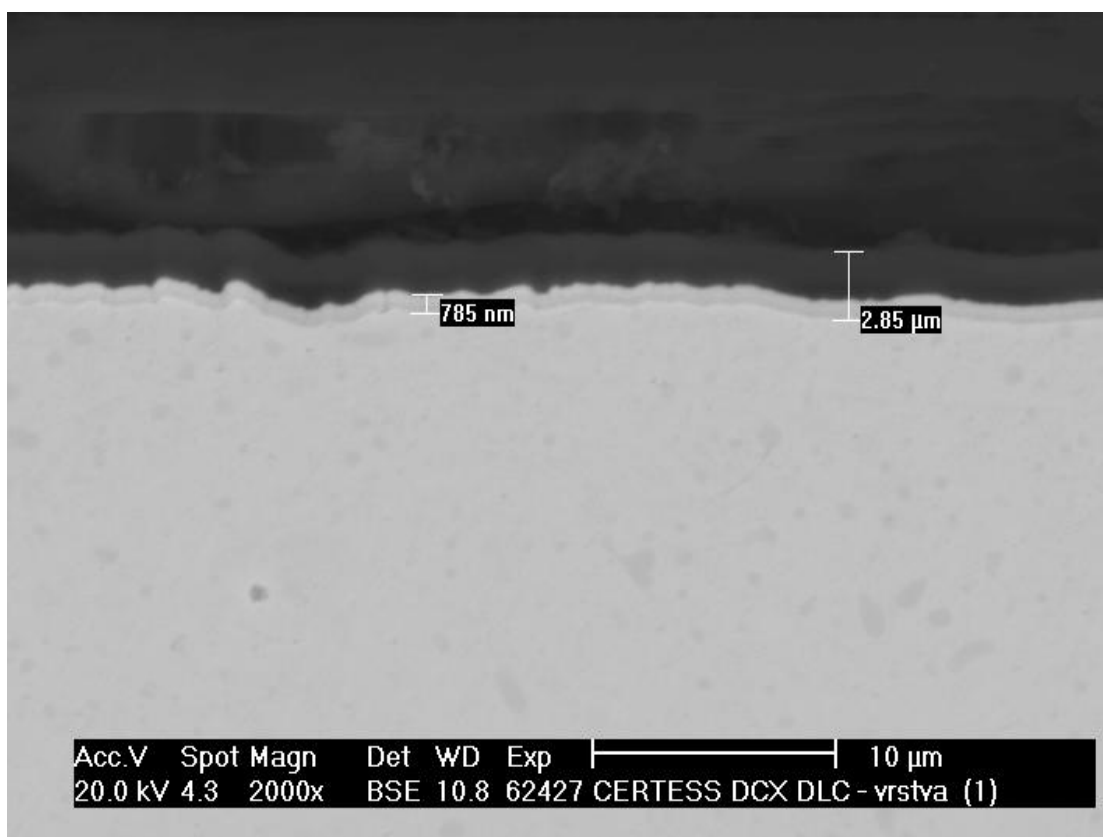
Na vzorku DLC byla dráha po zkoušce na tribometru téměř nezjistitelná. Bylo proto třeba její polohu zjistit odměřením a pro potřebu analýzy označit ryskami na vzorku. Až při pozorování na REM bylo možné nalézt nepatrné známky opotřebení, a to již při poměrně malém zvětšení – viz Obr. 4.10a (povrch mimo dráhu testu) a Obr. 4.10b (povrch v dráze testu). Analýzou příčného výbrusu bylo zjištěno, že povlak byl vytvořen jako dvouvrstvý. Pod vlastním DLC povlakem, který má tloušťku cca 3 μm , se ještě nachází tenká mezivrstva (700 – 800 nm), ve které byly EDS analýzou zjištěny jako dominantní prvky křemík a chrom. Snímky příčných řezů – viz Obr. 4.11a (neopotřeбенá část) a Obr. 4.11b (v místě po opotřebení) tyto skutečnosti dobře ilustrují (samozřejmě s výjimkou chemické analýzy). Tloušťka povlaku se, jak z uvedených snímků vyplývá, prakticky nezměnila.



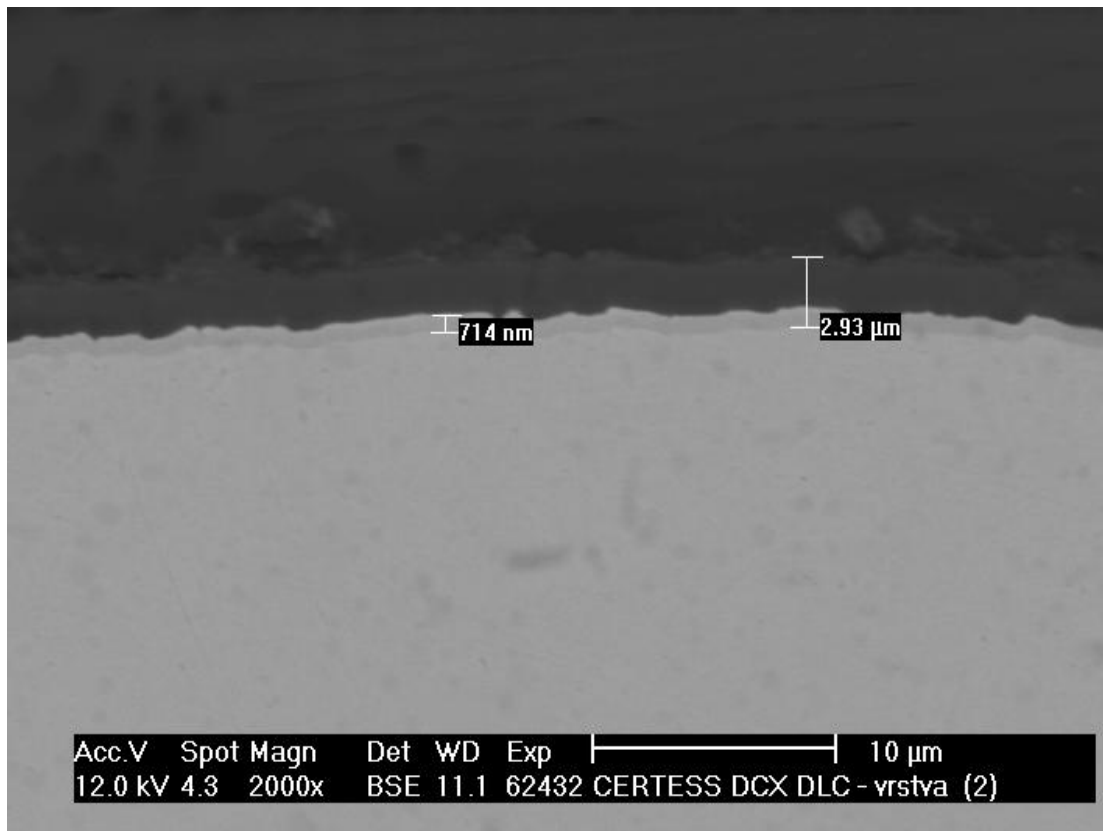
Obr. 4.10a: Vzhled povrchu vzorku s povlakem DLC v místě bez opotřebení



Obr. 4.10b: Vzhled povrchu vzorku s povlakem DLC v místě opotřebení



Obr. 4.11a: Tloušťka povlaku DLC v příčném řezu v místě bez opotřebení



Obr. 4.11b: Tloušťka povlaku DLC v příčném řezu v místě opotřebení

5. ZÁVĚRY

V práci jsou shrnuty základní informace o některých typech povlaků, event. vrstev, které přichází v úvahu jako možné zdroje zvýšení užitných vlastností valivých ložisek. Na základě výsledků tribologických zkoušek a metalografického hodnocení lze doporučit využití popsaných metod pro povrchové úpravy valivých ložisek.

Ze zkoušených typů povlaků podle očekávání vykázal nejlepší vlastnosti (měřeno velikostí opotřebení) povlak DLC. Také povlak Fe-Mn se ukazuje jako velmi kvalitní.

Z hlediska vhodnosti použitých experimentálních metodik lze konstatovat, že rastrovací elektronová mikroskopie s případným využitím EDS umožňuje na velmi dobré úrovni posoudit strukturu použitých povlaků (morfologii i chemické složení), včetně úrovně jejich homogenity. Analýza příčných výbrusů pak je vhodnou metodou k analýze tloušťek povlaků před i po opotřebení, jejich homogenity, přilnavosti aj.

Výsledky projektu budou přínosem pro posouzení možných aplikací vybraných typů povrchových úprav na ložiskové oceli. Dále lze doporučit pokračovat ve výzkumu a vývoji těchto povrchových úprav, například s ohledem na jiné vstupní podmínky popsaných procesů.

6. PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CVD	Chemical Vapour Deposition
PVD	Physical Vapour Deposition
DLC	Diamond – Like Carbon
PTFE	Polytetrafluorethylen
CHTZ	Chemicko – tepelné zpracování
PÚ	Povrchové úpravy
REM	Rastrovací elektronová mikroskopie
EDS	Energiově – dispersní spektrometr

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SPOTZ, Z. *Zvýšení životnosti ložisek použitím povlaků na bázi DLC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 26 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.
- [2] SVOBODA, P., BRANDEJS, J., PROKEŠ, F. *Základy konstruování*. 2. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003, 200 s. ISBN 80-7204-306-4.
- [3] KLIMČÁKOVÁ, K. *Výzkum a vývoj povrchových úprav ložiskových ocelí metodou iontové nitridace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Doležal, Ph.D.
- [4] Model tření jako nástroj pro konstruktéry. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, č. 11, s. 42. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/model-treni-jako-nastroj-pro-konstruktery>>.
- [5] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. 3. doplněné vyd. Praha: Pedagogické nakladatelství Scientia, s.r.o., 2000, 985 s. ISBN 80-7183-164-6.
- [6] ZKL Group [on-line]. Dostupné z: <<http://www.zkl.cz/>>.
- [7] ŠVEJCAR, J. Volba otěruvzdorných vrstev a povlaků. *SURFACE ENGINEERING*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 92 s.
- [8] HRUBÝ, V., TULKA, J., KADLEC, J. *Povrchové technologie*. 1. vyd. Brno: Vojenská akademie, 1995, 120 s.
- [9] ZINDULKA, O. et al., *Vývoj a praktické aspekty povlakování řezných nástrojů technologií PVD*. Dostupné na: <<http://www.shm-cz.cz/>>.
- [10] Chemická depozice z plynné fáze [on-line]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Chemick%C3%A1_depozice_z_plynn%C3%A9_f%C3%A1ze&oldid=5007789>.
- [11] VALTER, J., VYSKOČIL, J. Plazmové povlakování. *Strojárstvo*. 2000, č. 9, s. 82. Dostupné z: <<http://www.strojarstvo.sk/inc/index.php?ln=SK&tl=3&tpl=archiv.php&ids=2&cislo=9/2000&idclan=70>>.
- [12] PODANÝ, K. *Přednáška 6SM pro studenty*. Strojírenská metrologie I – Technika měření neelektrických veličin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s.
- [13] CHOY, Kwang-Leong. Chemical vapour deposition of coatings. *Progress in Materials Science*. January 2003, Volume 48, Issue 2, Pages 57-170. Dostupné z: <<http://shell.cas.usf.edu/~phanm/Top%2025%20hottest%20papers%20in%20PMS.pdf>>.
- [14] Svět tvrdých a supertvrdých materiálů [on-line]. Dostupné z: <<http://www.shm-cz.cz/>>.
- [15] HULTMANOVÁ, A., SJÖSTRÖM, H. Uhlíkové povlaky ložisek. *MM Průmyslové spektrum*. 2002, č. 11, s. 26. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/uhlikove-povlaky-lozisek>>.
- [16] SPOTZ, Z. et al., *Výzkum možností zvýšení životnosti ložisek cestou povrchových úprav*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 8 s.

- [17] KREIBICH, V. Povlaky z práškových plastů bezchybně. *MM Průmyslové spektrum*. 2010, č. 3, s. 24. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-z-praskovych-plastu-bezchybne>>.
- [18] Technologie I., praktické cvičení Povrchové úpravy č. 2, *Povrchová úprava práškovými plasty*, 2006. 3 s.
- [19] SPOTZ, Z. et al., *Výzkum možností životnosti ložisek cestou povrchových úprav*, Sb. konference METAL 2008 (na CD ROM).