

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVRCHOVÁ ÚPRAVA KULOVÉHO ČEPU

SURFACE TREATMENT OF SPHERICAL PIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR PLÁŠIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LADISLAV ŽÁK, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Plášil

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Povrchová úprava kulového čepu

v anglickém jazyce:

Surface treatment of spherical pin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnout technologie povrchové úpravy kulového čepu a vyhodnotit jejich vliv na funkčnost a korozní odolnost.

Cíle diplomové práce:

1. Zhodnocení stávajícího stavu výroby
2. Literární studie
3. Návrh variant technologií povrchových úprav
4. Vyhodnocení navržených variant
5. Ekonomické zhodnocení a závěr

Seznam odborné literatury:

KŘÍŽ, Václav a Pavel VÁVRA. Strojírenská příručka. 1. vyd. Praha : Scientia, 1998. ISBN 80-7183-054-2. 255 s. (váz.)

MOHYLA, Miroslav. Technologie povrchových úprav kovů. VŠB-TU Ostrava, 1995. ISBN 80-7078-267-6.

SEDLÁČEK, Vladimír. Povrchy a povlaky kovů. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1992. Skripta. ISBN 80-01-00799-5.

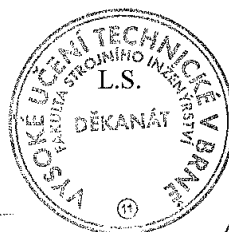
PODJUKLOVÁ, Jitka. Speciální technologie povrchových úprav I. 1. vyd. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 1994. Skripta. ISBN 80-7078-235-8.

PRŮŠEK, Jaroslav. a kol.: Hodnocení jakosti a účinnosti protikorozních ochran strojírenských výrobků. Praha: SNTL, 1985. 288 s.

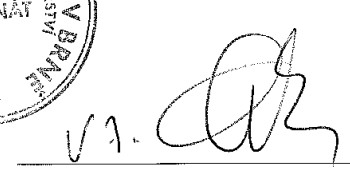
Vedoucí diplomové práce: Ing. Ladislav Žák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 22.11.2011




prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce vypracovaná v rámci magisterského navazujícího studia oboru M2I – K analyzuje možné způsoby povrchové ochrany kulového čepu a tím zvýšení jeho korozní odolnosti. Kulový čep je montovaný do několika druhů podvozkových komponentů, např. kloubů, ramen apod. Současný stav je pro výrobce nevyhovující, nedostačující korozní ochrana zvyšuje počet reklamací a to se může odrazit na množství budoucích zakázek. Vhodnou povrchovou úpravou se má docílit vyšší korozní odolnosti při zachování funkčních vlastností používaných čepů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Koroze, korozní odolnost, kulový čep, povrchová úprava

ABSTRACT

Diploma thesis is worked-up as a part of master's studies of engineering technology M2I – K, analyzing the possible methods of surface treatment of spherical pin, that increase its corrosion resistance. Spherical pin is mounted into several types of chassis components such as joints, control arms, etc. The current situation is inconvenient for manufacturers, insufficient corrosion protection increases the number of complaints and this may be reflected in the number of future orders. Via of suitable surface treatment is to achieve a higher corrosion resistance while maintaining the functional properties of pins used.

KEY WORDS

Corrosion, corrosion resistance, spherical pin, surface treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLÁŠIL, Petr. *Povrchová úprava kulového čepu*. Brno, 2012. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí diplomové práce Ing. Ladislav Žák Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Povrchová úprava kulového čepu“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Petr Plášil

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Ladislavu Žákovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále také děkuji společnosti TRW - DAS a.s. Dačice za umožnění výzkumu v prostorách společnosti, bez něhož by bylo velice obtížné získat potřebné informace. Děkuji také Ing. Michalu Tobolkovi a panu Pavlu Kadlecovi za ochotu a spolupráci při výzkumu. A neméně chci poděkovat své rodině za podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 KULOVÝ ČEP	11
1.1 Výroba čepu	11
1.2 Druhy a použití čepů	12
1.3 Analýza současného stavu výroby	14
2 LITERÁRNÍ STUDIE	16
2.1 Koroze	16
2.2 Druhy koroze	17
2.2.1 Chemická a elektrochemická koroze	17
2.2.2 Koroze dle korozního prostředí	20
2.2.3 Druhy koroze dle tvaru korozního napadení	23
2.3 Povrchové úpravy	27
2.3.1 IONIT OX	27
2.3.2 Geomet	28
2.3.3 Zn-Ni	29
2.3.4 DLC	30
2.4 Testy a testovací zařízení	32
2.4.1 Test neutrální solnou mlhou	32
2.4.2 Metalografická analýza	33
2.4.3 Mikrotvrdost	36
2.4.4 Drsnost povrchu	37

3	NÁVRH VARIANT TECHNOLOGIÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV	38
3.1	Návrh technologie „Ionitox“	39
3.2	Návrh technologie „Geomet“	39
3.3	Návrh technologie galvanického pokovení slitinou „Zn-Ni“	40
3.4	Návrh technologie nanesení povlaku „DLC“	41
4	VYHODNOCENÍ NAVRŽENÝCH VARIANT	42
4.1	Test neutrální solnou mlhou	42
4.1.1	Kulový čep bez povrchové úpravy	44
4.1.2	Ionitox	45
4.1.3	Geomet	48
4.1.4	Slitina Zinek – Nikl	51
4.1.5	Povlak DLC	55
4.2	Metalografická analýza	57
4.3	Mikrotvrdost	59
4.4	Drsnost povrchu	62
5	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	64
6	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	66

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

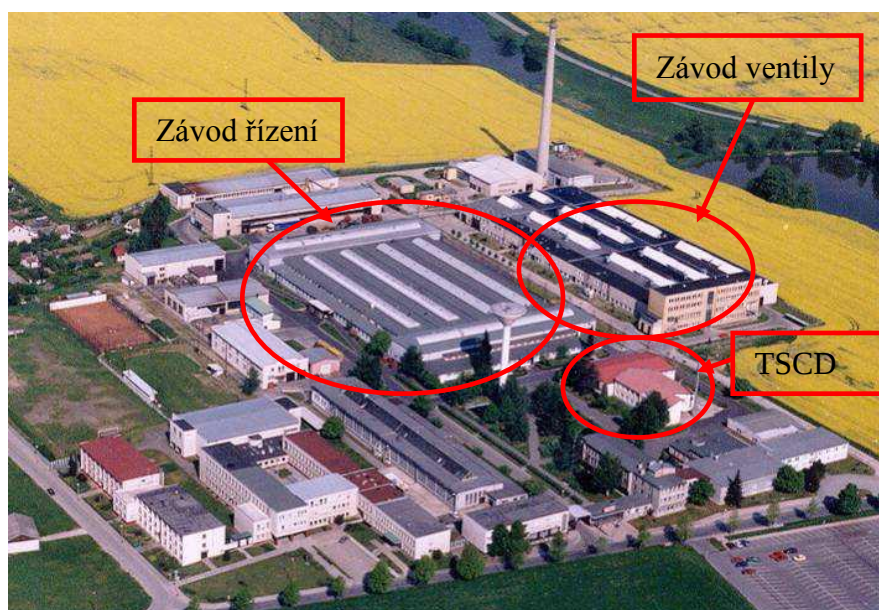
Současná situace na světových trzích nutí výrobce hledat různé způsoby, jak získat konkurenční výhodu, jak snížit náklady na minimum a v mnoha případech jak vůbec přežít toto složité období. V automobilovém průmyslu platí toto dvojnásob, neboť konkurence v odvětví je vysoká, používané technologie na vysoké úrovni a do vývoje jsou vkládány nemalé částky. Technologie, které jsou v posledních letech na vzestupu, a automobilový průmysl je hojně využívá, jsou povrchové úpravy. Ať už jsou to karosériové prvky, u kterých je důležitý jak dekorativní vzhled, tak i protikorozní ochrana, nebo dílce, které nejsou běžně viditelné, a jde u nich především o ochranu proti korozi.

Dnes mohou být povrchové ochrany, dosahující vysokých kvalit, jednou z možností, jak si získat zákazníka a nabídnout více než konkurence. Díky vyšším odolnostem proti korozi mohou výrobci nabízet prodloužené záruční doby, které dosahují tří, pěti či dokonce sedmi let. U podvozkových komponentů patří mezi nejdůležitější vlastnosti jejich funkčnost a spolehlivost. Většina z nich je životně důležitá pro bezpečnou jízdu a při porušení či zničení by mohlo dojít ke katastrofálním následkům. Proto nesmí povrchová úprava ovlivnit funkční vlastnosti součástí.

Nedílnou součástí každého kloubu, stabilizátoru, ramene či některých dalších podvozkových komponentů je kulový čep, který zajišťuje spojení s další součástí, např. těhlicí, a zároveň umožňuje pohyb. Najít ideální povrchovou úpravu pro kulový čep tak, aby splňovala všechny požadované parametry, není jednoduchá záležitost. Některé úpravy jsou zcela nevhodné, jiné zase finančně nepřipustné.

Jedním z předních světových výrobců automobilových dílců je firma TRW Automotive s hlavním sídlem v USA. Počátky firmy se datují do roku 1901, kdy se firma zabývá výrobou nářadí, zde ještě pod názvem Thompson products. Společnost roste a v roce 1958 dochází k fúzi s Ramo-Woolridge Corporation, vzniká společnost TRW. Přibližně o 10 let později dochází k rozdělení na TRW

Automotive (komponenty pro automobilový průmysl) a TRW Aerospace (vývoj satelitních systémů, produkce pro letecký a kosmický program). V současné době má firma přibližně 60 000 zaměstnanců pracujících ve 167 závodech po celém světě. Na okraji Vysočiny sídlí jeden z jejích závodů, TRW - DAS a.s. Dačice (viz obr. 1). Podnik, kde se v minulosti vyrábělo řízení a sloupky volantu pro Škodu, a později i pro jiné automobilky, v současné době produkuje komponenty pro podvozkové systémy a řízení.



Obr. 1 Letecký snímek závodu TRW - DAS a.s. [1].

1 KULOVÝ ČEP

Kulový čep je důležitou součástí podvozkových komponentů, a samozřejmě také mnoha dalších kinematických mechanismů. Tato práce pojednává pouze o čepích, které jsou montovány do kloubů, ramen, táhel a dalších dílců používaných k propojení nosné části automobilu a kola. Jedním z hlavních úkolů je přenášet pohyb od převodovky řízení ke kolové řídící páce. Během pohybu čep vykonává rotační a kývavý pohyb, neboť vzájemný pohyb některých částí řídícího ústrojí není rovinný, ale prostorový [2].

1.1 Výroba čepu

Výroba kulového čepu probíhá v několika fázích. Prvním krokem je výroba polotovaru, která se zajišťuje kooperací s několika dodavateli. Největším z nich je firma PWK. Používaným materiálem je nízkolegovaná chromová ocel 41CrS4V dle normy DIN EN 10083 [3].

Metoda, kterou jsou polotovary pro obrábění vyráběny, je dopředné protlačování za studena. Jako polotovar se používá materiál v podobě válcového taženého drátu. Drát se před samotnou operací protlačování žihá, a to z důvodu získání jemnější mikrostruktury. Po žihání přichází na řadu moření, z důvodu odstranění okují, dále fosátování pro snížení koeficientu tření a závěrečné kalibrování. Poté je aplikováno dopředné protlačování. Závěrečnou operací před balením a expedicí je zušlechtění tepelným zpracováním [9].

Následnou operací je obrábění. To je rozděleno na dva kroky – soustružení dřívku a soustružení koule. První operace se provádí na klasickém CNC soustruhu, koule se soustruží na speciálním stroji „kulostroj“. Po obrobení koule dochází ještě k válečkování povrchu, aby se dosáhlo nižší drsnosti, a zároveň se zpevňuje povrchová vrstva. Z důvodu dobrých kluzných vlastností musí být maximální hodnota $Rz \leq 1,5\mu m$. U některých čepů se po soustružení zařazuje povrchové kalení kužele a krčku [3].

Při výrobě kulového čepu se závitem se po obrábění ještě zařazuje výroba závitu válcováním. Mezi dva rotující válce s profilem požadovaného závitu se vloží čep, který je přidržován podpěrným pravítkem. Působením tlaku jednoho z válců se čep začne otáčet a dochází k utváření závitu. Na závěr se čepy kontrolují, zda nedošlo k poškození a ke vzniku trhlin [3].

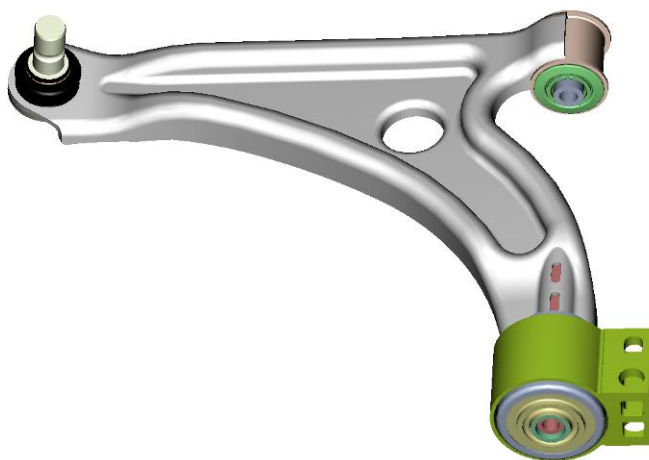
1.2 Druhy a použití čepů

Kulové čepy z produkce TRW - DAS můžeme rozdělit na dvě základní skupiny. První skupinou jsou čepy, jejichž nosná část je kuželová a k zajištění přesné montážní pozice je využíván právě kužel. Kuželovitost se pohybuje v rozmezí 1 : 5 až 1 : 10, kdy posledně zmiňovaná hodnota se používá především u velkých čepů pro nákladní automobily. Dalším důležitým parametrem, který výrazně ovlivňuje bezchybnost provozu, je utahovací moment. S tím je spojena nutnost dodržovat úzké tolerance při soustružení kužele. Na konci čepu je válcovaný závit a pro snadnou montáž je na čele opatřen vnitřním šestihranem, torxem nebo vnějším šestihranem. Tento druh čepů je nejčastěji montován do tzv. vnějších kloubů (viz obr. 2), pro které se v TRW - DAS a.s. užívá zkratk z anglického názvu OBJ a SBJ (outer ball joints a suspension ball joints) [3].



Obr. 2 Přírubový kolový kloub [3].

Druhou skupinou jsou čepy, jejichž nosná část má válcový profil. U těchto čepů je důležitým prvkem drážka, umístěná na válcové části. Ta má při montáži za úkol dosáhnout správně pozice a zajistit čep proti posunutí v axiálním směru. Některé čepy jsou pro snadnější usazení do správné polohy opatřeny osazením. Těmito čepy jsou často osazena ramena (viz obr. 3), zkráceně z anglického jazyka CA (control arms), ale v některých případech i různé typy vnějších kloubů [3].



Obr. 3 Rameno spodní [3].

Příklad kloubu osazeného kulovým čepem je vidět na obr. 4. Do dutiny hlavy kloubu je vložena plastová miska s kloubem, pod kouli čepu je nanесena malá porce mazacího tuku. Poté je nasazen závěrný kroužek a přes tento kroužek jsou kontrolovanou silou zarolovány okraje hlavy. Montáž kloubu je zakončena umístěním manžety a jejím zajištěním pomocnými kroužky. Ty jsou nasazeny pomocí rozpínacího kuželového trnu [3].



Obr. 4 Sestava kulového kloubu [3].

Zcela odlišným kulovým čepem, který je zde zmíněn pro úplnost, je kulový čep montovaný do axiálních táhel řízení – IBJ (inner ball joints). Toto táhlo zajišťuje spojení hřebenu řízení s vnějším kloubem, tato sestava se nazývá řídicí tyč. Táhlo vykonává pouze kyvný pohyb [3].

1.3 Analýza současného stavu výroby

Produkce firmy TRW - DAS a.s. zahrnuje výrobu různých druhů kloubů, táhel, stabilizátorů či ramen pro většinu světových výrobců automobilů jak osobních, tak i nákladních nebo autobusů. Všechny tyto komponenty jsou podvozkovými dílci a kvůli tomu jsou jedněmi z nejvíce korozně namáhaných součástí automobilu. Především v zimním období, kdy jsou cesty chemicky ošetřovány, zejména solí, dochází k vysokému koroznímu namáhání a k následné degradaci povrchu.

Právě chlorid sodný je častou příčinou poškození. Cl^- ionty porušují pasivní vrstvu, vzniká mikrodůlek, kov se rozpouští a důlek se rozšiřuje [4]. Takto vzniklá koroze se rychle šíří, proniká do hloubky a postupně dochází k poškození čepu. Následky mohou být menšího rozsahu, kdy dojde pouze ke zkorodování spoje a při následné demontáži k rozříznutí kloubu, nebo většího rozsahu, kdy může dojít až k prasknutí čepu za jízdy.

Proto, aby se zamezilo jakémukoliv nežádoucímu stavu, je potřeba kulový čep chránit. Současný stav je pro většinu automobilových výrobců nedostačující, a tak se snaží tlačit na výrobce, aby jejich produkty měly vyšší korozní odolnost při vyhovujících funkčních vlastnostech. Mnoho druhů čepů produkce TRW - DAS a.s. je montováno do kloubů bez povrchové úpravy pouze s leštěným povrchem, popř. ošetřeno fosfátováním, které je ovšem bráno jako dočasná ochrana proti korozi. V několika posledních letech se na většině čepů začíná používat IONITOX (na obr. 5 vlevo), což je patentovaný proces firmy Sulzer Metaplas, který představuje kombinaci termochemických procesů, nitrocementování, aktivace plazmou a oxidace [5]. Nejnovější povrchovou ochranou, která je spíše ve fázi testování,

je neelektrolytické nanášení zinkových lamel. TRW využívá produkt firmy Bensele s obchodním názvem Geomet (na obr. 5 vpravo).



Obr. 5 Kulový čep s povrchovou úpravou (vlevo IONITOX, vpravo Geomet) [3].

Tato práce by měla přinést ucelený pohled na jednotlivé povrchové úpravy, které se dají reálně využít jako antikorozní ochrana pro kulový čep. Prvním z důvodů je právě požadavek výrobců automobilů na neustálé zvyšování korozní odolnosti, která se ověřuje pomocí urychlených korozních testů v solné mlze. V současné době je minimální požadavek na výdrž 240 hodin, ale je snaha zvýšit tuto hodnotu na 480 hodin. Druhým, neméně závažným důvodem, je snížení počtu reklamací ze strany zákazníků (viz obr. 6). Zmenšením počtu reklamací se sníží náklady vynaložené na opravy, na výměnu za nové díly a na další položky s tímto spojené.



Obr. 6 Zákaznická reklamace – koroze na čepu při dodávce.

2 LITERÁRNÍ STUDIE

2.1 Koroze

Koroze je samovolný nevratný proces rozrušování kovových materiálů v důsledku jejich chemických nebo elektrochemických reakcí s okolním agresivním prostředím, který směřuje ke ztrátě funkčních vlastností výrobků z těchto materiálů vyrobených. Korozi podléhají téměř všechny materiály. Poškozování materiálu může být rozdílné. Samovolný průběh korozního procesu je způsobován tím, že korozní systém směřuje do stavu s menší volnou entalpií. Při ochraně proti korozi se tedy snažíme ovlivňovat tyto dva základní faktory korozního systému [6]:

- Materiál
- Korozní prostředí

Základní pojmy z koroze [7]:

Koroze	– fyzikálně chemická interakce kovu a prostředí způsobující změnu vlastností
Korozní zplodina	– látka vzniklá v důsledku koroze
Hloubka koroze	– vzdálenost mezi povrchem korodujícího kovu a původním povrchem
Korozní rychlost	– korozní projev za jednotku času
Korozní přírůstek/úbytek	– změna hmotnosti na jednotku plochy
Korozní odolnost	– schopnost kovu odolávat korozi
Korozní prostředí	– prostředí obsahující látky reagující s kovem
Agresivita prostředí	– schopnost prostředí vyvolávat korozi
Ochranná vrstva	– vrstva vytvořená na povrchu kovu snižující korozní rychlost
Ochranný povlak	– povlak z materiálu naneseného na kov za účelem ochrany

2.2 Druhy koroze

Tříděním druhů koroze podle různých hledisek se zabývá mnoho odborníků a publikací, ve kterých lze nalézt v současné době více než 100 termínů a označení pro korozní poškození. Třídění není ani zdaleka ustálené, a to především z důvodu velkého množství různých hledisek. Třídít lze dle vzhladu (makroskopického nebo mikroskopického), místa vzniku, korozního prostředí, materiálu, produktů, příčiny nebo dle mechanismů [8].

2.2.1 Chemická a elektrochemická koroze

Chemická koroze je znehodnocení vznikající v elektricky nevodivých prostředích při vzájemném působení kovu a korozního prostředí (soli, kapaliny a plyny). Jde například o velmi běžnou oxidaci kovu, zejména oceli, v elektricky nevodivém prostředí:



Tvoří se velmi tenká vrstva korozních produktů, která zabraňuje přístupu korozního média k povrchu. Vedle wüstitu **FeO**, který narůstá při povrchu kovu, a hematitu **Fe₂O₃**, který vzniká naopak na vnější straně oxidické vrstvy, tvoří se zde ještě magnetit **Fe₃O₄** [6,10].

Elektrochemická koroze zahrnuje případy koroze kovů v elektricky vodivých prostředích, podmínkou vzniku je přítomnost elektrolytu a dvou elektrod. Mezi elektrodami začne proudit elektrický proud a vzniká zde galvanický nebo koncentrační článek. Průběh v sobě vždy zahrnuje dvě dílčí reakce – anodovou a katodovou. Obě reakce jsou na sebe vázány (tzv. spřažené reakce) a nemohou probíhat samostatně. Anodová reakce odpovídá oxidaci kovu, a tedy vlastní korozi [4]:



Katodová reakce, zvaná též depolarizační (vybití nebo jiné odstranění elektronů vzniklých anodovou reakcí = depolarizace), odpovídá současné redukci některé oxidující složky roztoku, tj. buď vybití iontu vodíku (koroze s vodíkovou depolarizací) [13]:



nebo redukci kyslíku rozpuštěného v elektrolytu (koroze s kyslíkovou depolarizací) [13].



Všechny tyto reakce jsou zapříčiněny termodynamickou nestabilitou kovů v daném korozním prostředí. Veškeré děje a reakce směřují k rovnovážnému stavu a v tomto bodě se ustavuje rovnovážný potenciál E_r [13]:

$$E_r = E_r^0 - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{1}{M^{z+}} \quad (8)$$

kde: R [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$] – molární plynová konstanta,

T [K] – teplota,

z – počet vyměněných elektronů při elektrochemické přeměně,

F [$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$] – Faradayova konstanta,

M^{z+} – koncentrace iontů kovu v roztoku,

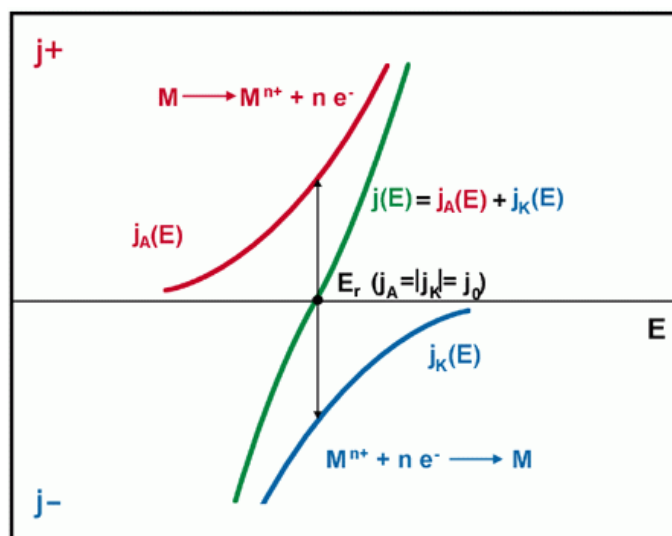
E_r^0 [mV] – standardní rovnovážný potenciál určený vzhledem k standardní vodíkové elektrodě.

Hodnota rovnovážného potenciálu je v průběhu reakce závislá na změně Gibbsovy energie ΔG [$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$], která je vyjádřena vztahem [13]:

$$\Delta G = z \cdot F \cdot E_r \quad (9)$$

kde: E_r [mV] – rovnovážný potenciál.

V případě, že hodnota potenciálu E je odlišná od hodnoty rovnovážného potenciálu E_r , pak hovoříme o tzv. předpětí $\eta[V]$. Kladná hodnota znamená oxidační průběh reakce, záporná naopak redukci. Je-li hodnota rovna rovnovážnému potenciálu, neprobíhá z makroskopického hlediska žádný děj, obě reakce mají stejnou rychlost. Rychlost reakce je při rovnovážném potenciálu (viz obr. 7) dána anodickou j_A , resp. katodickou j_K proudovou hustotou, ve stavu rovnováhy je potom $j_A + j_K = j = 0$ [10].



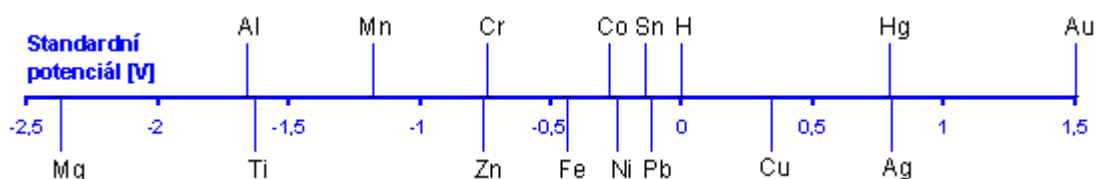
Obr. 7 Rovnovážný potenciál kovu [13].

Rychlost těchto dvou dějů je ovšem závislá na potenciálu elektrody, při růstu potenciálu ke kladným hodnotám se urychluje anodický děj, naopak rychlost katodického děje vzrůstá při zápornějších potenciálech. Rychlost reakce lze vyjádřit vztahem dle Faradayova zákona [13]:

$$\frac{m}{t} = \frac{M \cdot I}{z \cdot F} \quad (10)$$

kde: m [Kg] – hmotnost,
 t [s] – čas,
 M [kg·mol⁻¹] – molární hmotnost,
 I [A] – procházející proud.

Čím kladnějších hodnot potenciál kovů nabývá, tím je daný kov ušlechtlejší. Některé z nejušlechtilejších kovů prakticky nereagují a zůstávají v určitém korozním prostředí beze změny. Z hlediska koroze je pro ušlechtilost kovů nejvýznamnější korozní prostředí. Na obr. 8 je zobrazena elektrochemická řada napětí, kovy jsou zde řazeny dle hodnoty standardního potenciálu. Nulová hodnota je smluvně přiřazena vodíku.



Obr. 8 Rovnovážný potenciál kovů [20].

Anodové i katodové reakce tedy dohromady tvoří korozní děj a podle okolností mohou probíhat buď na téže místě povrchu korodujícího kovu, nebo místně odděleně.

2.2.2 Koroze dle korozního prostředí

Dalším často užívaným kritériem je dělení koroze z hlediska korozního prostředí. Korozní napadení dělíme do čtyř skupin [11]:

- koroze atmosférická
- koroze v kapalinách
- koroze v plynech
- koroze v půdách

Atmosférická koroze je nejčastějším druhem korozního napadení (viz obr. 9), protože agresivita atmosféry je vystavena největší část součástí a výrobků, více než 70 % korozních ztrát je způsobeno atmosférickou korozí [11]. První z vlivů, které spolupůsobí na atmosférickou korozi, jsou klimatické podmínky dané relativní vlhkostí (RH), teplotou vzduchu a jeho znečištěním. Tím je dán i převážně elektrochemický charakter tohoto napadení, neboť samotný kontakt se suchým vzduchem způsobuje zanedbatelné poškození.

Na povrchu materiálu vzniká tenká vrstvička elektrolytu, nasycená rozpustnými složkami atmosféry, hlavně oxidem siřičitým, oxidem uhelnatým, amoniakem, chlorovodíkem a aerosoly. Tato slabá vrstvička silná 5 až 150 μm vzniká již při nižší relativní vlhkosti, asi kolem 60 %. Tato vlhkost se nazývá kritická korozní vlhkost. Důležitý význam má i kyslík, který proniká tenkým filmem a účastní se katodické reakce jako depolarizátor, čili umožňuje korozi. Dalšími vlivy jsou sluneční záření a biologické činitele [6].

Norma ČSN ISO 9223 [12] rozděluje atmosféry podle korozní agresivity do pěti stupňů:

- **C1** – velmi nízká. Atmosféry uzavřených, klimatizovaných místností, v nichž nedochází ke kondenzaci vody,
- **C2** – nízká. Vztahuje se na prostory, v nichž dochází k občasné kondenzaci,
- **C3** – střední. Odpovídá suchým klimatům,
- **C4** – vysoká. Odpovídá vlhkým oblastem za působení atmosférických nečistot průmyslových měst, přístavů aj,
- **C5** – velmi vysoká.



Obr. 9 Atmosférická koroze.

Koroze v kapalinách je také velice častým korozním napadením, do styku s kapalinami, resp. s vodou přicházejí vodní stroje, zásobníky a nádrže v chemickém průmyslu, chladicí zařízení, rozvodná potrubí, armatury pitných a průmyslových vod a další zařízení [10].

Nejběžnějším případem je koroze ve vodách. Působením zcela čisté vody dochází jen k zanedbatelnému napadení, v praxi se ale většinou setkáme s vodou s různými nečistotami. Agresivita vody je ovlivněna především obsahem kyslíku, neboť koroze je většinou řízena rychlostí redukce kyslíku. Mezi další významné stimulatory koroze patří množství a druh rozpuštěných solí, přítomnost organických látek a mikroorganismů, pH, teplota, rychlost proudění a obsah pevných částic. Při dostatečném obsahu kyslíku ve vodě může kyslík způsobovat opačný efekt, může korozi díky tvorbě lidických ochranných vrstev omezovat. V běžných podmínkách k tomuto ději ale nedochází a uhlíková ocel proto poměrně rychle koroduje [4, 11, 13].

Koroze v půdách je problémem především pro různá vedení, potrubí či nádrže uložené v půdě, v současné době se to týká především starých rozvodů ropy, vody a plynu. Půdní prostředí je složené z různých minerálů, organické hmoty, vody a plynů. Podíl těchto složek se značně liší podle lokality. Faktory koroze, které jsou významné pro agresivitu půdy, jsou např. homogenita, pH, složení a redoxní potenciál. Nejvýznamnějším faktorem je vlhkost, bez níž by poškození korozí bylo zanedbatelné. Z důvodu přítomnosti vlhkosti se v půdě tvoří elektrolyt a probíhá zde elektrochemická koroze. V oblastech se zvýšenou erozí dochází k odkrývání kovu a k působení atmosférické koroze [11].

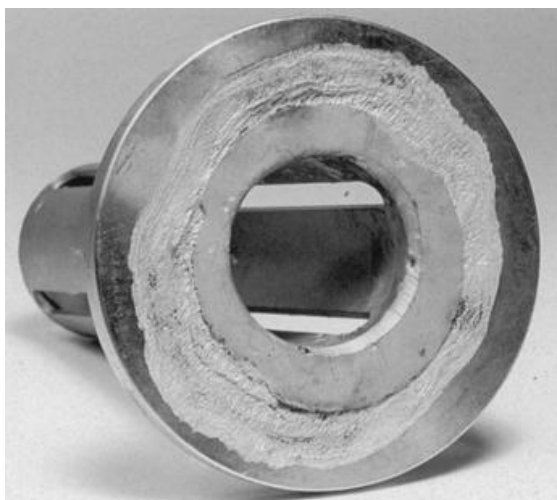
Koroze v plynech nastává v případě, že jediným inhibitorem koroze je plyn. Nejčastějším případem v praxi je koroze za vysokých teplot. Dochází zde ke dvěma reakcím, oxidací dochází na povrchu kovu ke vzniku korozních produktů, zatímco redukční plyny pronikají do kovu a reagují s jednotlivými složkami kovu. Nejnebezpečnější je v tomto případě vodík, který reaguje za vzniku chemických sloučenin, např. H_2O , CH_4 a dalších [4].

2.2.3 Druhy koroze dle tvaru korozního napadení

Rovnoměrná koroze je jedním z nejběžnějších typů koroze, probíhají zde zároveň anodický a katodický děj, rovnoměrně na celé exponované ploše. Postup rovnoměrné koroze je velmi snadno kontrolovatelný a jedná se o nejpříznivější korozní napadení ve srovnání s ostatními druhy. Odhad životnosti lze většinou provést na základě jednoduchých korozních zkoušek v daném prostředí [14].

Nerovnoměrná koroze je obdobné napadení jako rovnoměrná koroze, nezasahuje ovšem celý povrch, ale pouze některá místa [14].

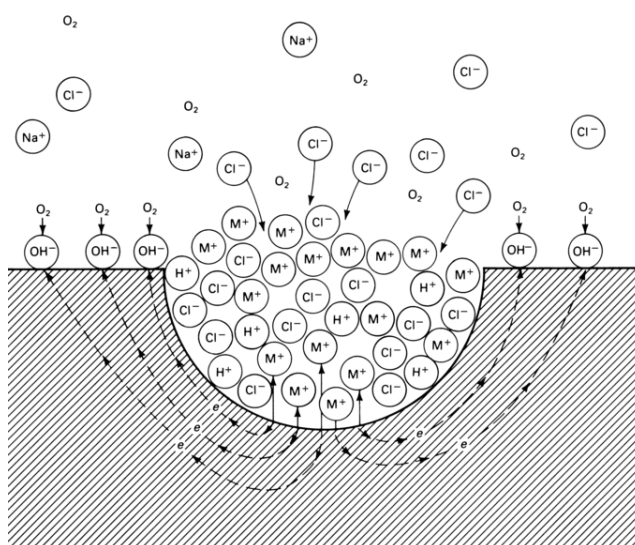
Štěrbínová koroze (viz obr. 10) vzniká v malých štěrbinách mezi 0,1 až 100 μm nebo na jiných místech, kde dochází k nedokonalé výměně korozního prostředí (např. u přírub, těsnění, pod nátěry, apod.). Vznikají zde koncentrační články, které urychlují průběh koroze. Různá koncentrace kovových iontů v elektrolytu, která působí ve štěrbině, tvoří kationtový koncentrační článek s katodickou reakcí na vnějším okraji štěrbin. Naopak uvnitř štěrbin vzniká článek s anodickou oblastí rozpouštění, a to z důvodu nedostatku přístupu kyslíku. Nejčastěji jsou tímto typem koroze postiženy korozivzdorné oceli [4, 8].



Obr. 10 Příklad štěrbinové koroze na přírubě z korozivzdorné oceli [4].

Nitková koroze je zvláštním případem šěrbinové koroze, která vzniká při styku s atmosférou s vysokou vlhkostí. Napadení se projevuje výskytem jemných vláken vycházející v náhodných směrech od jednoho nebo více míst vzniku. Tato vlákna jsou jemné tunely složené z produktů koroze pod povrchem, především pod popraskanými nátěry, laky nebo konzervačními prostředky. Tato koroze není nebezpečná z hlediska prokorodování základního kovu, ale jde zásadně o problém estetický [4].

Bodová koroze neboli *pitting* je druh napadení, při kterém dochází k lokálnímu porušení jinak odolné pasivní vrstvy, zejména u korozivzdorných ocelí nebo hliníku a jeho slitin. Korozní napadení se koncentruje do určitého počtu bodů, ve kterých vznikají úzké, ale dlouhé důlky. Nukleace důlků probíhá v nehomogenních místech jinak pasivního povrchu (např. vměstky). Nebezpečí v tomto případě hrozí vysoké, může dojít až k perforaci materiálu, a tím k havárii. V literatuře se můžeme ještě setkat s výrazem **důlková koroze** (viz obr. 11). Nejčastějším výkladem rozdílu mezi důlkovou a bodovou korozí je hloubka důlku. Zatímco u bodové koroze vznikají důlky poměrně úzké a hluboké, u koroze důlkové nepřevyšuje hloubka napadení největší průměr důlku. Nejčastějšími inhibitory tohoto napadení bývají chloridové, popř. další halogenidové ionty a také síranové ionty [4, 8].

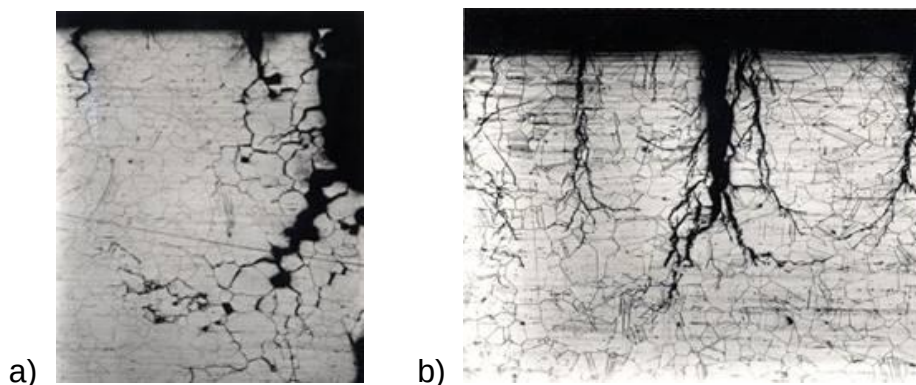


Obr. 11 Autokatalický proces probíhající při růstu důlku [4].

Mezikrystalová koroze je druh korozního napadení, kterému podléhá jen úzká oblast při hranicích krystalických zrn, zatímco většina ostatních zrn zůstává neporušena. Koroze proniká do značných hloubek, často i celým průřezem. Tím dochází ke ztrátě mechanických vlastností a soudržnosti. Hranice zrn se zde chovají jako anody a vlastní zrna tvoří katody, což může zvýšit rychlost napadení. Speciálním druhem mezikrystalové koroze je **nožová koroze** (napadení připomíná zářez nožem), která vzniká u chromniklových ocelí stabilizovaných titanem nebo niobem [14].

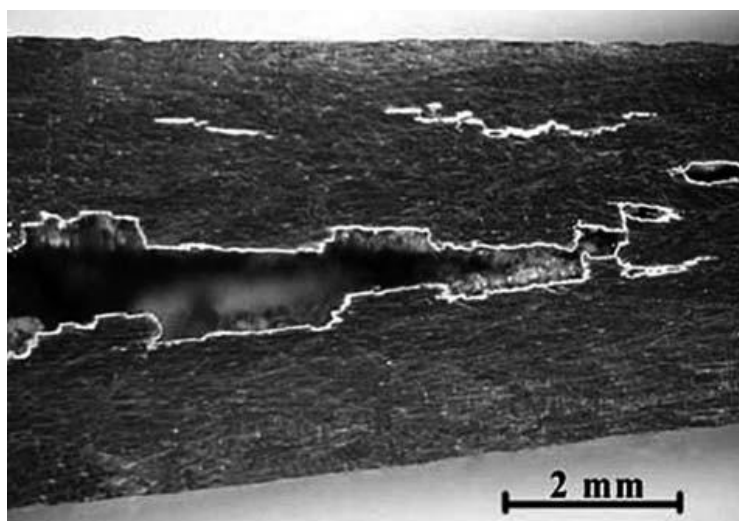
Při **extrakční korozi** koroduje převážně jen jedna chemická složka slitiny. Toto napadení je charakterizováno vznikem koncentračního spádu chemické složky extrahované slitiny v místě koroze. Napadení může zasahovat celý povrch rovnoměrně a rovnoměrně pronikat do hloubky kovů nebo může být místní a vytvářet důlky. Nejznámějším případem extrakční koroze je odzinkování mosazi [10].

Korozní praskání za napětí je jev, při kterém dochází k porušení materiálu (součásti) při napětí výrazně pod mezí pevnosti nebo pod mezí kluzu. Podle způsobu šíření trhlin rozeznáváme korozní praskání interkrystalické (obr. 12a), transkrystalické (obr. 12b) a smíšené. Pro vznik jsou nutné tři podmínky – citlivost materiálu ke koroznímu praskání, působení specifického prostředí a přítomnost tahového napětí. Dle nejčastěji užívané teorie je korozní praskání způsobeno anodickým rozpouštěním kovu v místech porušení pasivní vrstvy [4, 10].



Obr. 12 Interkrystalický lom (a), transkrystalický lom (b) [15].

Vodíková křehkost je druh poškození, které je velice těžce odhalitelné, neboť při něm atomární vodík difunduje do krystalové mřížky kovu (v molekulárním stavu je to pro vodík velice obtížné). Intersticiální vodík může už sám o sobě způsobovat zkřehnutí, v jiných případech vytváří nestabilní a křehké hydridy. Vodíkové ionty jsou v kovu zachycovány v tzv. vodíkových pastech (vměstky, shluky dislokací, fázová rozhraní, vakance apod.), kde se tvoří molekulární vodík. Díky jeho minimální schopnosti difundovat zde stoupá tlak a tvoří se mikrotrhliny, dutiny a puchýře (viz obr. 13), až nakonec dojde k delaminaci materiálu. Atomární vodík, který se dostal do struktury během pokovování, lze odstranit z kovu pomocí žhání při teplotě 200 °C, molekulární vodík už bohužel odstranit nelze [4, 8].



Obr. 13 Vodíkové puchýře [8].

Výčet druhů korozního napadení zde není konečný, pro podrobnější informace jsou vhodné různé encyklopedie koroze, např. CRAMER, Stephen D., COVINO, Bernard S., Jr. *ASM Handbook, Volume 13A - Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection* nebo odborné články, např. NOVÁK, P. *Druhy koroze kovů* dostupný z www.vscht.cz.

2.3 Povrchové úpravy

2.3.1 IONITOX

IONITOX nepředstavuje typickou povlakovací metodu, ale především modifikaci povrchu pro dosažení vyšší tvrdosti povrchu, odolnosti proti opotřebení a vyšší korozní odolnosti. Díky svým vlastnostem nachází široké uplatnění v mnoha odvětvích, proces je také zvláště šetrný k životnímu prostředí a je tedy vhodnou náhradou chromování s obsahem šestimocného chromu [16].

Celý proces je kombinací tří termochemických procesů: plynového karbonitridování, plazmové aktivace (plazma nitro-cementování) a oxidace. V nitro-cementačním kroku je povrch součásti řízeným procesem nauhličován a zároveň sycen dusíkem, jako procesní plyny se používají čpavek (NH_3) a oxid uhličitý (CO_2). Při teplotách mezi 840 – 850 °C se tvoří difúzní zóna s dobře definovanou strukturou a složením. Difúzní oblast vykazuje zbytková tlaková namáhání, která mají pozitivní vliv na únavu materiálu. Ve druhém kroku je povrch aktivován plazmou, což jsou ionizované plyny složené z iontů a elektronů. Je odstraňována pasivní vrstva a stabilizován povrch tak, aby získal optimální adhezní parametry pro finální vrstvu. Na závěr je povrch oxidován, tvoří se vrstvička oxidů přibližně 2 μm silná. Na obr. 14 je znázorněna struktura vrstvy po aplikaci celého procesu [5, 16].

Povrch Fe_3O_4	Bílá vrstva	Difúzní oblast
Dusík Uhlík 	ε - nitridy (- nitrid uhlíku)	Dusík v roztoku
	γ - nitridy Speciální nitridy	Speciální nitridy Karbidy Precipitační oblast dusíku
Tloušťka vrstvy 1 - 3 μm	2 – 20 μm	100 – 800 μm

Obr. 14 Struktura dvojité vrstvy po aplikaci metody IONIT OX [5].

2.3.2 Geomet

Vhodnou a ekologicky méně škodlivou metodou povrchové ochrany je vodní nátěr na bázi disperze s obsahem oxidů kovů, kovových zinkových a hliníkových lamel s obchodním názvem Geomet. Tyto lamelové povlaky bez trojmocného a šestimocného chromu jsou vhodnou alternativou k elektrolytickému pokovování nebo nátěrům na bázi organických rozpouštědel. Jsou recyklovatelné, mají vysokou korozní a tepelnou odolnost (až 290 °C), jsou odolné proti běžným čisticím a konzervačním prostředkům a organickým provozním kapalinám. Mají dobrou přilnavost a pružnost, odolnost proti odprýskávání a otěru [18].

Proces vyžaduje vysokou čistotu povrchu, proto je před samotným nanesením povlaku aplikováno alkalické a mechanické čištění. S cílem odstranit olejové nečistoty je aplikován postřik či ponor do lázně. Následně je aplikováno tryskání ocelovou drtí, kuličkami nebo dalšími částicemi. Pomocí tryskání se z povrchu odstraní okuje a zlepší se přilnavost povrchu před nanesením povlaku. Samotné nanesení povlaku může být provedeno dvěma způsoby. U velmi malých dílců (spony, pružiny, apod.) se koš se součástkami ponoří do nátěrové hmoty (viz obr. 15) a po vyjmutí se přebytečná barva odstředí [18].

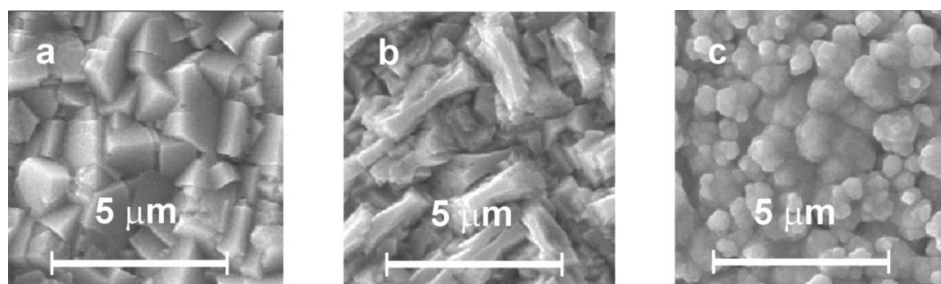


Obr. 15 Geomet nanášený na dílce v bubnu ponorovou technikou [17].

Pro větší dílce (rotory, konzoly atd.) se užívá nástřiková metoda, dílce se individuálně navěsí na závěs v poloautomatické lince a pokračují na stanoviště, kde je pomocí trysky nanesen nátěr. Dle požadované tloušťky nátěru se provede jednoduchý nebo vícenásobný nástřik. Po aplikaci nátěru se veškeré dílce musí vytvrdit v konvenční nebo indukční peci. Proces vytvrzování probíhá ve dvou krocích. Nejprve dojde k tzv. „předvytvrzení“, to probíhá při teplotách 60 – 125 °C po dobu 10 minut. Hlavní vytvrzení povlaku poté probíhá při teplotách 300 – 315 °C po dobu 15 minut [18].

2.3.3 Zn-Ni

Povrchová ochrana součástí zinkem je jednou z nejstarších galvanických metod. V současné době se do popředí zájmu automobilových výrobců dostávají slitinové zinkové povlaky. Kromě slitiny Zn-Ni (viz obr. 16) se ještě používají slitiny zinku s kobaltem nebo železem. Největší výhodou slitinových povlaků je vysoká korozní odolnost, a to jak samotné slitiny, tak i povlaků s konverzními a utěšňovacími úpravami. Povlak je odolný proti prudkým změnám teplot, má několikanásobně vyšší korozní odolnost než galvanický zinek, a proto je velice často používán k ochraně podvozkových komponentů. Povlak má dobrou přilnavost a kryvost, je výbornou náhradou za kadmiové povlaky. Patří mezi tzv. „obětní ochrany“, zinek koroduje jako první a jeho zplodiny stále chrání podkladový kov. Nevýhodou je, že při pokovení může dojít k navodíkování a následně ke koroznímu praskání. To se částečně eliminuje dodatečným žíháním [21].



Obr. 16 Struktura Zn-Ni slitiny s různými obsahy niklu (a – 5 % Ni, b – 12 % Ni, 15 % Ni) [19].

Vylučování povlaku ze slitiny Zn-Ni je možné z obou typů nekyanidových lázní, alkalických i kyselých. Obsah niklu se ve slitině většinou pohybuje v rozmezí 5 – 19 %. V porovnání s alkalickými lázněmi, kyselé lázně vytvářejí vyšší procento slitinových kovů, mají vyšší výtěžnost, vykazují lepší proudovou účinnost a povlaky vyloučené v kyselých lázních dosahují vysokého lesku. Také likvidace odpadních vod je oproti alkalickým lázním jednodušší. Alkalické lázně naproti tomu vykazují mnohem lepší distribuci tloušťky vrstvy a lepší korozní odolnost. Výhody slitinových povlaků jsou vykoupeny komplikovanější a nákladnější technologií [6, 22].

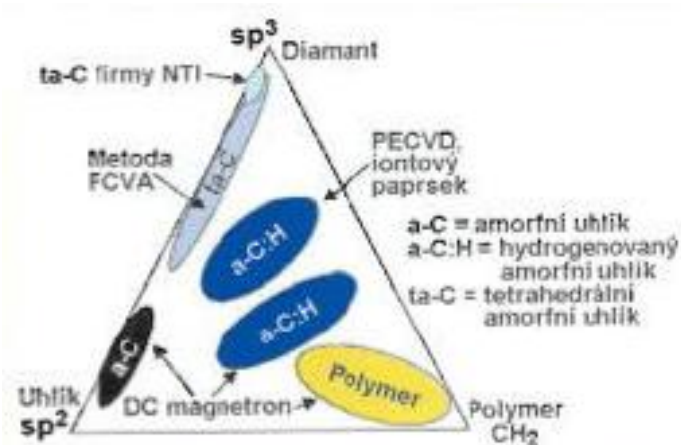
2.3.4 DLC

Název „diamond-like“ vznikl na základě charakteristických vlastností těchto materiálů (optické, elektrické, fyzikální, chemické, tribologické), které připomínají vlastnosti diamantu [23]. DLC vrstvy vznikají při dopadu ionizovaných uhlíkových a uhlíkovodíkových částic na povrch s energií 10 – 300 eV. Přednostmi těchto povlaků jsou zvýšené mechanické vlastnosti, především vysoká tvrdost, modul pružnosti v tahu až 200 GPa, dále vysoký elektrický odpor, optická transparentnost, chemická stálost a nízký koeficient tření a opotřebení [24].

Tab. 2.1 Vlastnosti diamantu a DLC materiálů [25].

	Tenké filmy		Tlusté vrstvy		
Skladba	CVD Dia.	a-C	a-C:H	Diamant	Grafit
Struktura - mřížka	Kubická m. ao=3.561Å	Amorfní, mix sp ² and sp ³ vazeb	Amorfní, mix sp ² and sp ³ vazeb	Kubická m. ao=3.567Å	Hexagonální m. a=2.47
Forma	Hlazené krystaly	Hladký nebo hrubý	Hladký	Hlazené krystaly	-
Tvrdost (H _v)	3000-12000	1200-3000	900-3000	7000-10000	-
Hustota (g/cm ³)	2.8-3.5	1.6-2.2	1.2-2.6	3,51	2,26
Index lomu	-	1.5-3.1	1.6-3.1	2,42	2,15
Elektrický odpor (Ω/cm)	>10 ¹³	>10 ¹⁰	10 ⁶ -10 ¹⁴	>10 ¹⁶	0.4
Tepelná vodivost (W/m.K)	1100	-	-	2000	3500
Chemická stálost	Inertní	Inertní	Inertní	Inertní	Inertní
Obsah vodíku (H/C)	-	-	0.25-1	-	-
Rychlost růstu (μm/hr)	~1	2	5	1000 (syntetický)	-

DLC povlaky jsou obecně amorfní povahy, tj. nemají dominantní druh krystalové mřížky a skládají se ze směsi sp^2 (grafit) a sp^3 (diamant) vazeb (viz obr. 17). Vlastnosti povlaku silně závisí na charakteristice zvolené depoziční technologie (PVD, IBD, PACVD a další), kovu, obsahu vodíku v povlaku, poměr sp^2 a sp^3 vazeb, iontové energii a hustotě a teplotě podkladu [25].



Obr. 17 Uhlíkové vazby DLC materiálů [23].

Mezi nejrozšířenější metody patří metoda **PVD** – physical vapour deposition, což je nanášení vrstvy odpařením nebo odprášením materiálů z pevné fáze, vzniká tím vrstva přibližně $2\mu m$ silná. Výhodou této metody je nízká teplota povlakovaných předmětů při aplikaci. Další rozšířenou metodou je **IBD** – depozice iontovým svazkem, jejíž hlavní předností je nanášení vrstvy při téměř pokojové teplotě, nevýhodou velice pomalý přírůstek. Existuje mnoho dalších metod nanášení vrstev, ať už jsou fyzikální podstaty nebo chemické či fyzikálně-chemické. Mezi novější techniky patří CFUBMS – closed field unbalanced magnetron sputtering. Tato metoda v sobě kombinuje výhody CVD a IBD [25].

2.4 Testy a testovací zařízení

2.4.1 Test neutrální solnou mlhou

Test solnou mlhou, zkráceně SST (z angl. originálu „Salt spray test“), je všeobecně vhodný pro testování kvality povrchových ochranných vrstev, pro rychlou analýzu vad, prasklin, pórů či jiných poškození. Největší jejich výhodou je oproti testům ve skutečných klimatických podmínkách v době trvání. Zatímco testy v reálných podmínkách trvají měsíce či roky, než lze získat adekvátní výsledky, urychlené testy solnou mlhou vykazují výsledky již po několika dnech, nanejvýše týdnech [26].

Pro hodnocení povrchových úprav v této práci je právě na test neutrální solnou mlhou kladen největší důraz, neboť hlavní požadavek zákazníka je zvýšená korozní odolnost čepů. S ohledem na to, že každá z funkčních ploch čepu je ve skutečnosti jinak korozně namáhána, je třeba vyhodnocovat tyto jednotlivé plochy zvlášť (podrobně popsáno níže). Údaje pro vyhodnocení kvality povrchové úpravy uvádějí podnikové TRW nebo zákaznické normy. Podrobné provedení a parametry testu jsou popsány v normě ČSN ISO 9227, která je obdobou mnoha jiných mezinárodních či podnikových norem popisujících SST.

Postup a provedení solného testu [26]:

- výroba demineralizované vody
- příprava solného roztoku
- parametry a nominální hodnoty nastavení klimatické komory
- příprava vzorků
- provedení testu korozní odolnosti
- vyhodnocení testu a provedení fotodokumentace

Test solnou mlhou byl proveden v TSCD (Technical support center Dačice) v solné komoře Liebisch S1000 M-TR (viz obr. 18). Příprava testu zahrnovala výrobu demineralizované vody, která je nutná pro zvlhčovač vzduchu

do komory a také pro přípravu solného roztoku. Pro standardní test byl použit 5% solný roztok (solanka) s hustotou v rozmezí (1,0255 – 1,0400) kg/l, který je do komory dodáván z boční nádrže pomocí čerpadla a tím je zajištěno konstantní množství rozprašovaného roztoku. Hodnota pH byla udržována mezi 6,5 – 7,2 pomocí zředěné kyseliny chlorovodíkové nebo hydroxidu sodného a byla kontrolována pomocí pH metru. Nominální hodnoty komory byly nastaveny dle předpisu - teplota zvlhčovače na 50 °C, teplota v kabinetu na 35 °C a tlak rozprašovací trysky na 0,8 bar.



Obr. 18 Solná komora Liebisch S1000 M-TR.

2.4.2 Metalografická analýza

Metalografie obecně je nauka o vnitřní stavbě kovů a jejich slitin. Pomocí metalografické analýzy můžeme studovat vnitřní strukturu materiálu, vady a změny materiálu, v případě povrchových vrstev např. jejich tloušťku, přilnavost nebo celistvost. Analýza u vzorků s navrhovanými povrchovými úpravami byla provedena jednak z důvodu kontroly požadovaných parametrů povrchové vrstvy, ale také proto, aby bylo zjištěno, zda se povlak hodí pro daný materiál, má dobrou přilnavost a nevykazuje nějaké okem nepostřehnutelné vady [27].

Příprava vzorku

Příprava vzorku (metalografický výbrus) je pro získání dobrých výsledků nejdůležitější činností, a proto bylo potřeba postupovat precizně. Vzorky pro pozorování byly připravovány v několika krocích [27]:

- odběr vzorku řezáním
- preparace
- broušení
- leštění
- leptání
- pozorování

Řezání kulového čepu bylo provedeno na brusce ATM Brilliant 250 (viz obr. 19) brusným kotoučem o průměru 250 mm pro tvrdé materiály. Proto, aby bylo dosaženo velmi hladkého povrchu, byla nastavena rychlost posuvu kotouče na $8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a otáčky kotouče na $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Řez byl proveden vratným způsobem, aby byl umožněn přívod chladicí kapaliny přímo do řezu a zabránilo se tak přehřátí a ovlivnění povrchové vrstvy vzorku. U všech typů povrchových úprav byl odebrán vzorek z oblasti kužele. Proveden byl kolmý řez, při kuželovitosti 1:6 mohl být rozdíl mezi změřenou a skutečnou tloušťkou zanedbán.



Obr. 19 Bruska ATM Brilliant 250.

Pro snadnou manipulaci byla následně provedena preparace za tepla, očištěný vzorek byl vložen do tlakové nádoby, zasypán plastovým granulátem, na granulát vloženo číslo pro identifikaci a navrch zasypáno pryskyřicí. V komoře došlo k natavení granulátu a pomocí tlaku ke slisování do válečku. Vzorek byl vyjmut a ponechán na vzduchu, aby vychladl. Další operací nutnou k dosažení kvalitního povrchu výbrusu bylo broušení a leštění. Broušení proběhlo na horizontální rotační brusce Struers RotoPol-31 (viz obr. 20) v několika krocích. Kvalitní výbrus byl dosažen pomocí diamantových brusných kotoučů, první se zrnitostí 100 (počet zrn na 1 cm^2) a druhý se zrnitostí 600. Následné leštění bylo provedeno nanesením brusné pasty (velikost zrna $1\text{ }\mu\text{m}$) a vzájemným pohybem spodního talíře a upnutých vzorků. Poslední operací před samotným pozorováním a analýzou je leptání. Provádí se proto, aby se zviditelnily jednotlivé strukturní části. Používají se různá leptadla, nejčastěji používaným je nital (roztok kyseliny dusičné v etanolu).



Obr. 20 Horizontální bruska Struers RotoPol-31.

Připravené vzorky byly pozorovány pomocí metalografického mikroskopu NEOPHOT 32 firmy Zeiss (viz obr. 21), pro snímání byla použita digitální kamera Micrometrics. Jednotlivé snímky byly pořízeny se zvětšením 1000x.



Obr. 21 Metalografický mikroskop NEOPHOT 32.

2.4.3 Mikrotvrdost

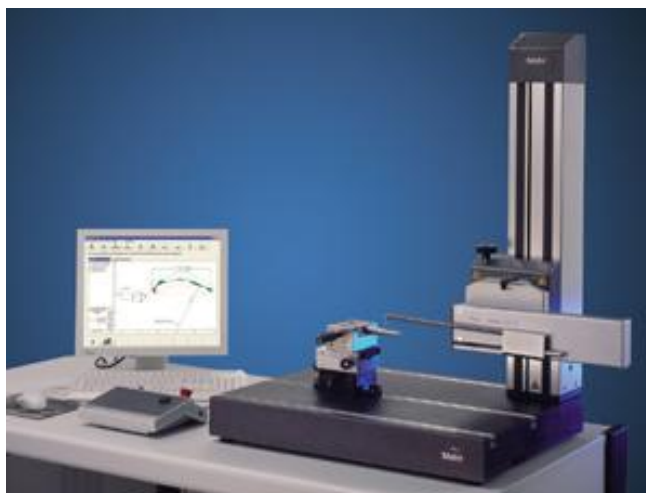
Měření mikrotvrdosti je spojováno především s Vickersovou nebo Knoopovou zkouškou tvrdosti. Obě metody využívají k určení tvrdosti tělísko ve tvaru čtyřúhelníku, který je vtlačován do materiálu. Samotná mikrotvrdost se od měření tvrdosti liší pouze hodnotou zatížení, váha závaží se pohybuje v gramech, maximální hodnota je kolem 2 kg. Pro posuzování povrchových vrstev je tato metoda nevhodnější, neboť nesmí dojít k protlačení vrstvy až na základní materiál. Pro hodnocené vzorky byla vybrána metoda podle Vickerse od HV0,025 do HV0,2, hodnota je udávána v kilogramech. Všechna měření byla provedena plně automatickým tvrdoměrem Durascan (viz obr. 22) od firmy Struers s rozsahem měření od 10 g do 10 kg a použit byl diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° [28].



Obr. 22 Tvrdoměr Durascan od firmy Struers.

2.4.4 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je důležitou technologickou vlastností. V případě kulových čepů je to především v oblasti koule, kde musí drsnost dosahovat velmi nízkých hodnot, max. $R_z = 1,5 \mu\text{m}$. Je to především z důvodu snížení tření na minimální hodnotu, aby nedocházelo k poškozování plastové misky, následnému prodření a k postupnému zadírání kovu na kov. Z tohoto důvodu byla u některých vzorků při nanášení povrchové vrstvy koule chráněna. U elektrolytického pokovení slitinou Zn-Ni to nebylo možné, proto musela být koule následně obráběna a rolována na požadovanou drsnost $R_z \leq 1,5 \mu\text{m}$. Měření mělo potvrdit předpoklad, který vycházel ze zkušeností s konkrétními typy povrchových úprav. Měření bylo provedeno pomocí drsnoměru firmy Mahr, Porthometer concept (viz obr. 23).



Obr. 23 Drsnoměr Porthometer concept od firmy Mahr.

3 NÁVRH VARIANT TECHNOLOGIÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV

Konkrétní návrhy jednotlivých technologií povrchových úprav jsou popsány v této kapitole. Všechny návrhy se řídí globálními vnitřními předpisy a specifikacemi TRW. Pro aplikaci povrchových úprav byl zvolen kulový čep s kuželem (kuželovitost 1:5) a s průměrem koule 35 mm, materiál ocel 41CrS4V (viz obr. 24).



Obr. 24 Kulový čep před povrchovou úpravou.

Základním požadavkem na povrchovou úpravu, který je v současné době vyžadován, je korozní odolnost ověřená testem rozprašovanou solnou mlhou po dobu 240 hodin. Většina světových výrobců automobilů však není s touto odolností spokojena a zvyšuje nároky na protikorozi ochranu, požaduje 480 hodin bez červené koroze v solné mlze. Je ovšem třeba zachovat některé parametry, které musí kulový čep splňovat. Je to především odolnost proti únavě a také nesmí dojít ke snížení pevnosti. Dalším důležitým parametrem čepu je nízká drsnost koule $R_z \leq 1,5 \mu\text{m}$, a to z důvodu pohybu koule v plastovém lůžku. Nízká hodnota tření je zde dosahována právě nízkou drsností povrchu koule a také přidáním vhodného mazacího tuku. Z těchto důvodů není nutné aplikovat povrchovou úpravu na kouli, ta je z největší části chráněna plastovým lůžkem zalisovaným v hlavě kloubu, vrchní část je chráněna prachovkou. Je tedy třeba povrchovou úpravou chránit především kuželovou, resp. válcovou část a závit.

3.1 Návrh technologie „Ionitox“

Tato technologie je pro produkty firmy TRW - DAS a.s. již užívána a spolu s nechráněnými leštěnými čepy pokrývá téměř celou produkci kulových čepů. V návrhu je proto použit standardní proces, který je sériově aplikován. Výhodou této metody je možnost aplikace na celém povrchu včetně koule, aniž by došlo ke zvýšení drsnosti povrchu. Osloven byl již stávající dodavatel, firma Bodycote.

Požadované parametry procesu

- pro aplikaci Ionitox je dodán kompletně hotový obrobek,
- karbonitridace v plynu + oxidace, provedení po celé ploše čepu, výjimky povoleny v oblasti středících důlků a vnitřního šestihranu,
- tloušťka předepsaná pro kompletní vrstvu je $(19 + 5) \mu\text{m}$. V místě ostrých hran je povolena snížená hloubka vrstvy na 50%,
- nitridační hloubka $(0,20 + 0,25) \text{ mm}$,
- oxidační vrstva $(1+2) \mu\text{m}$,
- drsnost povrchu na kouli $R_z < 1,5 \mu\text{m}$.

3.2 Návrh technologie „Geomet“

Technologie neelektrolyticky nanášených zinkových lamel je metoda, která přináší jisté výhody, ale i nevýhody. Její předností je výrazně vyšší korozní odolnost a díky její povaze nehrozí navodíkování, nevýhodou je vyšší koeficient tření a nižší tvrdost. Z důvodu dodržení nízké drsnosti povrchu koule, je třeba tuto oblast chránit před nanesením povlaku. Pro provedení povrchové úpravy byla vybrána firma Benseler GmbH.

Požadované parametry procesu

- pro nanesení povlaku Geomet je dodán kompletně hotový obrobek,
- nanesení povlaku tryskáním na závěsu, dvojitá vrstva, požadovaná tloušťka vrstvy $(6 - 20) \mu\text{m}$,

- obsah zinkových lamel ~70 %, obsah hliníkových lamel ~10 %, obsah zinkového prachu není povolen,
- koule musí být chráněna proti aplikaci vrstvy, krček je přechodovou oblastí
- maximální vytvrzovací teplota 300 °C,
- aplikování dodatečného utěsnění tenkou vrchní vrstvou, celková tloušťka povlaku nesmí přesáhnout 20 µm.

3.3 Návrh technologie galvanického pokovení slitinou „Zn-Ni“

U galvanického pokovení čepu není možné dobře chránit kouli před pokovením, proto je pokoven celý čep včetně koule. Dle předpokladu není touto technologií možné dosáhnout předepsané drsnosti povrchu, proto musí být po nanesení vrstvy koule soustružena a válečkována. U této technologie, z důvodu předúprav a i samotného pokovení, je po nanesení slitiny Zn-Ni provedeno odvodíkování. Dodatečně je po nanesení povrchové úpravy soustružena koule a krček. Vzorky byly odeslány na pokovení do firmy CVP Galvanika Příbram.

Požadované parametry procesu

- polotovarem před pokovením je kulový čep s obrobenou kuželovou, resp. válcovou plochou načisto + hotový závit s vnitřním kuželem na čele, koule je neobrobená,
- provedení pokovení na závěsu v kyselé slitinové lázni zinek-nikl, požadovaná tloušťka vrstvy (8 - 15) µm,
- obsah niklu ve slitině požadován v rozmezí (12 – 16) %,
- povrchová vrstva musí být konzistentní a bez defektů,
- aplikace ochranných dodatečných úprav – chromátování bezbarvým, popř. lesklým chromátem s dodatečným zapečetěním pomocí polymerního laku,
- následné provedení odvodíkování při teplotě 180 °C po dobu 2 hodin.

3.4 Návrh technologie nanesení povlaku „DLC“

Nanášení povlaku DLC je zatím většinou spojeno s povlakováním řezných nástrojů nebo součástí, které vyžadují vysokou odolnost proti opotřebení a nízký koeficient tření. Vrstva DLC je chemicky vysoce inertní a pokud by byla dostatečně kompaktní, ochrání i kovový povrch čepu. Čep by mohl být povlakován celý, ale po dohodě s dodavatelem technologie (z důvodu uchycení), bude DLC vrstvou chráněn pouze kužel a závit, koule zůstane nechráněná. Pokud by se technologie projevila jako vyhovující, bylo by potřeba zdokonalit způsob uchycení, např. za vnitřní šestihran a plošku na kouli. Nanesení DLC povlaku bylo provedeno ve firmě HVM Plasma - PVD centrum Brno.

Požadované parametry procesu

- uchycení kompletně obrobeného kulového čepu v oblasti koule bez mechanického poškození a zvýšení drsnosti povrchu,
- před samotným povlakováním provést důkladné čištění povrchu čepu pomocí ultrazvukového čištění a následného plasmového čištění,
- nanesení adhezní vrstvy z katod Cr + WCH pro lepší přilnavost DLC povlaku,
- samotné nanesení vrstvy DLC metodou PACVD, požadovaná tloušťka 2 μm , maximální teplota procesu 200 °C.

4 VYHODNOCENÍ NAVRŽENÝCH VARIANT

Všechny varianty povrchových úprav byly podrobeny testům, které jsou výrobci automobilů předepisovány nejčastěji a které by měly prokázat vhodnost protikorozní ochrany. Nejpoužívanějším testem, který je často prováděn pro zjištění kvality a odolnosti povrchové vrstvy proti korozi, je test neutrální solnou mlhou. Dalšími metodami vhodnými pro kontrolu vrstev jsou metalografický rozřez, kontrola drsnosti povrchu, mikrotvrdost a při podezření na navodíkování materiálu, popř. na jiné strukturní vady, které by mohly být způsobeny během procesu povlakování, také únavový test. Z kapacitních důvodů nebyl tento test proveden, ale v závěru je doporučeno provedení testu. Dalším parametrem, který výrobce nejvíce zajímá, jsou náklady spojené s provedením povrchové úpravy, ať už přímé, nebo nepřímé. Kalkulace nákladů je popsána v závěru, v kapitole technicko-ekonomické zhodnocení.

4.1 *Test neutrální solnou mlhou*

Jak již bylo popsáno, test solnou mlhou, jakož i ostatní testy, byl proveden v testovacím centru firmy TRW - DAS Dačice v solné komoře Liebisch. Před samotným testem byla na vzorcích provedena kontrola, zda povrchová úprava nevykazuje viditelné defekty způsobené manipulací nebo přepravou, a poté byly pořízeny snímky čepů. U vzorků, kde byla koule obrobena nebo chráněna před nanesením povrchové vrstvy, byla koule ochráněna fólií a samolepicí páskou. Kulové čepy byly poté uloženy do komory (viz obr. 25) na inertní plastové stojany tak, aby se nedotýkaly jeden druhého a s vodorovnou plochou svíraly přibližně 20 °. Body dotyku se stojanem byly v krčku a v polovině závitu. Tyto oblasti mohly být ovlivněny interakcí se stojanem, proto nebyly vyhodnocovány. Následně byl spuštěn test dle parametrů popsaných v evropské normě EN ISO 9227 NSS a všechny testované vzorky byly vystaveny koroznímu prostředí. Následně byly prováděny průběžné kontroly, po 120, 240 a 480 hodinách byla pořízena fotodokumentace. Po 480 hodinách byl test ukončen.



Obr. 25 Uložení vzorků v solné komoře.

Pro každý druh povrchové úpravy byla pro SST připravena sada vzorků. Šest z nich bylo bez jakékoliv další manipulace vloženo do solné komory. Následovaly tři vzorky, které byly před vložením do komory utaženy do speciálního přípravku (viz obr. 26), který zde nahradil originální protikus (těhlici) v automobilu. Hodnota utahovacího momentu byla použita dle specifikace pro tento díl (105 – 115) Nm. U testovaných vzorků bylo sledováno, zda je povrchová vrstva odolná otěru a při utahování těhlice nedojde k poškození vrstvy. Tím by se výrazně snížila korozní odolnost, která musí být dodržena i při opětovné montáži.



Obr. 26 Přípravek nahrazující těhlici.

Pro povrchovou vrstvu Zn-Ni byly použity ještě další 3 vzorky, které byly dodány na rozdíl od ostatních dílů bez dodatečného chromátování a zapečetění. Porovnáním těchto vzorků s ostatními bylo zjišťováno, zda je nutná aplikace chromátu se zapečetěním nebo postačí samotná Zn-Ni slitina bez další ochrany.

4.1.1 Kulový čep bez povrchové úpravy

Kulový čep bez povrchové úpravy se stále v některých případech užívá, bohužel jeho korozní odolnost je téměř nulová, nechráněná nízkolegovaná chromová ocel koroduje v prostředí chloridových iontů velice rychle (viz obr. 27, 28).



Obr. 27 Kulové čepy bez povrchové ochrany před testem.



Obr. 28 Kulové čepy bez povrchové ochrany po 72 hodinách.

Díly bez povrchové úpravy byly testovány pro srovnání s ostatními druhy povlaků, ale již po 72 hodinách v prostředí solné mlhy je více než 40% povrchu pokryto korozními zplodinami. Po delší expozici by došlo ke zkorodování celého povrchu rovnoměrnou korozí. Test byl ukončen po 240 hodinách (viz obr. 29), povrch byl téměř pokrytý červenou korozí.



Obr. 29 Kulové čepy bez povrchové ochrany po 240 hodinách.

4.1.2 Ionitox

V současnosti nejužívanější technologií povrchové úpravy je kombinace karbonitridování s oxidací, která by měla dle dodavatele zaručit 240 hodin v solné komoře bez červené koroze (viz obr. 30). Vrstva oxidů silná 1 – 3 μm a složená převážně z magnetitu Fe_3O_4 brání kontaktu s korozním prostředím a prodlužuje tak dobu do vzniku koroze.



Obr. 30 Technologie Ionitox aplikovaná na čepch před testem.

U této povrchové úpravy nebylo nutné chránit kouli před agresivitou prostředí, neboť technologie umožňuje ochránit celý čep. Bohužel právě koule je kritická oblast, neboť se z důvodu dosažení požadované drsnosti dodatečně leští a oxidační vrstva se tak částečně odstraňuje. Proto byl při vyhodnocení kladen důraz především na kužel a závit.

Pro testování bylo připraveno 9 vzorků, šest z nich bylo vloženo do solné komory ihned po vizuální kontrole, zbylé tři byly upnuty do přípravku, vyjmuty a následně vloženy do komory k ostatním vzorkům. Kulové čepy chráněné Ionitoxem by měly vydržet dle normy 240 hodin SST, ale již po 5 hodinách expozice (viz obr. 31) se objevily první známky červené koroze.



Obr. 31 Začínající červená koroze na čepu chráněném Ionitoxem.

Koroze základního kovu začala postupně narůstat na dalších místech, největší rozsah poškození byl pozorován na závitech. Zde se nachází mnohem více nehomogenních míst než na kuželu a hrozí zde vznik makroclánků. Také přístup kyslíku je rozdílný, k vnitřnímu průměru závitu se kyslík dostává obtížněji než k vnějšímu a může docházet k aeraci. Po uplynutí 240 hodin testu byla provedena kontrola vzorků a test byl ukončen. U všech devíti vzorků se koroze základního kovu objevila v oblasti závitu, u třech vzorků koroze napadla oblast na kuželi (viz obr. 32 a 33). Rozdíly mezi vzorky, které byly upnuty do přípravku, a vzorky bez mechanického zatížení, nebyly pozorovány.



Obr. 32 Zkorodované závit na čepch (Ionitox) po 240 hodinách SST.



Obr. 33 Červená koroze znehodnocující kužel čepu (Ionitox) po 240 hodinách SST.

Výsledky testu ukázaly, že korozní odolnost karbonitridovaných čepů s následnou oxidací nesplňuje základní požadavek normy, 240 hodin v solné mlze. Problematickou je nekompaktní vrstva oxidů, která v nehomogenním místě umožňuje koroznímu prostředí proniknout k základnímu kovu. Výsledek testu u této technologie závisí na kvalitě provedení, především na době oxidace a čistotě plynu. Z předchozích zkušeností je 240 hodin v solné mlze pro tuto technologii hranicí, kdy výsledek je někdy vyhovující, v jiných případech nikoliv.

4.1.3 Geomet

Korozní odolnost disperzního nátěru s lamelami zinku a hliníku, v tomto případě obchodní název Geomet, je dobře známá. Zinek působí v nátěru jako katodická ochrana a v navrhnutém případě je zde ještě vrchní utěšňovací vrstva, která zde funguje jako bariéra. Pokud nedojde k poškození vrchní vrstvy, povlak by měl dle dodavatele vydržet i 1000 hodin v SST. I při narušení utěšňovací vrstvy je zde stále zinek jako obětovaná ochrana, která chrání kovový povrch vlastní degradací. Vzniká zde tzv. bílá koroze. Pro testování v solné mlze bylo připraveno 9 vzorků, opět bylo do komory vloženo šest ihned po kontrole povrchu (viz obr. 34) a zbylé tři byly před testem upnuty do přípravku.



Obr. 34: Disperzní nátěr Geomet před testem.

Při kontrole po 120 hodinách expozice nevykazovala povrchová úprava žádnou velkou změnu, na všech dílech byl patrný pouze slabý šedý závoj, který ještě není považován za projev koroze. Pouze u jednoho kulového čepu, který byl upínán do přípravku, se objevily drobné body korozních produktů základního materiálu (viz obr. 35), což může být způsobeno právě upínáním. Pravděpodobnou příčinou projevu červené koroze mohou být kovové nečistoty z nechráněné kovové matice nebo povrch poškozený třením.



Obr. 35 Červená koroze na závitě čepu s Geometem po 120 hodinách SST.

Kontrola při 240 hodinách potvrdila vysokou korozní odolnost této technologie, ani jeden vzorek nevykazoval jakékoliv napadení, neprojevila se zde ani zinková bílá koroze (viz obr. 36). Body červené koroze, které se objevily u jednoho vzorku po 120 hodinách, nezměnily vzhled, okolní oblast nebyla zasažena. Z toho lze usuzovat, že nedošlo k prokorodování povrchové vrstvy, ale jsou to pouze nečistoty z kovové matice.



Obr. 36 Vzorky s Geometem po 240 hodinách SST.

Solný test byl ukončen po 480 hodinách, všechny vzorky byly vyjmuty a očištěny od úsad soli pod tekoucí vodou. Vzorky, se kterými nebylo před testem manipulováno, prokázaly vysokou korozní odolnost vrstvy ze zinkových a hliníkových lamel (viz obr. 37).



Obr. 37 Vzorky s Geometem po 480 hodinách SST.

Nebyla zde objevena žádná významná změna povrchu. Povrch čepu se pokryl slabou bílou vrstvou, která se ještě nepovažuje za projev koroze. Naproti tomu u vzorků, které byly před testem upnuty do přípravku, a tím byl jejich povrch vystaven mechanickému namáhání, se objevily oblasti se začínající bodovou korozí. Část korozních produktů vznikla kvůli nečistotám naneseným na závit při utahování do přípravku z kovové matice. Avšak příčinou bodové koroze na kuželu není usazená nečistota, ale prokorodování povrchové vrstvy z důvodu mechanického poškození při utahování do přípravku (viz obr. 38). Ukazuje se zde, že tento povlak má poměrně nízkou odolnost proti tření a vrstvy nedosahují potřebné tvrdosti.



Obr. 38 Díl s Geometem upnutý před testem do přípravku, viditelná červená koroze, 480 hodin SST.

Povrchová ochrana Geomet prokázala nesporně vysokou korozní odolnost, problémem může být její nižší odolnost proti mechanickému namáhání. Základní požadavek 240 hodin však splňuje bez defektů, proto může být doporučena pro chránění kulových čepů.

4.1.4 Slitina zinek – nikl

Slitina Zn-Ni splňuje ze současných korozních ochran ty nejvyšší nároky, a díky tomu je výrobci automobilů často požadována. V TRW - DAS se tímto způsobem nechávají pokovovat těla kloubů nebo táhla řízení. Pro kulové čepy zatím nebyla tato technologie použita, jak sériově, tak ani na prototypových vzorcích.



Obr. 39 Galvanicky pokovené díly slitinou Zn-Ni před testem.

Pro test bylo u této technologie připraveno 12 vzorků. Všech dvanáct bylo galvanicky pokoveno slitinou Zn-Ni a devět z nich bylo ještě následně chromátováno bezbarvým chromátem a následně zapečetěno slabou vrstvičkou laku (viz obr. 39), pro porovnání výdrže utěsněných a neutěsněných dílců. Tři z devíti kompletně chráněných vzorků byly opět utaženy do přípravku. Bohužel u této technologie nebylo možné chránit kouli před nanesením povlaku a před samotným testováním byl předpoklad, že povrch nesplní požadavek na drsnost. Proto byla nutná následná operace soustružení a válečkování koule, aby byl parametr dodržen. Nechráněná koule by rychle korodovala a korozní produkty by mohly ovlivnit výsledek, proto byla koule chráněna fólií a lepicí páskou.

Všechny vzorky byly uloženy do solné komory stejným způsobem jako u dalších technologií. První kontrola byla provedena po 120 hodinách, vzorky byly opláchnuty proudem vody tak, aby byla odstraněna usazená sůl a nemohlo dojít k záměně s bílou zinkovou korozí.



Obr. 40 Galvanicky pokovené díly slitinou Zn-Ni po 120 hodinách SST.

Všech dvanáct vzorků vykazovalo po 120 hodinách v solné mlze tzv. zinkový závoj, který ještě není považován za projev koroze. U prvních dvou čepů se objevila bílá zinková koroze. V těchto místech vzniklo bodové napadení, které se postupně rozrostlo do kruhového tvaru o průměru přibližně 5 mm (viz obr. 41).



Obr. 41 Zinková koroze po 120 hodinách SST.

Po předepsaných 240 hodinách, což je v současné době minimální požadavek na výdrž protikorozní ochrany kulových čepů, se u zinko-niklové slitiny neobjevily žádné projevy koroze základního materiálu (viz obr. 42).

Bílou zinkovou korozí byly napadeny 3 vzorky čepu, rozsah tohoto napadení však nebyl závažný, korozní produkty pokrývaly méně než 10% povrchu bez výrazného objemového nárůstu zplodin. Zn-Ni povlak tak splňuje základní požadavek normy.



Obr. 42 Čepy chráněné Zn-Ni slitinou po 240 hodinách SST.

Vzorky, u kterých byl povlak před testem namáhán utažením do přípravku, nevykazovaly po 240 hodinách SST žádný viditelný rozdíl oproti dílům bez manipulace. Naproti tomu u vzorků, které nebyly po pokovení slitinou následně chromátovány a utěsněny (viz obr. 43), došlo k masivnějšímu nárůstu bílé koroze téměř po celém povrchu. Vzorky však stále splňují podmínku normy, a pokud bílá koroze „nenaroste“ takovým způsobem, že by znemožňovala demontáž, můžeme je považovat za vyhovující.



Obr. 43 Čepy se Zn-Ni bez chromátu a utěsnění po 240 hodinách SST.

Test pokračoval dalších 240 hodin a po této době byl ukončen. V současné době je dvojnásobná doba požadovaná na základě přání zákazníků a další pokračování testu by nemělo pro tento účel praktický důvod. Vzorky byly omyty pod tekoucí vodou a podrobeny kontrole. Po skončení testu, tedy 480 hodinách, se na vzorcích neobjevila žádná červená koroze, rozsah bílé koroze byl téměř totožný jako po 240 hodinách SST (viz obr. 44). Výsledek testu u vzorků, které byly před testem upnuty do přípravku, dopadl stejně. Povrch byl bez červené koroze, pouze s několika body bílé koroze.



Obr. 44 Čepy se Zn-Ni slitinou po skončení testu, po 480 hodinách SST.

Taktéž vzorky, které nebyly po pokovení dodatečně chromátovány a utěsněny, splnily parametry testu, pouze bílá koroze pokryla celý povrch čepu, v oblasti kužele je viditelnější než na závitě (viz obr. 45).



Obr. 45 Čepy se Zn-Ni slitinou po skončení testu, po 480 hodinách SST.

Výsledek testu na vzorcích s galvanickým povlakem Zn-Ni je vyhovující, z korozního hlediska může být tato povrchová úprava doporučena k ochraně kulových čepů. Dle dodavatele je rozdíl ceny mezi díly s dodatečným chromátováním a utěsněním a díly bez následných úprav minimální. Proto není třeba se zabývat díly bez těchto úprav a pro závěrečné hodnocení je směrodatný výsledek pro pokovené čepy s dodatečným chromátováním a utěsněním.

4.1.5 Povlak DLC

Povlak, vytvořený nanesením DLC vrstvy, je z korozního hlediska velkou neznámou. Sama o sobě je tato vrstva vysoce inertní vůči chemikáliím, tudíž i v 5 % roztoku NaCl. Problémem je zde proces nanášení, při kterém je poměrně obtížné dosáhnout absolutní čistoty, a do nanášené vrstvy se dostávají nečistoty a vytváří se tak nehomogenní vrstva. To může v nechráněných místech způsobovat bodovou korozi. Dalším problémem může být velmi slabá vrstva, která se pohybuje v rozmezí od 1 μm do 10 μm . Požadovaná vrstva u připravených vzorků je 2 μm , ale doba nanášení u takhle slabého povlaku je 8 hodin. Pro tento test byly připraveny pouze 3 vzorky pro SST bez další manipulace (viz obr. 46) a jeden vzorek byl upnut do přípravku a poté byl také vložen do komory pro provedení SST.



Obr. 46 Čepy s DLC povlakem připravené do solné komory.

Již 24 hodin expozice v solné mlze ukázalo, že korozní odolnost DLC vrstvy nanesené na testovaný druh čepu je velice malá. V místech, kde je vrstva nehomogenní, došlo ke vzniku červené bodové koroze (viz obr. 47).



Obr. 47 Vzorky (DLC) po 24 hodinách expozice v solné komoře.

Test byl ukončen po 240 hodinách (viz obr. 48), kdy již vzorky vykazovaly značné poškození korozí. Korozní zplodiny pokrývaly téměř 50 % povrchu čepu, na povrchu se vytvořila nerovnoměrná koroze.



Obr. 48 Vzorky (DLC) po 24 hodinách expozice v solné komoře.

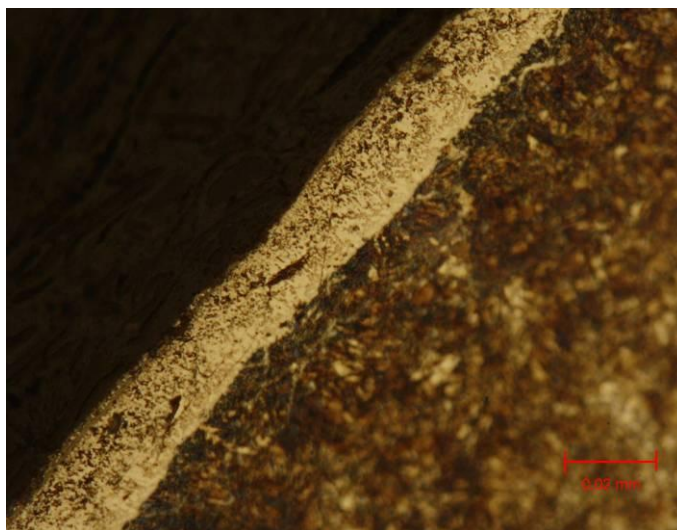
Z korozního hlediska je DLC povlak nevyhovující povrchovou úpravou, nevyhověl ani základnímu požadavku 240 hodin SST. Jak již bylo zmiňováno, problémem je technologie nanášení vrstvy. Pro nanesení kvalitnějšího povlaku by bylo potřeba dosáhnout absolutní čistoty procesu

a zároveň větší tloušťky povrchové vrstvy, aby dokonale chránila základní materiál před napadením. Zde je třeba dosáhnout izolačního účinku vrstvy.

4.2 Metalografická analýza

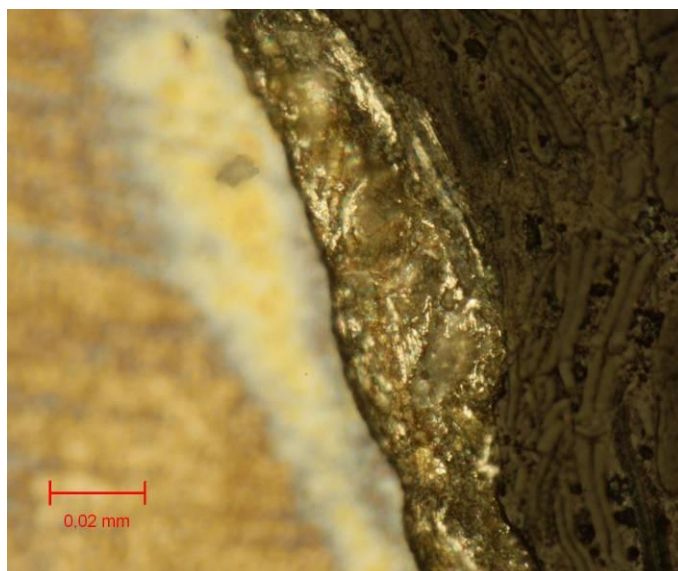
Téměř celá příprava vzorků pro pozorování byla popsána v kapitole 2.4.2. Poslední operací, která byla popsána pouze obecně, je leptání. Pro tuto část přípravy byl použit 4 % roztok nitalu (4 % kyseliny dusičné, 96 % etanolu). U leptání bylo také velice důležité dodržet správnou dobu leptání. U vrstev na bázi zinku bylo leptáno velmi krátkou dobu, cca jednu vteřinu. Pokud by bylo leptáno delší čas, došlo by k naleptání povrchové vrstvy, která by pak byla těžko rozeznatelná od kovové matrice. Ostatní vzorky byly leptány standardní dobu 4 vteřin. Vyhodnocení bylo provedeno pod světelným mikroskopem, výstupem byly snímky pořízené při zvětšení 1000x.

Prvním hodnoceným vzorkem byl karbonitridovaný díl (viz obr. 49), u kterého byla pozorována hloubka karbonitridace, ale zároveň také oxidační vrstvička. Ta je pro korozní odolnost nedůležitější, neboť chrání povrch karbonitridované vrstvy před napadením. Průměrná měřená hloubka karbonitridace má hodnotu 21 μm a je rovnoměrně silná po celém obvodu rozřezu. Tloušťka oxidační vrstvy se pohybuje od 1 do 2 μm . V některých místech je ale patrný povrch bez oxidační vrstvy.



Obr. 49 Karbonitridovaná vrstva s bílým oxidačním povlakem, 1000x zvětšeno.

Druhým pozorovaným vzorkem byl rozřez čepu s povrchovou úpravou Geomet (viz obr. 50). Z pozorovaného rozřezu bylo zjištěno, že tloušťka vrstvy nanesených lamel není rovnoměrná. Minimální naměřená hodnota byla $8\text{ }\mu\text{m}$ a největší tloušťka byla naměřena v hodnotě $36\text{ }\mu\text{m}$. To bohužel nespĺňuje požadavek, který byl stanoven na $6\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$. Tato vada ovality by mohla v některých případech způsobovat větší tření a vyšší tlak v místech s větší tloušťkou vrstvy, mohlo by zde dojít k poškození povlaku a prokorodování. Kompaktnost vrstvy je ale výborná, po celém obvodu je základní materiál krytý vrstvou o minimální tloušťce $8\text{ }\mu\text{m}$.



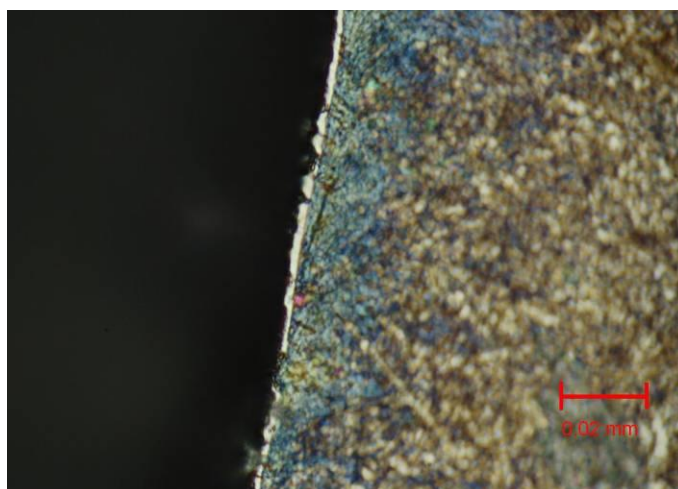
Obr. 50 Nerovnoměrná vrstva Geomet pohybující se od $20\text{ }\mu\text{m}$ do $36\text{ }\mu\text{m}$,
1000x zvětšeno.

Dalším zkoumaným dílem byl vzorek s povrchovou vrstvou galvanicky nanesené Zn-Ni slitiny (viz obr. 51). Zde bylo třeba postupovat opatrně při leptání, aby nedošlo k poškození vrstvy a ta nesplynula s okolní hmotou. Díky způsobu povlakování, tedy galvanickému pokovení, bylo možné z připraveného rozřezu zjistit, že tloušťka zinko-niklové vrstvy je velmi rovnoměrná a její hodnota je $9\text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 51 Rovnoměrná vrstva slitiny Zn-Ni, tloušťka 9 μm , 1000x zvětšeno.

Poslední vzorek, který byl zkoumán pomocí mikroskopu, byl díl s povrchovou úpravou DLC (viz obr. 52). Výsledek je dle obrázku nevyhovující, po celém obvodu rozřezu jsou patrná místa, kde není DLC vrstva kompaktní, tudíž se dá očekávat rychlý nástup koroze základního materiálu.



Obr. 52 Velmi nekompaktní vrstva DLC s maximální tl. 2 μm , 1000x zvětšeno.

4.3 Mikrotvrdost

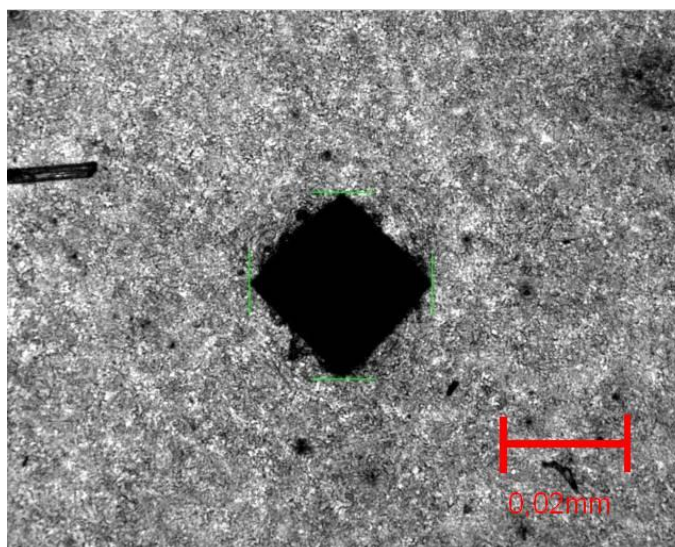
Naměřené hodnoty jednotlivých vzorků jsou shrnuty do tab. 4.1 a na snímcích (obr. 53–57) je možno vidět vždy jeden z provedených vpichů Vickersovou zkouškou mikrotvrdosti na všech povrchových vrstvách, pro srovnání je uvedeno i měření tvrdosti kulového čepu bez jakékoliv úpravy.

Výsledná hodnota tvrdosti u každého vzorku byla vypočtena jako aritmetický průměr z 5 měření, celé měření bylo provedeno dle evropské normy ČSN EN ISO 6507-1. Tvrdost povrchu ovlivňuje odolnost proti opotřebení a s tím je spojená i korozní odolnost dílů, které jsou mechanicky namáhány, v tomto případě dílů upínaných do těhlice.

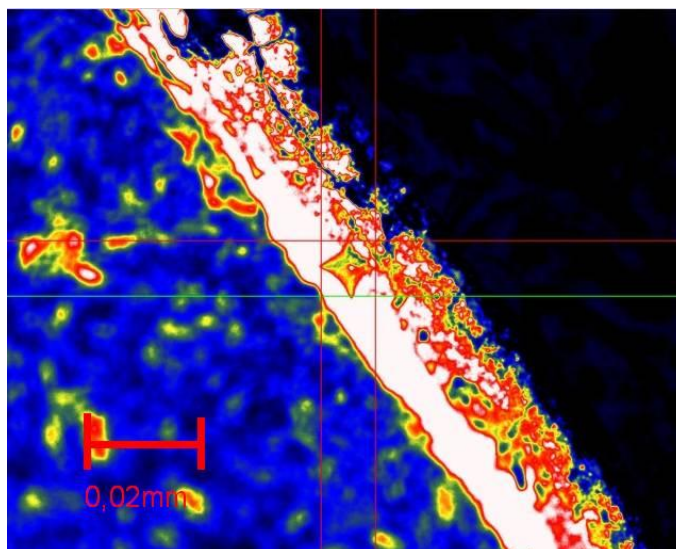
Tab. 4.1 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti.

	HV	1	2	3	4	5	Σ
ocel 41CrS4V	0,2	278	285	286	272	287	282
Ionitox	0,025	603	682	668	641	653	649
Geomet	0,1	155	143	168	141	137	149
Zn-Ni	0,1	417	394	465	417	428	424
DLC	0,2	1923	2190	2248	1970	2033	2073

Dále byla u vzorku s Ionitoxem provedena kontrola nitridační hloubky pomocí testu, kdy byly prováděny vpichy při zatížení HV5 postupně od okraje vzorku, až do doby, kdy se hodnota tvrdosti výrazně snížila k hodnotě tvrdosti jádra. Velikost jednotlivých kroků měření byla 0,05 mm a výsledná hloubka nitridace byla u měřeného vzorku 0,27 mm.

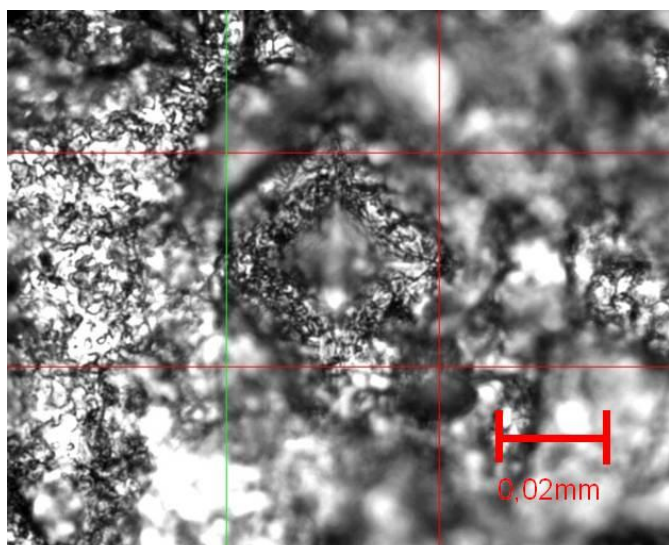


Obr. 53 Ocel 41CrS4V bez povrchové úpravy – HV 278, zvětšeno 1000x.

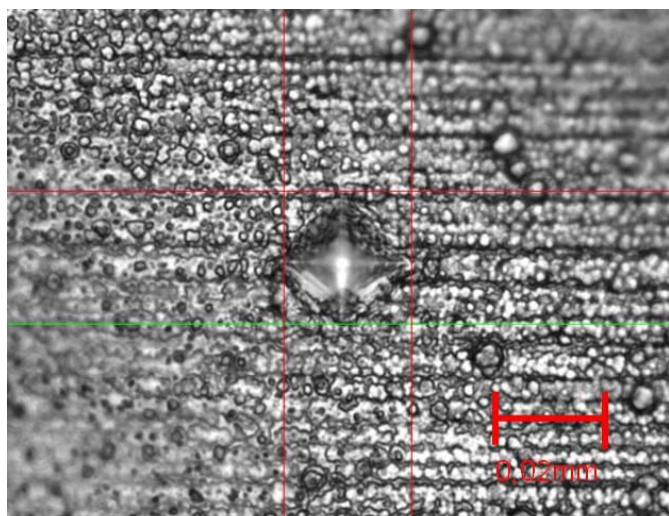


Obr. 54 Čep s aplikovanou technologií Ionitox – HV 603, zvětšeno 1000x.

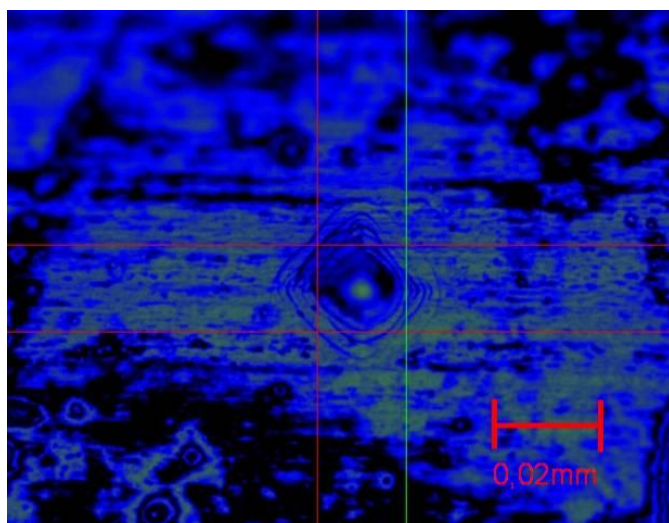
Nízká hodnota mikrotvrdosti u vrstvy Geomet je způsobena jednak nižší tvrdostí samotného zinku a hliníku, ale také nehomogenitou struktury. Zde může docházet při mechanickém namáhání, např. interakce matice – závit, k poškození vrstvy a podkorodování. Zbylé povrchové úpravy zvyšují kvalitu povrchu, resp. jeho tvrdost a pevnost. Druhým extrémem je vrstva DLC, která vykazuje vysokou tvrdost díky uhlíkovým částicím s vlastnostmi podobnými diamantu. Ta zvyšuje odolnost povrchu proti opotřebení.



Obr. 55 Povrchová vrstva Geomet – HV 603, zvětšeno 1000x.



Obr. 56 Galvanický povlak zinek/nikl – HV 417, zvětšeno 1000x.



Obr. 57 Vrstva DLC – HV 1923, zvětšeno 1000x.

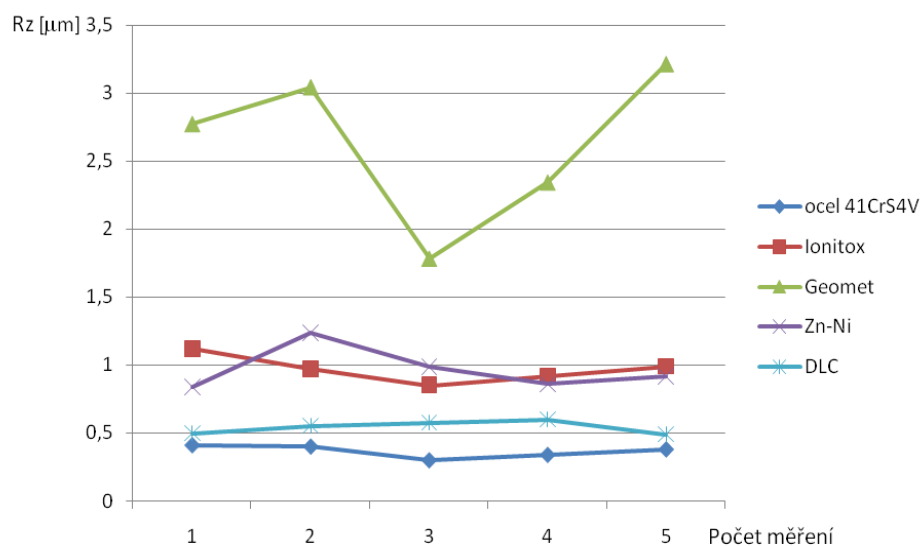
4.4 Drsnost povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno z důvodu ověření požadovaných parametrů a také prověření, zda je možné povrchovou úpravu použít pro chránění koule či nikoliv. Čepy s povrchovou úpravou Ionitox splňují požadavek a mohou být chráněny po celém povrchu, u DLC byl předpoklad podobného výsledku. Naopak u povrchové vrstvy Geomet se dal očekávat nevyhovující výsledek. Zinko-niklová vrstva by měla teoreticky vyhovovat předepsanému parametru. Každý čep byl měřen na kuželu a kouli. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce 4.2.

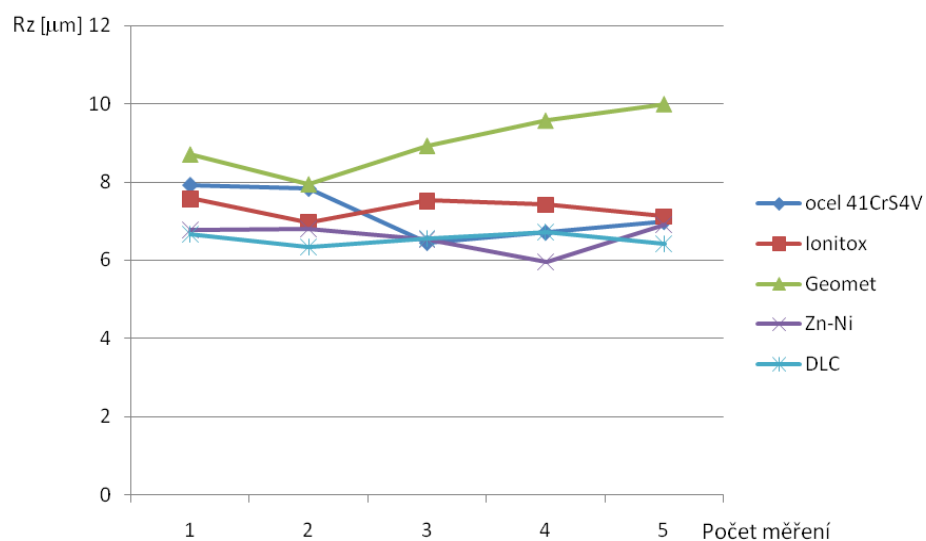
Tab. 4.2 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu.

	Koule ($R_z < 1,5$)					Σ	Kužel					Σ
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
ocel 41CrS4V	0,41	0,40	0,30	0,34	0,38	0,37	7,91	7,82	6,45	6,71	6,98	7,17
Ionitox	1,12	0,97	0,85	0,92	0,99	0,97	7,58	6,97	7,52	7,43	7,12	7,32
Geomet	2,77	3,04	1,78	2,34	3,21	2,63	8,70	7,94	8,92	9,56	9,98	9,00
Zn-Ni	0,84	1,24	0,99	0,86	0,92	0,97	6,77	6,79	6,52	5,96	6,91	6,59
DLC	0,50	0,55	0,58	0,60	0,49	0,54	6,67	6,34	6,55	6,72	6,42	6,54

Graf. 4.3 Měření drsnosti povrchu na kouli čepu.



Graf. 4.4 Měření drsnosti povrchu na kuželu čepu.



5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola je věnována ekonomickému vyhodnocení jednotlivých variant povrchových úprav a nákladů spojených s jejich provedením. Vysoká korozní odolnost povrchové úpravy ještě nezaručuje vhodnost použití pro daný výrobek, v tomto případě pro kulový čep. Každý výrobce se v současné době snaží, aby firma prosperovala a pohybovala se v „zelených“ číslech. Získat výhodu nad konkurencí může dvěma způsoby. Prvním je diferenciací, odlišení se od zbytku konkurence a nabízení zcela odlišného produktu. Druhým způsobem je minimalizace nákladů, a právě tento způsob využívá firma TRW - DAS Dačice. Dačický závod nevyrábí žádné své vlastní produkty, ale vše je dodáváno dle dokumentace zákazníka.

Pro výpočet a porovnání jednotlivých technologií bylo u jednotlivých dodavatelů shodně poptáno 50 000 ks čepů jako měsíční dodávka. Každý druh kulového čepu je produkován v rozdílném množství, některé ve velmi malých dávkách, jiné daleko přesahují zvolené množství. Pokud by se vyráběné množství řádově lišilo od této dávky, bylo by potřeba provést novou kalkulaci ceny. Do kalkulace byly zahrnuty veškeré činnosti spojené s aplikací povrchové úpravy u dodavatele, kromě fixního výdaje za zařízení pro uchycení čepů. Fixní náklad je uváděn z důvodu komplexnosti popisu, předpokládá se, že by byl tento jednorázový výdaj rozpočítáván do minimálně roční produkce. Vše je přehledně shrnuto do tabulky 5.1.

Tab. 5.1 Náklady spojené s povrchovými úpravami.

Množství: 50 000 ks/dávka	Náklady fixní (přípravky)	Náklady variabilní na jednotku
Ionitox - Bodycote	-	9,60 Kč
Geomet - Benseler GmbH	110 000 Kč	7,20 Kč
Zn-Ni - CVP Příbram	45 600 Kč	3,90 Kč
DLC - HVM Plasma	37 500 Kč	38,50 Kč

Důležitým údajem, který musí být vždy spojen s náklady na povrchovou úpravu, je náklad na dopravu, balení a skladování. V tomto případě však nelze vykalkulovat konkrétní částky, neboť dodavatelů navržených povrchových úprav je na trhu dost a náklady na dopravu budou záviset na vzdálenosti dané firmy. Náklady na balení a skladování jsou v tomto případě též irelevantní, neboť přímo nesouvisí s typem povrchové úpravy, budou hrazeny ve stejné výši nezávisle na jejím typu.

Z finančního hlediska lze doporučit galvanicky nanášenou slitinu zinek-nikl, která je při své ceně 3,90Kč za pokovení jednoho testovaného čepu nákladově nejvýhodnější. Při odhadované roční produkci 10 milionů kusů by při změně technologie došlo k **úspoře 57 milionů Kč** za rok. To je ovšem způsobeno tím, že stávající firma je německá firma s vyšší cenou než poptávaná česká firma. Technologie zároveň splňuje požadavky na zvýšenou korozní odolnost a i další parametry jsou vyhovující pro její využití. Jako druhou alternativu by bylo výhodné zvolit povrchovou ochranu ze zinkových a hliníkových lamel, v tomto konkrétním případě Geomet. Korozní odolnost je dobrá, splňuje požadavky, problémy se objevují pouze v oblasti rovnoměrnosti tloušťky vrstvy. Poptávaný dodavatel je zahraniční společnost se sídlem v Německu, dá se tedy očekávat vyšší náklad na provedení povrchové úpravy. Bylo by tedy vhodné zaměřit se na dodavatele v tuzemsku, kde bude cena za provedení zcela jistě nižší.

Stávající technologie ionitox a povlak DLC, nanesený metodou PACVD, nesplňují základní požadavek 240 hodin v solné mlze. Nákladově jsou méně výhodné než první dvě zmiňované metody. Stávající technologii Ionitox jako jedinou nezatažuje fixní náklad, ale při předpokládané roční produkci to nebude mít na konečnou jednotkovou cenu velký vliv. DLC povlak je v současné době drahou ochranou, a není proto vhodnou volbou.

6 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Cílem diplomové práce bylo navrhnout technologie povrchové úpravy kulového čepu a vyhodnotit jejich vliv na funkčnost a korozní odolnost. Kulový čep je vyráběn z nízkolegované chromové oceli 41CrS4V a po obrábění není dále tepelně zpracováván. Produkované množství je závislé na poptávce a odvolávkách, ročně se pohybuje okolo 10 milionů kusů různých typů kulových čepů.

V současnosti je v 99 % montována varianta s povrchovou úpravou Ionitox, což byla jedna z navrhovaných a vyhodnocovaných technologií. Výběr vhodné technologie byl proveden pomocí návrhu několika možných variant a jejich srovnáním pomocí testů, které byly předem specifikovány v kap. 2.4. Taktéž byly konkretizovány požadavky na vlastnosti a způsob provedení jednotlivých technologií povrchových úprav. Více se tématu věnuje celá kapitola 3, o technologiích povrchových úprav pojednává kap. 2.3.

Hlavním požadavkem na povrchovou ochranu, který je v současné době vyžadován většinou výrobců automobilů, byla korozní odolnost čepu. Standardní hodnota předepsaná v normách je 240 hodin v neutrální solné mlze, test byl proveden po dobu 480 hodin. Ze čtyř navrhovaných technologií byla vyhodnocena jako nejúčinnější technologie galvanického povlakování slitinou zinek-nikl. Koroze základního kovu se za celou dobu testu neprojevila, pouze bílá zinková koroze. Technologie disperzního nátěru se zinkovými a hliníkovými lamelami také splnila požadavky testu. Bylo však odhaleno, že tato vrstva není odolná proti mechanickému opotřebení, a test prokázal, že může dojít k poškození a prokorodování. Zbývající technologie, nesplnily základní požadavek na 240 hodin a jsou nevyhovující.

V návaznosti na SST byly provedeny další testy, kterými byly zjišťovány další vlastnosti a parametry povrchových vrstev. Důležitými charakteristikami čepu, které následně ovlivňují funkční vlastnosti celého kloubu, jsou drsnost a ovalita povrchu koule, resp. kužele. Pomocí měření drsnosti povrchu a metalografické analýzy se potvrdilo, že požadavky udané výkresem splňují

tři technologie - Ionitox, DLC a také slitina Zn-Ni. Povrchová úprava Geomet zhoršuje jak drsnost povrchu, tak i ovalita je nevyhovující. Měření mikrotvrdosti ukázalo, že kromě Geometu, všechny povrchové úpravy zvyšují odolnost povrchu proti opotřebení.

Provedené testy prokázaly, že stávající technologie karbonitridace s oxidací Ionitox nesplňuje základní požadavek na korozní odolnost a bylo by vhodné ji nahradit galvanickým povlakováním slitinou zinek-nikl. Tato povrchová úprava se ukázala jako nejvhodnější náhrada za současnou technologii. Před samotným zavedením do procesu, by bylo vhodné provést další důležité testy, které by potvrdily vhodnost technologie. Především únavový test, aby se vyloučila vodíková křehkost a nedocházelo k praskání čepů v provozu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. TRW czech. *Fotogalerie* [online]. 2010 [cit. 2012-01-28] Dostupné z: <http://www.trwczech.cz/dacice/fotogalerie/vyroby>
2. ZDENĚK, J. a ŽDÁNSKÝ, B. *Automobily 1 - podvozky*. Brno: AVID, spol. s.r.o., 2004. 211 s. ISBN 978-80-87143-11-7.
3. Interní materiály TRW-DAS a.s. Dačice
4. CRAMER, Stephen D. a COVINO, Bernard S., Jr. *ASM Handbook, Volume 13A - Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. ASM International, 2003. 2597 s. ISBN: 0-87170-705-5
5. Sulzer Metco. *Thin film*. [online]. 2012 [cit. 2012-02-12] Dostupné z: http://thinfilm.sulzermetco.com/l_technologien_gb.html
6. PLÁŠIL, P. *Vliv tepelného namáhání na korozní odolnost povlakového systému Zn-Ni*. Liberec, 2010. 48 s. Bakalářská práce v oboru „Materiálové inženýrství“. Technická univerzita v Liberci, ústav materiálů. Vedoucí práce Ing. Vladimír Nosek.
7. ČSN ISO 8044. *Koroze kovů a slitin – Slovník*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 44 s. Třídící znak 038001.
8. NOVÁK, P. *Druhy koroze kovů* [online]. 2005 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/met/aki/>
9. KRUSE, J. *Mikrolegierte stähle für PKW Kugelzapfen* [online]. 2004 [cit. 2012-02-20]. Dostupné z <http://www.swisssteel.com/fileadmin/files/swiss-steel.com/documents/dokumente/>
10. BARTONÍČEK, R. a kol. *Koroze a protikorozní ochrana kovů*. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1966. 720 s.
11. ROBERGE, P. R. *Handbook of corrosion engineering*. New York: McGraw-Hill, 1999. 1128 s. ISBN 0-07-076516-2
12. ČSN ISO 9223. *Koroze kovů a slitin. Korozní agresivita atmosféry. Klasifikace*. Praha. Český normalizační institut. 1994. 16 s. Třídící znak 038203

13. NOVÁK, P. *Korozní účinky prostředí na kovy* [online]. 2009 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/met/stranky/>
14. KREIBICH, V. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 89 s. ISBN 80-01-01472-X.
15. NOVÁK, P. *Korozní praskání – teoretická část* [online]. 2008 [cit. 2012-03-11]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/met/stranky/>
16. Sulzer Metco Layer. [online]. 2006 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://sulzermetco.com/>
17. Siegener Verzinkerei Holding GmbH. *Zink different* [online]. 2012 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.zink-different.com/>
18. Geomet coatings. *Geomet* [online]. 2012 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.geomet.net/coatings.php>
19. Beltowska-Lehmana, E., Ozgaa, P., Swiateka, Z. a Lupib, C. *Electrodeposition of Zn-Ni protective coatings from sulfate – acetate baths* [online]. March 2002 [cit. 2012-03-20]. Dostupné prostřednictvím Science Direct, Elsevier: <http://www.sciencedirect.com/science/>
20. *Koroze působením makročlánku* [online]. 2008 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/met/stranky/>
21. WILCOX, G. D. a GABE, D. R. *Electrodeposited zinc alloy coatings* [online]. Pergamon Press Ltd. 25 April 2003 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010938X9390345H>
22. CHANDRASEKAR, M. S., SRINIVASAN, S. a PUSHPAVANAM, M. *Properties of Zinc alloyelectrodeposits produced from acid and alkaline electrolytes* [online]. Springer – Verlag. 11 July 2008 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/m25856n344175314/>
23. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
24. *DLC coatings – diamond-like carbon* [online]. 2009 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.richterprecision.com/dlc-coatings.html>

25. MONAGHAN, D. P., LAING, K. C., LOGAN, P. A., TEER, P. a TEER, D. G. *Diamond-like carbon coatings* [online]. 31 Jul 2001 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.azom.com/>
26. ČSN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. Praha. Český normalizační institut. 2006. 24 s. Třídící znak 038132
27. VANDER VOORT, G. F. *ASM Handbook, Volume 9 – Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004. 1433 s. ISBN: 0871707063.
28. *Historie měření mikrotvrdosti* [online]. 2012 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.struers.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Rz	- největší výška profilu nerovnosti povrchu	
OBJ	- outer ball joint (vnější kloub)	
IBJ	- inner ball joint (vnitřní kloub)	
CA	- control arm (rameno)	
e⁻	- elektron	
E_r	- rovnovážný potenciál	[V]
E_{r0}[°]	- standardní rovnovážný potenciál určený vzhledem k standardní vodíkové elektrodě	[V]
R	- molární plynová konstanta	[J.K ⁻¹ .mol ⁻¹]
T	- termodynamická teplota	[K]
z	- počet vyměněných elektronů při elektrochemické přeměně	
F	- Faradayova konstanta	[c.mol ⁻¹]
M^{z+}	- koncentrace iontů kovu v roztoku	
G	- Gibbsova energie	[c.mol ⁻¹]
m	- hmotnost	[Kg]
t	- čas	[s]
M	- molární hmotnost	[kg.mol ⁻¹]
I	- elektrický proud	[A]
RH	- relativní vlhkost	[%]
DLC	- diamond-like carbon	
Zn-Ni	- slitina zinek-nikl	
PVD	- physical vapour deposition	
IBD	- ion beam deposition	
PACVD	- plasma assisted chemical vapour deposition	
CVD	- chemical vapour deposition	
HIPIMS	- high power impuls magnetron sputtering	
CFUBMS	- closed field unbalanced magnetron sputtering	
SST	- salt spray test (test solnou mlhou)	
HV	- tvrdost podle Vickerse	

SEZNAM PŘÍLOH:

1. Výkres kulového čepu – průměr koule 35 mm

Příloha 1

