

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kataforetické lakování vysokopevnostních šroubů hromadným
způsobem

Václav Veverka

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veverka** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **434063**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kataforetické lakování vysokopevnostních šroubů hromadným způsobem

Název bakalářské práce anglicky:

Bulk Cataphoresis Coating of high-strength Screws

Pokyny pro vypracování:

1. Povrchové úpravy vysokopevnostních šroubů
2. Rozbor sledované problematiky KTL drobných dílů
3. Povlakování vysokopevnostních šroubů KTL hromadným způsobem
4. Ověření a porovnání vlastností vyloučených KTL povlaků

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Drašnar, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Kamil Hylák, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**


Ing. Petr Drašnar, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

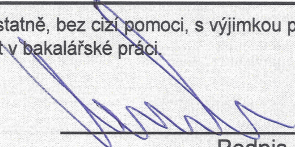

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

07.05.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Autor:	Václav Veverka
Název bakalářské práce:	Kataforetické lakování vysokopevnostních šroubů hromadným způsobem
Rozsah:	Počet stran: 50 Počet obrázků: 35 Počet příloh: 3
Akademický rok:	2018/2019
Obor studia:	Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Petr Drašnar, Ph.D.
Zadavatel:	Fakulta strojní ČVUT v Praze
Abstrakt:	<p>Cílem bakalářské práce je výběr vhodných parametrů kataforetického procesu při hromadném povlakování vysokopevnostních šroubů, zvolení vhodných předúprav povrchu pod kataforetické lakování (KTL) a poté ověření korozní odolnosti povlaku ve zkušební solné komoře. V první části se práce věnuje korozi a jejímu negativnímu vlivu na materiály pracující v korozním prostředí, ochranou povrchů proti korozi, úpravám povrchů vysokopevnostních šroubů a rozbořem problematiky kataforetického lakování hromadným způsobem. Druhá část se zabývá provedením zvolených předúprav a povlakování kataforezní nátěrovou hmotou. Dále jsou provedeny korozní zkoušky v neutrální solné mlze (NSS), metalografický výbrus a vyhodnocení výsledků práce.</p>
Klíčová slova:	Kataforezní lakování, vysokopevnostní šrouby, koroze, fosfátování, hromadné povlakování šroubů, předúpravy povrchu.

Annotation

Author: Václav Veverka
Topic: Bulk Cataphoresis Coating of high-strength Screws
Summary: Pages: 50
Pictures: 35
Attachments: 3

Academic year: 2018/2019
Field of study: Production and Economics in Mechanical Engineering
Thesis supervisor: Ing. Petr Drašnar, Ph.D.
Authority: Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague

Abstract: The aim of the bachelor thesis is the selection of suitable parameters of the cataphoretic process during mass coating of high-strength screws, selection of suitable surface pretreatment under cataphoretic painting and then verification of corrosion resistance of the coating in the test salt chamber. The first part deals with corrosion and its negative influence in materials working in corrosive environment, protection of surfaces against corrosion, surface treatment of high-strength screws and analysis of problems of cataphoretic painting in bulk. The second part deals with the implementation of selected pretreatment and coating with cataphoresis paint. Neutral salt spray corrosion tests (NSS), metallographic cuts and evaluation of work results are also performed.

Key words: Cataphoretic coating, high strength bolts, corrosion, phosphating, mass bolt coating, pre-treatment of the surface.

Prohlášení o autorství:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vytvořil samostatně, s použitím literatury uvedené v seznamu citovaných zdrojů na konci práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: _____

Václav Veverka

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Petru Drašnarovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a rady, které mi pomohly dokončit mou závěrečnou práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Hylákovi za připomínky a pomoc v laboratořích při experimentální části práce. Děkuji také pracovníkům Ústavu strojírenské technologie za odbornou pomoc při zpracování této práce. Poděkování patří také mé rodině za podporu po celou dobu studia.

Tento výzkumný projekt byl realizován za podpory Technologické agentury České Republiky, projekt TH02020019 - Vývoj nové technologie pro hromadné povlakování elektroforetickými nátěrovými systémy.

Obsah

Úvod	9
Teoretická část	10
1 Koroze kovových materiálů.....	10
1.1 Definice koroze [4] [7]	10
1.2 Chemická koroze kovů [2] [25]	12
1.3 Elektrochemická koroze kovů [2] [25]	12
1.4 Rozdělení koroze podle korozního napadení [3] [7].....	12
1.4.1 Rovnoměrná koroze.....	12
1.4.2 Nerovnoměrná koroze [1].....	13
2 Ochrana povrchu proti korozi [11] [14].....	15
2.1 Vhodná volba materiálu [10]	15
2.2 Konstrukční uspořádání	15
2.3 Úprava korozního prostředí	15
2.4 Elektrochemická ochrana kovů proti korozi	15
2.4.1 Katodická ochrana	16
2.4.2 Anodická ochrana	16
2.5 Bariérová ochrana [6] [9].....	16
2.5.1. Plastové povlaky.....	16
2.5.2. Nátěrové hmoty	16
3 Povrchové úpravy vysokopevnostních šroubů [12] [13] [15]	17
3.1 Niklování	17
3.2 Chromování	17
3.3 Pomosazování, pomědění a postříbření	17
4 Rozbor sledované problematiky KTL drobných dílů [30]	18
4.1 Kataforetické lakování [19] [24].....	18
4.1.1 Princip kataforetického lakování [21] [22].....	18
4.1.2 Technologický postup [18].....	19
4.2. Předúpravy povrchu před KTL [5]	20
4.2.1. Mechanické úpravy povrchu	20
4.2.2. Chemické úpravy povrchu.....	21
4.3. Problematika hromadného kataforetického lakování [23] [24]	22
Experimentální část.....	23
5. Kataforetické lakování vysokopevnostních šroubů hromadným způsobem	23
5.1 Úvod a plán experimentu	23
5.2 Přístroje a zařízení	24

5.2.1.	Váha s možností míchání kapaliny TSCALE (15kg/0,1g)	24
5.2.2.	Laboratorní ultrazvuková vana KRAINTEK	24
5.2.3.	Buben pro hromadné povlakování [8]	25
5.2.4.	Zdroj stejnosměrného elektrického proudu THAOXIN (0-5A, 0-500V).....	26
5.2.5.	Laserový konfokální mikroskop OLYMPUS LEXT OLS 3000	26
5.2.6.	Zkušební solná komora Liebisch SKB400ATR	27
5.3	Postup a metody tří variant předúprav povrchu	28
5.3.1.	Skupina vzorků č. 1.0	28
5.3.2.	Skupina vzorků č. 1.1	29
5.3.3.	Skupina vzorků č. 1.2	30
6.	Ověření a porovnání vlastností vyloučených KTL povlaků	31
6.1	Skupina vzorků č. 1.0 (Lamelární zinek).....	31
6.1.1.	Skupina vzorků č. 1.0 - Po KTL.....	31
6.1.2.	Skupina vzorků č. 1.0 - Šrouby po 320 hodinách v NSS	32
6.1.3.	Skupina vzorků č. 1.0 - Po metalografickém výbrusu.....	33
6.2	Skupina vzorků č. 1.1 (Tryskání, fosfátování).....	34
6.2.1.	Skupina vzorků č. 1.1 - Po KTL.....	34
6.2.2.	Skupina vzorků č. 1.1 - Po 320 hodinách v solné mlze.....	35
6.2.3.	Skupina vzorků č. 1.1 - Po metalografickém výbrusu.....	36
6.3	Skupina vzorků č. 1.2 (Chemická úprava, fosfátování).....	37
6.3.1.	Skupina vzorků č. 1.2 - Po KTL.....	37
6.3.2.	Skupina vzorků č. 1.2 - Po 320 hodinách v NSS.....	38
6.3.3.	Skupina vzorků č. 1.2 - Po metalografickém výbrusu.....	39
7.	Technologicko-ekonomické zhodnocení.....	40
8.	Závěr.....	41
	Použité symboly, značky a zkratky	43
	Seznam použité literatury	44
	Seznam obrázků.....	46
	Seznam tabulek.....	47
	Seznam příloh	47

Úvod

Ve strojírenském průmyslu představují závitové dvojice jeden ze základních prvků, který má za úkol spojit strojní součásti v jeden celek, který tvoří výsledný stroj či strojní zařízení. Každá strojní součást by měla mít pro dané prostředí odpovídající ochranu proti korozi. Koroze je hlavní příčinou samovolného degradování strojních součástí. Korozní ztráty dosahují ve vyspělých státech 4 až 6 % hrubého domácího produktu. V České republice to znamená, že korozi kovů přicházíme zhruba o 300 miliard Kč ročně. Proto se bakalářská práce v úvodu teoretické části zabývá definicí a rozdělením koroze. Dále se teoretická část věnuje předcházení vzniku koroze a následnou ochranou proti jejímu vzniku se zaměřením na bariérovou ochranu materiálu, kterou je právě kataforetické lakování. [17]

Experimentální část se zabývá použitelností hromadného kataforetického lakování na vysokopevnostní závitové dvojice, jejich následné korozní zkoušky ve zkušební solné komoře metodou neutrální solné mlhy (NSS) a změřením tloušťky povlaku po provedení metalografického výbrusu. Jako zkušební vzorky byly použity vysokopevnostní šrouby, které byly bez povrchové úpravy. Pro použití šroubů v exteriéru nebyla tato varianta pro provozní použití vhodná a ukázala se jako nedostačující. Šrouby vykazovaly povrchové stupně koroze již po několika dnech používání, a proto bylo potřeba přijít s povrchovou úpravou šroubů, která poskytne korozní odolnost a estetický efekt. Cílem práce bylo ověřit možné využití kataforetického lakování pro povrchové úpravy pevnostních šroubů. Na základě těchto požadavků byly vypracovány a vyhodnoceny tři různé postupy předúprav povrchu před kataforetickým lakováním viz tabulka 1, tabulka 2 a tabulka 3. Kataforetické lakování probíhalo za stejných podmínek (500V a 2A v době 1 minuty v lázni s teplotou 30°C). Po kataforetickém lakování se šrouby polymerizovaly v peci po dobu 20 minut ve 180°C. Kataforezní povlak se běžně nanáší ve vrstvě 15 - 30 μm . V našem případě se ovšem jedná o finální povrchovou úpravu, a proto byla zvolena tzv. silnovrstvá kataforeza, která nabývá tlouštěk až 45 μm . Cílem experimentu je najít vhodné parametry předúpravy povrchu před povlakováním kataforezní nátěrové hmoty a parametry kataforezního děje, aby byla dosažena přijatelná tloušťka vrstvy nátěrové hmoty a vysoká korozní odolnost povlaků. K ověření tloušťky materiálu slouží metalografický výbrus s měřením tloušťky na laserovém konfokálním mikroskopu. Ověření korozní odolnosti proběhlo při korozní zkoušce v neutrální solné mlze po dobu 320 hodin.

Teoretická část

1 Koroze kovových materiálů

1.1 Definice koroze [4] [7]

Korozní proces je jedním ze základních způsobů porušování povrchu materiálů. Jedná se o nevratnou samovolnou reakci mezi povrchem materiálu a okolním prostředím v důsledku jejich chemických a elektrochemických reakcí. Tento proces postupně narušuje povrch materiálu a v nejhrošším případě může vést až k úplnému znehodnocení materiálu a celé součásti. Ke korozi nedochází pouze u kovů a jejich slitin, ale týká se v podstatě každého materiálu. Například anorganických látek, keramických či silikátových (sklo, beton) a dalších materiálů. Poškození korozi se liší, protože na každém materiálu má jiný dopad. Může se jednat například o vizuální změny (změna barvy, lesku), ale také o kompletní rozpad materiálu a porušení v celém průřezu součástky. Korozní systém směřuje do neuspořádaného stavu s volnou entalpií, což způsobuje spontánní korozní průběh.

Koroze znamená vzájemné působení materiálu a prostředí, ve kterém se materiál nachází. K tomuto procesu přistupuje také časový průběh reakce neboli rychlost koroze závislá na řadě dalších faktorů korozního systému.

Při předcházení korozního děje se snažíme ovlivňovat především následující činitele korozního systému:

- materiál výrobku,
- korozní prostředí,
- korozní rychlosti.

Koroze může probíhat jen za předpokladu, že je energie původních složek korozního systému vyšší než energie korozních výrobků. Ztráta velikosti volné entalpie je charakterizována nestabilitou složek v tomto systému. Zjištěním změny volné entalpie se posuzuje vliv dílčích podmínek na korekci pravděpodobnosti koroze a určení podmínek, za kterých dokážeme korozi zastavit, či jí zcela předejít. Můžeme konstatovat, že v podstatě všechny kovy jsou z hlediska termodynamiky nestabilní a to platí zejména o technických kovech. Ty se v přírodě nacházejí v ryzím stavu, ale ve stabilnější formě nebo stabilní sloučenině. Těmi jsou siřníky a jejich oxidy.

Kovy se přirozeně snaží vrátit do stabilního stavu působením okolního prostředí. Abychom této přirozené snaze kovů zabránili, používáme různé druhy povrchových úprav.

Kovy samovolně přecházejí do oxidovaného stavu s různou možností míry přechodu. Termodynamickou stálost určuje změna Gibbsovy energie ΔG [J], která je vyjádřena vztahem:

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S \quad (1)$$

kde: ΔS - změna entropie [J.K⁻¹]

T - termodynamická teplota [K]

ΔH - změna entalpie [J.kg⁻¹]

Změna Gibbsovy energie je označována jako volná entalpie, termodynamický nebo chemický potenciál. Změna Gibbsovy energie určuje samovolnou uskutečnitelnost děje, pokud je:

$\Delta G > 0$ - děj neprobíhá samovolně,

$\Delta G = 0$ - systém je v rovnováze,

$\Delta G < 0$ - děj probíhá samovolně,

zároveň platí, že systémy samovolně přecházejí do stavu rovnováhy. [4]

Tvorba korozních zplodin je často spojena s přechody do rovnovážných stavů. Pravděpodobnosti koroze jsou mírou množství energie, která se uvolní při korozním ději. Ztráty z korozních činitelů lze rozdělit na přímé a nepřímé. Mezi přímé náklady patří zkorodovaný materiál, výměna, nebo oprava a dodatečné náklady na projekci. Nepřímě souvisí se zastavením, nebo omezením výroby, například z důvodu výměny poškozeného potrubí a zastavení dodávky plynu, popřípadě odstranění ekologické havárie.

Koroze je hlavní příčinou samovolného degradování strojních součástí. Korozní ztráty dosahují ve vyspělých státech 4 až 6 % hrubého domácího produktu. V České republice to znamená, že korozí kovů přicházíme zhruba o 300 miliard Kč ročně. [17]

1.2 Chemická koroze kovů [2] [25]

Jedná se o korozi v oxidickém redukčním prostředí nebo bezvodých kapalinách. Typickou vlastností tohoto druhu koroze je vytvoření vrstvy korozních produktů na povrchu materiálu. Tato vrstva korozních produktů má velký význam, jelikož na jejím růstu a jakosti je závislá možnost pronikání korozního prostředí k povrchu a tím i rychlost koroze.

Podmínka samovolného procesu koroze:

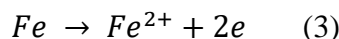
$$\Delta G < 0 \quad (2)$$

Korozní proces je neuskutečnitelný, pokud jsou hodnoty rozdílu volných entalpií kladné. [4]

1.3 Elektrochemická koroze kovů [2] [25]

Elektrochemická koroze kovů se týká koroze ve vodných roztocích, taveninách hydroxidů a solí. Termodynamická nestabilita kovu ve specifickém korozním prostředí je prvotní předpoklad pro vznik elektrochemické koroze. Korodující kov ztrácí svůj charakter při anodické reakci a stává se kationem, který se rozpouští v roztoku nebo se z kovu anodicky produkuje nerozpustná sloučenina.

Mechanismus elektrochemické koroze v sobě zahrnuje dvě reakce. První je oxidace (rozpuštění kovu):



Druhou je depolarizační katodová reakce, při které dochází k redukci některé oxidační složky roztoku, tj. k vylučování vodíku (koroze s vodíkovou depolarizací) nebo kyslíku (koroze s kyslíkovou depolarizací). Obě reakce se vzájemně podmiňují a musí tedy probíhat současně, pokud kovem neprotéká elektrický proud.

1.4 Rozdělení koroze podle korozního napadení [3] [7]

1.4.1 Rovnoměrná koroze

Korozní rovnoměrný děj probíhá nejdříve na místech s vysokou aktivitou, kterou určují podmínky korozního prostředí. Počet výskytu těchto míst je závislý na reaktivitě prostředí a kovu za určitých podmínek. Při velké reaktivitě obou složek systému s dokonalým přístupem k prostředí povrchu součásti, je aktivita míst na povrchu vysoká, a proto je povrch rovnoměrně napadán. V případech pokrytí korodované plochy zplodinami je kov napadán rovnoměrně, za předpokladu, že zplodiny umožní iontovou difuzi stejnoměrně na celém prostoru fázového rozhraní.

1.4.2 Nerovnoměrná koroze [1]

Nerovnoměrná koroze vzniká při lokálním napadení materiálu. Tento typ koroze je velmi nebezpečný, protože v mnoha případech nemusí být patrné, že ke korozi dochází. V malých oblastech může koroze probíhat velkou rychlostí, což vede k náhlému negativnímu ovlivnění pevnosti, bez sebemenšího varování.

1.4.2.1 Bodová koroze

Lokalizovaný korozní děj, který vzniká v bodech neboli hlubokých důlcích, přičemž okolní povrch zůstává korozi nenapadený. Chloridové ionty narušují pasivní vrstvu a hydroxilové sloučeniny vytvářejí pasivní vrstvu. Díky nepravidelnosti podmínek na povrchu kovů vznikají a zanikají mikro důlky, a jestliže vznikne stabilní důlek, pak začíná působit korozní proces. Iniciační mechanismus bodové koroze se vyznačuje napadením kovu v místech se slabší ochranou pasivními vrstvami. Šíření a vznik bodové koroze usnadňuje nejenom zvýšená koncentrace agresivních iontů, ale i přítomnost oxidujících látek.

1.4.2.2 Štěrbínová koroze

Místa štěrbinové koroze se nazývají štěrbin. V praxi vznikají spojením dvou plechů závitovou dvojicí nebo bodovým svarem. V místech malého množství elektrolytu dochází k částečnému oddělení od zbytků vnějšího elektrolytu. Dochází k depolarizaci kyslíku ve vodném elektrolytu a obtížnost výměny roztoku uvnitř štěrbin zamezuje přístupu dalšího kyslíku. Povrch štěrbin se stává anodou a začíná převládat oxidace kovu. V místech kde není přísun kyslíku omezený, dochází k uvolňování elektronů, čímž se okolí štěrbin stává katodou. Tímto procesem se porušuje pasivní vrstva kovu a v aktivním stavu dochází ke korozi kovu.

1.4.2.3 Nitková koroze

Nitková koroze se vyskytuje především pod bariérovou ochranou organických povlaků. Začíná u malých mikroskopických vad, je způsobena korozním prostředím především za vysoké vlhkosti a napadá pouze povrch kovů. V místech s nejnižší soudržností dochází k odtrhnutí povlaku od materiálu.

1.4.2.4 Korozní praskání

Na kovový materiál exponovaný ve specifickém prostředí dochází k působení statického tahového napětí za určitých teplot a koncentrací. Trhliny šířící se ve struktuře jsou buď mezikrystalové (šířící se po hranicích zrn), nebo transkrystalové (šířící se, přes zrna). Mechanismem korozního praskání rozumíme aktivní rozpouštění kovových materiálů na čele trhlin.

1.4.2.5 Selektivní koroze

V selektivním procesu koroze dochází k napadení jen určité fáze (např. složka jedné slitiny). Při selektivní korozi může koroze napadat pouze deformované části zrna. Odzinkování mosazi je hlavním představitelem selektivní koroze. Slitina mědi a zinku začne přicházet o složku zinku a vzniká tím houbovitá měď, která má výrazně sníženou pevnost a postupem času dochází k proděravění stěny součástky po celém povrchu nebo jen lokálně.

1.4.2.6 Erozní koroze

Přirozené korozní prostředí je umocněno rychlostí proudícího prostředí a dochází tak k rozrušování vrstvy pasivní ochrany. Na povrchu materiálu vznikají kapkovité prohlubně, vlnky a rýhy. Proudící prostředí nejčastěji bývá potrubí s proudícím médiem, ve kterém se nacházejí nehomogenity pevného a plynného skupenství. Nejčastěji napadá korozivzdorné oceli ve specifickém klimatu.

1.4.2.7 Korozní únava materiálu

Při působení korozního prostředí a mechanického namáhání s tahovou složkou dochází k porušení celistvosti materiálu a jedná se o korozní únavu materiálu. Při cyklickém zatěžování a zároveň překročení zatížení nad mez únavy dochází ke vzniku trhlin a materiál ztrácí svou celistvost i bez korozivního prostředí. V agresivním prostředí při cyklickém namáhání neexistuje mez únavy.

2 Ochrana povrchu proti korozi [11] [14]

Ochrana povrchu proti korozi se zakládá na souboru poznatků o mechanice a kinetice koroze. Vhodnou volbou protikorozní ochrany lze jednotlivým formám korozi zamezit, nebo ji minimálně omezit na přípustnou mez. Požadovanou mez korozní odolnosti je možné dosáhnout dvojím způsobem.

Prvním způsobem je uspořádání korozivní soustavy, čímž jsou prostředí a předměty založeny na snížení termodynamické nestability soustavy, nebo na úpravu průběhu rychlosti korozních reakcí. Práce se zabývá hlavně ochrannou vrstvou povrchové úpravy, a proto se věnuje pouze první zmíněné skupině, kterou tvoří povrchové úpravy.

2.1 Vhodná volba materiálu [10]

Korozi se dá zabránit nebo omezit její účinky vhodnou volbou materiálu. Například použití materiálu, který nemá sklon k nebezpečné formě koroze. Termodynamická stálost v daném prostředí neoxidujících kyselin - Au, Pt, Cu, Ni. Volba materiálu schopného své vlastní pasivace vytvořením tenké ochranné oxidické vrstvy na Al nebo Ti. Tlusté vrstvy korozních zplodin vytvořené na Cu, Zn a Pb, mohou také zabránit další nepříjemnější formě koroze.

2.2 Konstrukční uspořádání

Konstrukční návrh je při řešení korozního namáhání významným činitelem. Řídí se zásadními pravidly, které mohou zabraňovat korozi konstrukce. Je důležité odstranit všechny styky stěn pod ostrými úhly, štěrby, uzavřené prostory a kouty, kde by mohlo docházet k zadržování kapalin, usazování kalů a nečistot.

2.3 Úprava korozního prostředí

Rychlost koroze je zásadně ovlivněna korozním prostředím. Úpravy korozního prostředí lze dosáhnout dvěma způsoby. Prvním je odstranění činitelů zvyšujících agresivitu prostředí (snížení množství kyslíku ve vodě). Nebo změnou vlastností prostředí látkami, které pozitivně ovlivňují a zabraňují korozi (ochranná atmosféra nebo snížení vlhkosti silikagely).

2.4 Elektrochemická ochrana kovů proti korozi

Snížování koroze vhodnou polarizací kovu je souhrnně označováno jako „elektrochemická ochrana“. Koroze může probíhat jen v daném potenciálovém rozmezí, které udává elektrolyt. Rozděluje se na katodickou a anodickou ochranu.

2.4.1 Katodická ochrana

Jedná se o dodatečnou ochranu, která může být vyvolána dvěma různými způsoby. Připojením chráněného předmětu k materiálu se samovolně zápornějším potenciálem - kov s nižším potenciálem je považován za obětovanou anodu, přičemž kov s vyšším potenciálem je katodou. A katodická ochrana s využitím externího zdroje stejnosměrného proudu. Na kladný pól je připojena anoda a na záporný pól chráněný materiál. Chráněný materiál je katodou, ke které je připojen záporný pól zdroje, kladný pól je připojen k zemnicí anodě. Anoda v tomto případě zastává funkci obětované elektrody a podléhá korozi.

2.4.2 Anodická ochrana

Chráněným předmětem anodické ochrany je anoda. Anodická ochrana se provádí u kovových materiálů, které jsou schopny pasivace a díky ní získávají lepší vlastnosti než v aktivním stavu. Pasivace může být vyvolána spojením anody s materiálem, jehož samovolný potenciál spadá do oblasti pasivity. V technické praxi se výhradně využívá druhá možnost vzniku pasivace, a to průchodem elektrického proudu, který posune elektrodový potenciál do oblasti pasivity.

2.5 Bariérová ochrana [6] [9]

Bariérová ochrana povrchu patří k nejrozsáhlejším a nejvýznamnějším ochranám povrchu kovových i nekovových materiálů s celkovým podílem odhadovaným až na 90% při vytváření systémů povrchových úprav. Ochrana materiálu je založena na vytvoření bariéry vrstvou organického povlaku, který tak odděluje základní materiál a korozivní prostředí.

2.5.1. Plastové povlaky

Povlaky z plastů se vyznačují vysokou antikorozií ochranou a dobrými izolačními vlastnostmi. Plastové povlaky jsou tvořeny polymery, kterými jsou např. polyetylén, polyvinylchlorid, teflon, akrylát, celulóza a používají se nejen jako ochrana proti korozi, ale také jako ochrana proti lepivosti, zabraňují opotřebení a v kombinaci s vysokým estetickým vzhledem se používají stále častěji k aplikaci především na kovové povrchy. Difuze materiálu podmiňuje trvanlivost povlaků a v určité míře může být omezena nanášenou technologií. Zvyšováním tloušťky nátěrové hmoty se životnost ovlivňuje jen do určité míry.

2.5.2. Nátěrové hmoty

Nátěrová hmota vzniká nanesením souvislého povlaku požadovaných vlastností a následným vytvrzením a je možné proces opakovat v několika vrstvách. Složení jsou nátěrové hmoty tekuté, až pastovité konzistence. Mezi nátěrové hmoty spadá právě kataforézní lakování, které se nanáší na povlakovaný povrch máčením.

3 Povrchové úpravy vysokopevnostních šroubů [12] [13] [15]

Spojení závitovou dvojicí je rozebíratelné a musí svou funkci splňovat po celou dobu své životnosti, nebo s životností postačující k včasné výměně za nové závitové dvojice. Materiál a jeho povrch musí mít takovou korozní odolnost, aby na jeho povrchu nedošlo ke koroznímu poškození v daném prostředí.

Nejrozšířenější povrchovou úpravou závitových dvojic jsou povlaky zinku a jeho slitin. Hlavním důvodem pro použití zinku a jeho slitin jako povrchové úpravy je ochrana povrchu na principu katodické ochrany. Na základě elektrochemického postavení zinku vůči železu, reaguje zinek s korozním prostředím dříve a chrání tak povlakovaný materiál katodickou ochranou.

3.1 Niklování

Největší výhodou niklování při použití u závitových dvojic je odolnost tvrdé vrstvy povrchové úpravy proti otěru. Slouží k antikorozi ochraně a také se používá jako dekorace povrchu. S niklovanými povrchy se můžeme setkat v telekomunikacích a elektroprůmyslu. Niklování je určené především do korozního prostředí vnitřních podmínek. Ochranu poniklovaného povrchu je možné zvýšit impregnací.

3.2 Chromování

Používáno při nutnosti zvýšené tvrdosti a ořezuvzdornosti materiálu. Chromování je rozšířeno především v automobilovém a leteckém průmyslu. Chromování se provádí v lázni a kvalita povlaku závisí na poměru teploty lázně vůči proudové hustotě. Při konstantní teplotě a rostoucí proudové hustotě jsou nejdříve vylučovány povlaky matné a křehké. Nakonec jsou vylučovány povlaky lesklé a tvrdé. Hlavní složky chromovacích lázní tvoří kysličník chromový, kyselina sírová, fluorovodíková a fluorokřemičitá.

3.3 Pomosazování, pomědění a postříbření

Obdobně jako niklování se používá především pro účely dekorativní a při použití na ocelovém povrchu zvyšuje přilnavost pryže a ocele.

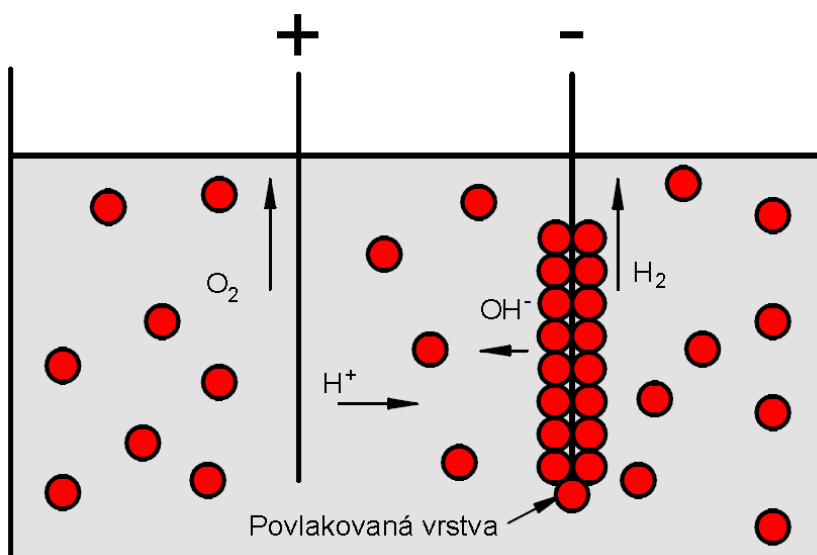
Účelem pomědění je vytvoření krycí vrstvy před postříbřením, niklováním a chromováním. Používá se především jako dekorativní vrstva.

Hlavním účelem postříbření jsou dekorativní a technické účely.

4 Rozbor sledované problematiky KTL drobných dílů [30]

4.1 Kataforetické lakování [19] [24]

Kataforetické lakování, neboli kataforéza KTL, je jeden ze dvou druhů elektroforetického povlakování. Jedná se o katodové nanášení nátěrových hmot máčením. Vodou ředitelné povlaky byly vyvíjeny s cílem nahradit běžné organické povlaky rozpustitelné ve vodě. Tyto povlaky se staly základem pro elektrolytické pokovování, ve kterém jsou pozitivně nabitě částice nátěrové hmoty nanášeny z vodného roztoku na kovový základ umístěný v elektrickém poli. Kataforetické lakování je dnes využíváno především v automobilovém průmyslu, díky němuž se do značné míry rozvinulo. Je také používáno při výrobě motocyklů, jízdních kol, domácích spotřebičů, stavebních a zemědělských strojů. [14]



Obrázek 1 - Schéma KTL

4.1.1 Princip kataforetického lakování [21] [22]

Nanášení nátěrové hmoty elektroforézním procesem probíhá na základě elektrodepozice částic v roztoku elektrickým proudem. Díky rozsáhlému potenciálu mezi anodou a katodou se povrch povlakovaného dílu pokryje tenkou vrstvou vyloučeného povlaku. Při kataforéze se používají kationické nátěrové povlaky na epoxidové bázi nebo ve vodě rozpustných akrylátů s velmi nízkým obsahem organických rozpouštědel. Částice povlaku jsou ve formě polymerních kationtů. Aby vzniklo elektrické pole mezi anodou a katodou, je nutné mít anodu i katodu ponořené v lázni. Výrobek, který chceme nalakovat, je při kataforéze zapojen jako katoda. Připojením výrobku a protielektrody (anody) na zdroj stejnosměrného proudu dochází k vytvoření elektrického pole. Polykationty se usměřňují směrem ke katodě a hydroxylové ionty se vylučují na povrchu součástky připojené na katodě. Tloušťka povrchové vrstvy roste a tím

roste i odpor vrstvy. S rostoucím odporem rychlost vylučování barvy klesá, až téměř ustane. Místa s doposud malou tloušťkou povlaku jsou povlakovány přednostně. Na celém povrchu součástky včetně těžko přístupných míst a ostrých hran dochází k tvorbě rovnoměrného povlaku. K zastavení vylučování dochází při dosažení určité tloušťky povlaku na celém povrchu součásti. Změnou velikosti napětí lze cíleně měnit tloušťku vyloučeného povlaku. Tloušťka povlaku se běžně pohybuje v rozmezí mezi 15 až 30 μm . Při extrémních požadavcích lze dosáhnout tloušťky až 50 μm a jedná se o tzv. silnovrstvou kataforézu. Elektricky vyloučená vrstva pevně přilne k podkladu a přebytečný lak se v dalším technologickém sledu opláchně. Vyloučený povlak je nutno polymerizovat v peci při teplotách okolo 160 až 180 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 20 minut. Po polymeraci povlak získá své finální vlastnosti. Dřívější formulace měly hustotu laku více než 1,5 g/cm^3 , dnešní formulace laku mají hustotu okolo 1,3 g/cm^3 . Adhezi kataforézního povlaku k podkladu značně ovlivňují předúpravy povrchu. Při vhodné předúpravě povrchu dosahuje kataforetická nátěrová hmota přilnavosti 10 až 15 MPa. [15]

4.1.2 Technologický postup [18]

Technologický postup se skládá ze tří hlavních podsouborů, stejně jako drtivá většina technologií povrchových úprav. Pro dosažení opakovatelnosti a stálosti povrchu se proces dělí na předúpravu povrchu, samotný proces povlakování a následné dokončovací práce.

4.1.2.1 Předúprava povrchu

1. Chemické odmaštění
2. Oplach
3. Moření
4. Oplach
5. Aktivace
6. Zn fosfátování
7. Oplach
8. Pasivace
9. Oplach

4.1.2.2 Povlakování povrchu

10. Kataforézní uzal

4.1.2.3 Dokončovací operace

11. Oplach

12. Vypálení součásti v peci

13. Chlazení

4.2. Předúpravy povrchu před KTL [5]

Předúpravy povrchu se provádějí především z důvodu zlepšení přilnavosti nátěrových hmot k základnímu materiálu. Předúpravou povrchu se snažíme povrch materiálu očistit především od ulpělých a vlastních nečistot.

Ulpělé nečistoty se na povrch materiálu váží pomocí adhezních sil a jedná se o mastné látky - oleje, emulze, pasty nebo kovové nečistoty po mechanickém opracování a prach z ovzduší. Ulpělé nečistoty se odstraňují odmašťováním.

Nečistoty vlastní jsou k povrchu vázány pevně, vznikají při chemické reakci korozního prostředí a povrchové vrstvy kovu. Vlastními nečistotami jsou především okuje a rez.

Rozdělení předúprav se dělí na mechanické, které nemusejí být vždy provedeny a chemické, které musejí být nutně provedeny před každým povlakováním.

4.2.1. Mechanické úpravy povrchu

Účelem mechanických předúprav je očištění povrchu od nečistot, zajištění podmínek pro vyhovující přilnavost následující vrstvy, vytvoření podmínek pro zvýšení korozní odolnosti a zlepšení mechanických vlastností povrchu.

4.2.1.1. Tryskání

Způsob mechanické úpravy materiálu, kdy povrch tryskáme proudem částic, neboli abrazivem (ocel, litina ve formě granulátu nebo drtě, korund a mnoho dalších). Tryskání je velmi produktivní způsob čištění a přípravy povrchu pod nátěry, smalty, žárové nástříky kovů a keramických materiálů. Výsledkem tryskání je odstranění nečistot, rovnoměrný povrch a zlepšení přilnavosti kotvicí plochy pro nátěrový systém. U kuličkování dochází k plastickým deformacím, a tím ke zvýšení tvrdosti povrchu tryskaného materiálu. Pnutí zabraňuje šíření nebo i iniciaci trhlin.

4.2.1.2. Omílání

Technologie omílání je využívána pro hromadné odhrotování, broušení a leštění zejména kovových součástí jako jsou odlitky a výlisky. Je vhodné pro členité a drobné výrobky. Omílání probíhá v bubnech a používají se korundová tělíska nebo plastová tělíska plněná abrazivem.

4.2.2. Chemické úpravy povrchu

Chemické úpravy povrchu zahrnují takové způsoby úpravy, u kterých chemické činidlo reaguje s nečistotami na povrchu materiálu. Ulpělé nečistoty neboli mastnoty se chemicky odmašťují. Korozní produkty jsou nečistoty vlastní a odstraňují se mořením.

4.2.2.1. Chemické odmašťování

Správné odmaštění kovového povrchu je základním předpokladem pro úspěšné provedení celé řady technologických operací a povrchových úprav. Nečistoty mastné povahy (tuky, oleje, vosky) se ve vodě nerozpouštějí, ale za přítomnosti vhodných látek se ve vodě vytváří nepravé roztoky - emulze. Naproti tomu v některých organických rozpouštědlech, jako jsou například nižší uhlovodíky nebo chlorované uhlovodíky, se uvedené nečistoty rozpouštějí na pravé roztoky. Při odmašťování dochází k rozpouštění mastnot molekulárním pochodem. Výhodou je především dobrá účinnost při rychlém rozpouštění velkého množství mastnoty ulpělé na povrchu.

4.2.2.2. Moření

Jedná se o odstranění kovových oxidů a hydratovaných oxidů z povrchu kovů rozpouštěním v kyselinách. Slouží k čištění povrchů od korozních produktů a je významnou součástí technologického postupu povrchových úprav. Aplikuje se především ponorem součástí do mořicí lázně ve většině případech do roztoku kyselin.

4.2.2.3. Odrezování, dekapování

Odrezování slouží k chemickému čištění předmětů, které zkorodovaly během používání nebo při skladování a má na nich být provedena nebo obnovena povrchová úprava. Jedná se o zvláštní druh moření používaný před galvanickým pokovením.

Dekapování je speciální druh moření používaný před galvanickým pokovením. Používá se k odstranění tenkých oxidických vrstev a aktivaci povrchu kovů.

4.2.2.4. Fosfátování

Chemická úprava oceli, zinku a hliníku. Na povrchu vzniká terciální fosforečnan zinku, vápníku a manganu. Důležitou vlastností fosfátových vrstev je jejich schopnost vázat na sebe organické látky, například plastická maziva nebo ve vodě rozpustné oleje, které ji významně chrání proti korozi a tím výrazně zlepšují přilnavost nátěrových hmot. Používá se železnatý, mangan a zinečnatý fosfát. Přímo pod KTL je doporučený zinečnatý fosfát.

4.2.2.5. Pasivace

Pasivace materiálu je způsob zvýšení korozní odolnosti a přilnavosti nátěrových systémů. Ke vzniku pasivní vrstvy dochází na čistě odmořeném povrchu dvěma způsoby. Reakcí povrchu s kyslíkem a vznikem pasivní složky během několika dní (auto-pasivace). Při použití pasivačního prostředku dochází ke vzniku pasivační vrstvy okamžitě a vrstva je také mnohonásobně vyšší než při auto-pasivaci. Provádí se v lázni, popřípadě postřikem.

4.3. Problematika hromadného kataforetického lakování [23] [24]

Hromadný způsob kataforetického lakování eliminuje nutnost ručního zavěšení dílů a otevírá tak možnosti pro povlakování drobného materiálu, jako jsou například dekorativní bižuterie či spojovací materiál. Modifikovaný způsob kataforetického lakování je přednostně založen na nahodilém kontaktu mezi katodou a upravovaným dílem. Zdrojem nahodilých kontaktů mezi díly a katodou je tíhové zrychlení samotného dílu. Jestliže takový kontakt nastane, lze považovat elektrodu s dílcem za jednotnou katodu. Hromadný způsob s sebou nese několik problémů, které vycházejí ze samotné fyzikální podstaty elektroforetického děje. Prvním problémem je povlakování dílů po celém povrchu, kde se mohou vyskytovat nepovlakovaná místa ve stykových plochách, a to sice mezi katodou a upravovaným dílcem či mezi dílci samotnými. Tento problém lze částečně řešit zavedením pohybu dílců při procesu lakování a zajistit tak více nahodilých elektrických kontaktů včetně přítomnosti lázně. Další problém vychází ze samotné technologie kataforetického lakování, a to sice vytváření povlaku na katodě přenášející elektrický proud do dílce. Vyloučený povlak na katodě se stává dielektrikem a přenos elektrického proudu dále eliminuje.

Tyto problémy mohou být řešeny několika způsoby, například zavedením rotačního pohybu při lakování, mechanické (chemické) čištění katod v průběhu lakování nebo zajištění hydrofobního povrchu katod vhodnou povrchovou úpravou.

Experimentální část

5. Kataforetické lakování vysokopevnostních šroubů hromadným způsobem

5.1 Úvod a plán experimentu

Jako zkušební vzorky byly zvoleny vysokopevnostní šrouby, které byly bez povrchové úpravy. Pro použití šroubů v exteriéru nebyla tato varianta pro provozní použití vhodná a ukázala se jako nedostačující. Šrouby vykazovaly povrchové stupně koroze již po několika dnech používání, a proto bylo potřeba nalézt povrchovou úpravu šroubů, která poskytne korozní odolnost a estetický efekt. Byly vypracovány a vyhodnoceny tři různé postupy předúprav povrchu před kataforetickým lakování, viz tabulka 1, tabulka 2 a tabulka 3. Kataforetické lakování probíhalo za stejných parametrů (500 V a 2 A v době 1 minuty v lázni s teplotou 30 °C). Po kataforetickém lakování se šrouby polymerizovaly v peci po dobu 20 minut ve 180 °C. Kataforézní povlak se běžně nanáší ve vrstvě 15 - 30 μm. V našem případě se ovšem jedná o finální povrchovou úpravu a proto byla zvolena tzv. silnovrstvá kataforéza, která se pohybuje v tloušťce až 50 μm. Cílem experimentu je najít vhodné předúpravy povrchu před aplikací povlaku kataforézní nátěrové hmoty a parametry kataforézního děje k dosažení přijatelné tloušťky vrstvy nátěrové hmoty. K ověření tloušťky materiálu slouží metalografický výbrus s měřením tloušťky na laserovém konfokálním mikroskopu. Ověření korozní odolnosti proběhlo při zkoušce v solné mlze po dobu 320 hodin.

5.2 Přístroje a zařízení

Tato část se věnuje hlavním přístrojům, bez kterých by nebylo možné experimentální část provést na vyhovující úrovni, která zaručuje opakovatelnost a přesnost experimentu.

5.2.1. Váha s možností míchání kapaliny TSCALE (15kg/0,1g)

Váha TSCALE QHW sloužila k míchání a vážení přesných hodnot potřebných k vytvoření směsi zinečnatého fosfátu.



Obrázek 2 - TSCALE (15kg/0,1g) [29]

5.2.2. Laboratorní ultrazvuková vana KRAINTEK

Pro odmaštění byla použita laboratorní ultrazvuková vana KRAINTEK, viz obr 3. Byla použita s prostředkem PRAGOLOD.



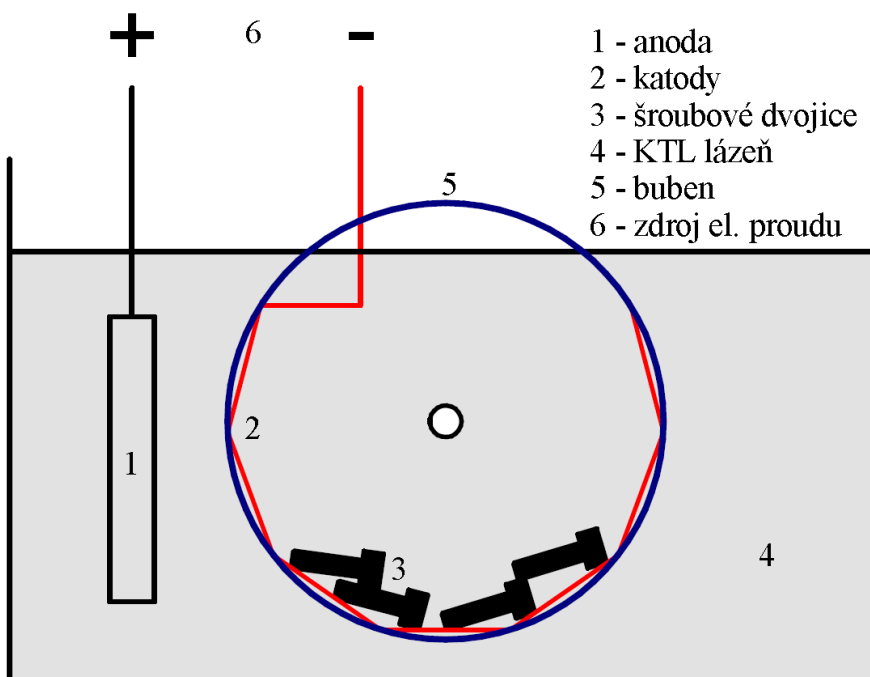
Obrázek 3 - Laboratorní ultrazvuková vana KRAINTEK [26]

5.2.3. Buben pro hromadné povlakování [8]

Nejdůležitějším zařízením v celém procesu hromadného kataforetického lakování je buben pro hromadné povlakování drobných dílů. Katody jsou z korozivzdorného materiálu AISI 304. Obal bubnu je vyrobený z PVC trubky DN200, uzavřený víky s procházející hřídelí, díky které je možné bubnem otáčet a při pohybu šroubů v procesu lakování tak zajistit více nahodilých elektrických kontaktů včetně jejich přítomnosti v lázni.



Obrázek 4 - Ukázka konstrukce kataforetického bubnu [23]



Obrázek 5 - Schéma bubnu v kataforezní vaně

5.2.4. Zdroj stejnosměrného elektrického proudu THAOXIN (0-5A, 0-500V)

Zdroj stejnosměrného proudu THAOXIN hrál v experimentální části významnou roli. Je to jeden ze základních přístrojů sloužící k nanášení kataforetické nátěrové hmoty na součástky stejnosměrným elektrickým proudem.



Obrázek 6 - THAOXIN (0-5A, 0-500V) [27]

5.2.5. Laserový konfokální mikroskop OLYMPUS LEXT OLS 3000

Laserový konfokální mikroskop poskytl detailní pohled na vzorky po metalografickém výbrusu. Z těchto záběrů přesně naměřil tloušťky jednotlivých povlaků, na základě kterých je možné provést přesný rozbor kvality a konzistence povlakované vrstvy.



Obrázek 7 - Laserový konfokální mikroskop OLYMPUS [20]

5.2.6. Zkušební solná komora Liebisch SKB400ATR

Norma ČSN EN ISO 9227 definuje postup testování pro neutrální korozní prostředí (NSS - neutral salt spray). Norma vyžaduje minimální objem komory 400 litrů, pH v rozmezí 6,5 až 7,5. Teplota v korozní komoře je pro NSS definována na hodnotu 35 ± 2 °C. Průměrná rychlost hromadění rozprašované mlhy z vodorovné sběrné plochy o obsahu 80 cm² je $1,5 \pm 0,5$ ml/hod. [16]



Obrázek 8 - Zařízení Liebisch SKB400ATR vhodné pro zkoušku NSS [28]

5.3 Postup a metody tří variant předúprav povrchu

V experimentální části se práce zabývá třemi vybranými postupy předúprav povrchu. Cílem experimentu bylo dosáhnout co nejkvalitnější a korozi nejodolnější vrstvy kataforetické vyloučené nátěrové hmoty. Každá varianta byla vytvořena po deseti kusech a všechny tři varianty byly zkontrolovány vizuálně po provedení polymerizace. Všechny vzorky byly vizuálně totožné s minimálními rozdíly a čtyři náhodné kusy z každé várky byly vloženy do standardizované korozní zkoušky solnou mlhou. Po 320 hodinách byly vzorky vyjmuty z komory a následně vyhodnoceny viz obrázky 11, 12, 17, 18, 23 a 24.

Na dalších vzorcích byl proveden metalografický výbrus, který je viditelný z obrázků 13, 14, 19, 20, 25, 26 včetně hodnot naměřených na laserovém konfokálním mikroskopu.

5.3.1. Skupina vzorků č. 1.0

Skupina vzorků č. 1.0 se liší oproti ostatním metodám z důvodu použití lamelárního zinku po otryskání černěného povrchu místo fosfátování. Lamelární zinek metodou DipSpin (ponořením/ otáčením) byl zajištěn externí firmou SVÚM a.s. z důvodu chybějící technologie v laboratořích fakulty Strojní. Tloušťka lamelárního zinku byla okolo 12 μm .

Tabulka 1 - Pracovní postup - skupina vzorků č. 1.0

Skupina vzorků č. 1.0						
Číslo operace	Název operace	Přípravek	U [V]	I [A]	t [min]	T [°C]
1.	Tryskání	Umělý korund	-	-	-	-
2.	Lamelární Zn	-	-	-	-	-
3.	Odmaštění	Pragolod	-	-	5	50
4.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	2	20
5.	KTL	KTL	500	2	1	30
6.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	0,5	20
7.	Polymerizace	Pec	-	-	20	180

5.3.2. Skupina vzorků č. 1.1

Oproti předchozí sadě vzorků je tato metoda složitější na přípravu a to zejména z důvodu tryskání odmaštěných šroubů. Poté je postup totožný se sadou vzorků č. 1.0.

Tabulka 2 - Pracovní postup - skupina vzorků č. 1.1

Skupina vzorků č. 1.1						
Číslo operace	Název operace	Přípravek	U [V]	I [A]	t [min]	T [°C]
1.	Odmaštění	Pragolod	-	-	5	5
2.	Tryskání	Umělý korund	-	-	-	-
3.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	2	20
4.	Aktivní oplach	Pragofos 1927	-	-	2	30
5.	Zn Fosfátování	Pragofos 1921 Pragofos 1922 Pragofos 1924	-	-	6	50
6.	Oplach	Demi-H ₂ O			2	20
7.	Pasivace	Pragokor BP	-	-	2	20
8.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	2	20
9.	KTL	KTL	500	2	1	30
10.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	0,5	20
11.	Polymerizace	Pec	-	-	20	180

5.3.3. Skupina vzorků č. 1.2

Skupina vzorků č. 1.2 je nejlevnější variantou. Šrouby, které jsou dostupné a již ze série bez povrchové úpravy s černým povrchem se netryskají, ale rovnou odmašťují a poté fosfátují před kataforetickým nanášením povlaku.

Tabulka 3 - Pracovní postup - skupina vzorků č. 1.2

Skupina vzorků č. 1.2						
Číslo operace	Název operace	Přípravek	U [V]	I [A]	t [min]	T [°C]
1.	Odmaštění	Pragolod	-	-	5	50
2.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	2	20
3.	Aktivní oplach	Pragofos 1927	-	-	2	30
4.	Zn Fosfátování	Pragofos 1921 Pragofos 1922 Pragofos 1924	-	-	6	50
5.	Oplach	Demi-H ₂ O			2	20
6.	Pasivace	Pragokor BP	-	-	2	20
7.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	2	20
8.	KTL	KTL	500	2	1	30
9.	Oplach	Demi-H ₂ O	-	-	0,5	20
10.	Polymerizace	Pec	-	-	20	180

6. Ověření a porovnání vlastností vyloučených KTL povlaků

K ověření vlastností vyloučených povlaků dochází na základě vizuální kontroly hotových součástí po dokončené polarizaci. Po vizuální kontrole došlo u vybraného šroubu z každé skupiny vzorků k vyhotovení metalografického výbrusu. Další čtyři kusy šroubů byly vloženy do zkušební solné komory k ověření jejich korozní odolnosti metodou NSS.

6.1 Skupina vzorků č. 1.0 (Lamelární zinek)

Na otryskaném povrchu vzorků byla dále jako hlavní předúprava použita metoda DipSpin s nanesením povlaku lamelárního zinku a poté byly vzorky kataforeticky lakovány. Povrch má po nanesení lamelárního zinku světlou barvu a proto jsou nedostatky metody hromadného kataforetického lakování dobře viditelné. Světlé části jsou nepovlakovaná místa ve stykových plochách, a to sice mezi katodou a upravovaným dílcem, či mezi dílci samotnými.

6.1.1. Skupina vzorků č. 1.0 - Po KTL



Obrázek 9 - Šrouby varianty č. 1.0 po polymerizaci



Obrázek 10 - Šrouby varianty č. 1.0 po polymerizaci z jiného pohledu

6.1.2. Skupina vzorků č. 1.0 - Šrouby po 320 hodinách v NSS

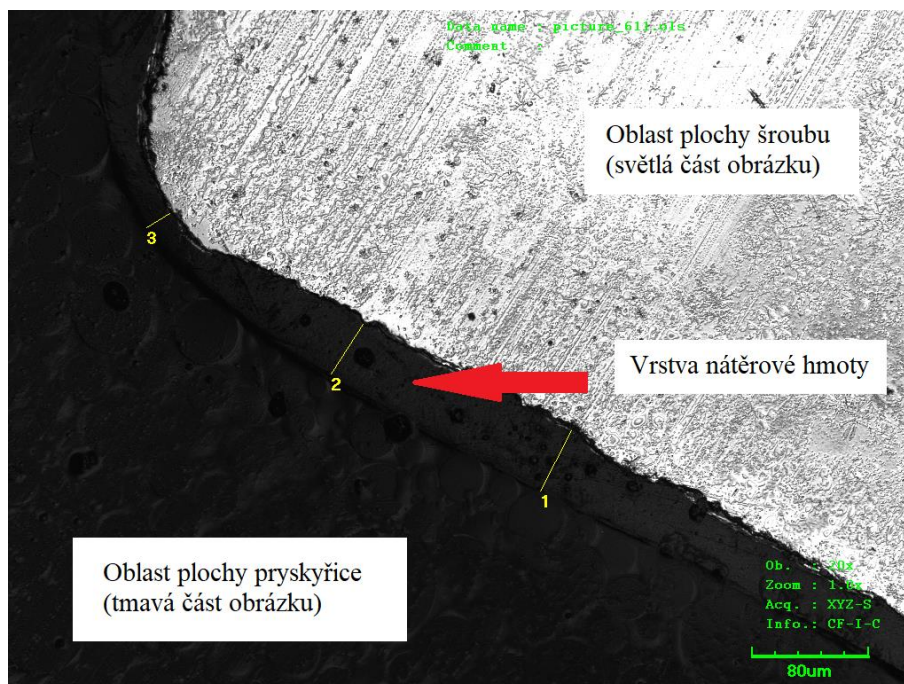


Obrázek 11 - Šrouby po 320 hodinách NSS

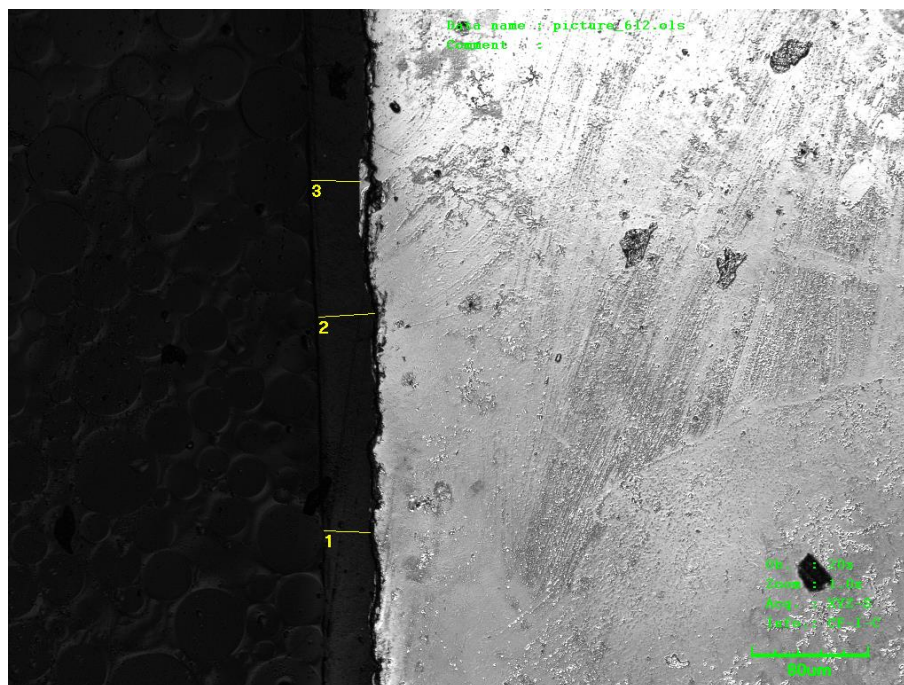


Obrázek 12 - Šrouby po 320 hodinách v NSS

6.1.3. Skupina vzorků č. 1.0 - Po metalografickém výbrusu



Obrázek 13 - Detail v místě závitu (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 51 μ m, 2 - 44 μ m, 3 - 26 μ m). (Zvětšeno 480x)



Obrázek 14 - Detail v místě boku hlavy šroubu (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 32 μ m, 2 - 39 μ m, 3 - 34 μ m). (Zvětšeno 480x)

6.2 Skupina vzorků č. 1.1 (Tryskání, fosfátování)

Na otryskaném povrchu vzorků byla jako hlavní předúprava použita metoda zinečnatého fosfátování a poté byly vzorky kataforeticky lakovány. Povrch fosfátované vrstvy má tmavou barvu a proto nejsou nedostatky metody hromadného kataforetického lakování téměř vůbec viditelné. Jeden šroub ze skupiny vzorků vykázal drobnou povrchovou vadu nanesené větší vrstvy nátěrové hmoty. Vada je na obrázku 15, vyznačena červeným kroužkem.

6.2.1. Skupina vzorků č. 1.1 - Po KTL



Obrázek 15 - Šrouby varianty č. 1.1 po polymerizaci



Obrázek 16 - Šrouby varianty č. 1.1 po polymerizaci z jiného pohledu

6.2.2. Skupina vzorků č. 1.1 - Po 320 hodinách v solné mlze

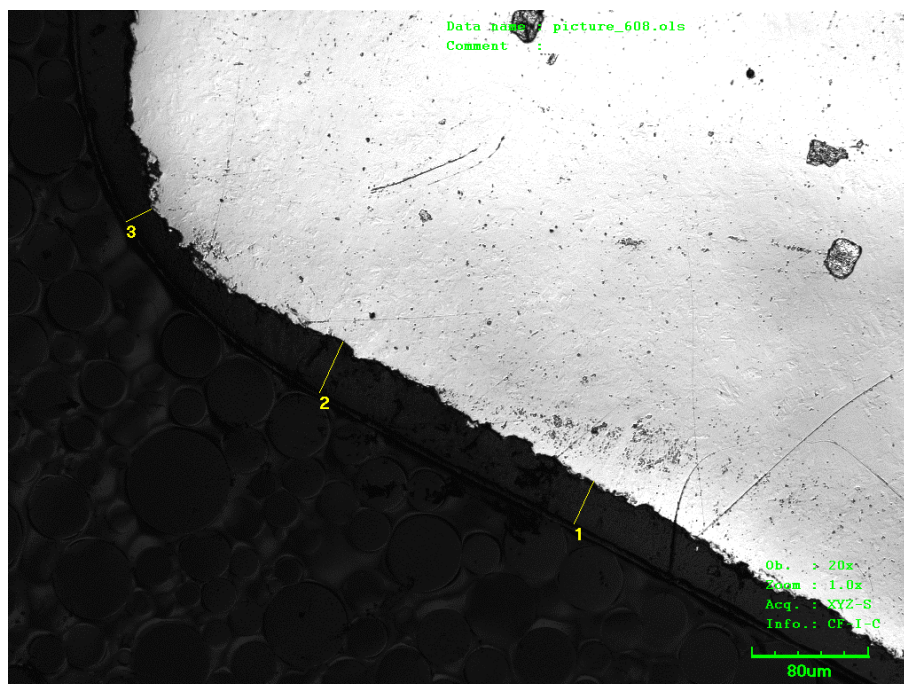


Obrázek 17 - Šrouby po 320 hodinách v NSS

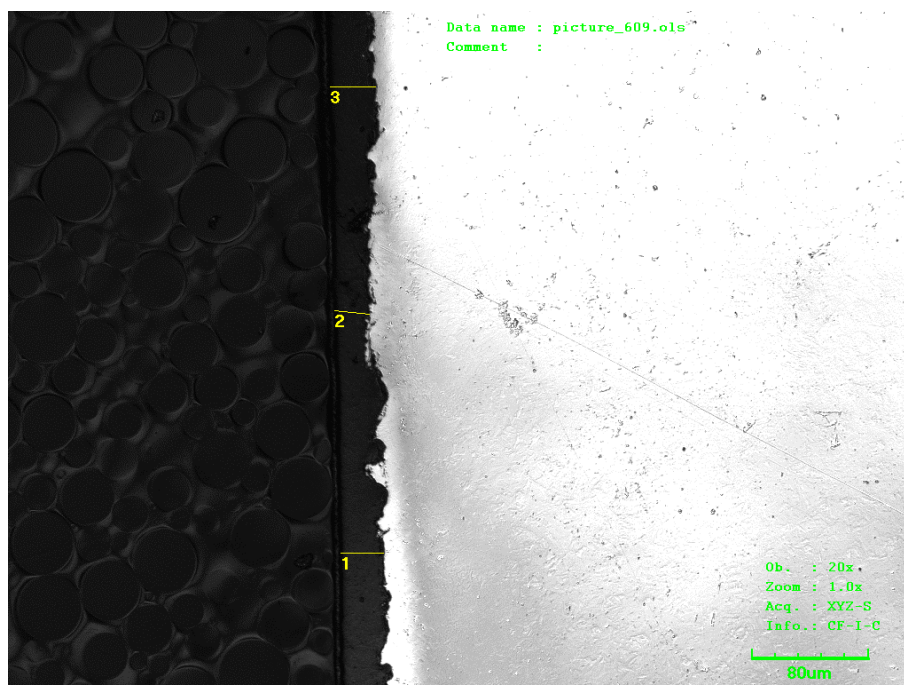


Obrázek 18 - Šrouby po 320 hodinách v NSS

6.2.3. Skupina vzorků č. 1.1 - Po metalografickém výbrusu



Obrázek 19 - Detail v místě závitů (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 33µm, 2 - 39µm, 3 - 21µm). (Zvětšeno 480x)



Obrázek 20 - Detail v místě boku hlavy (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 30µm, 2 - 27µm, 3 - 31µm).

(Zvětšeno 480x)

6.3 Skupina vzorků č. 1.2 (Chemická úprava, fosfátování)

Povrch skupiny vzorků č. 1.2 nebyl oproti předešlým skupinám tryskaný a byla na něm provedena pouze chemická úprava povrchu před kataforetickým povlakováním. Vzorky vykazaly podobně jako u vzorků č. 1.1 povrch bez viditelných nahodilých doteků, ale všechny šrouby ze skupiny vzorků vykazaly drobnou povrchovou vadu větší vrstvy nanesené nátěrové hmoty.

6.3.1. Skupina vzorků č. 1.2 - Po KTL



Obrázek 21 - Šrouby varianty č. 1.2 po polymerizaci



Obrázek 22 - Šrouby varianty č. 1.2 po polymerizaci z jiného pohledu

6.3.2. Skupina vzorků č. 1.2 - Po 320 hodinách v NSS

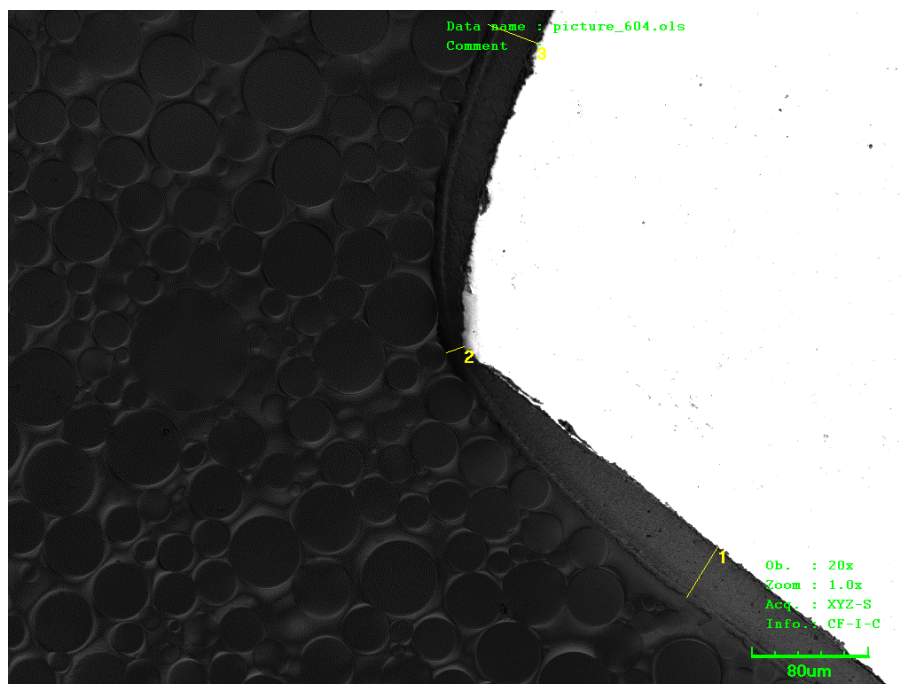


Obrázek 23 - Šrouby po 320 hodinách NSS



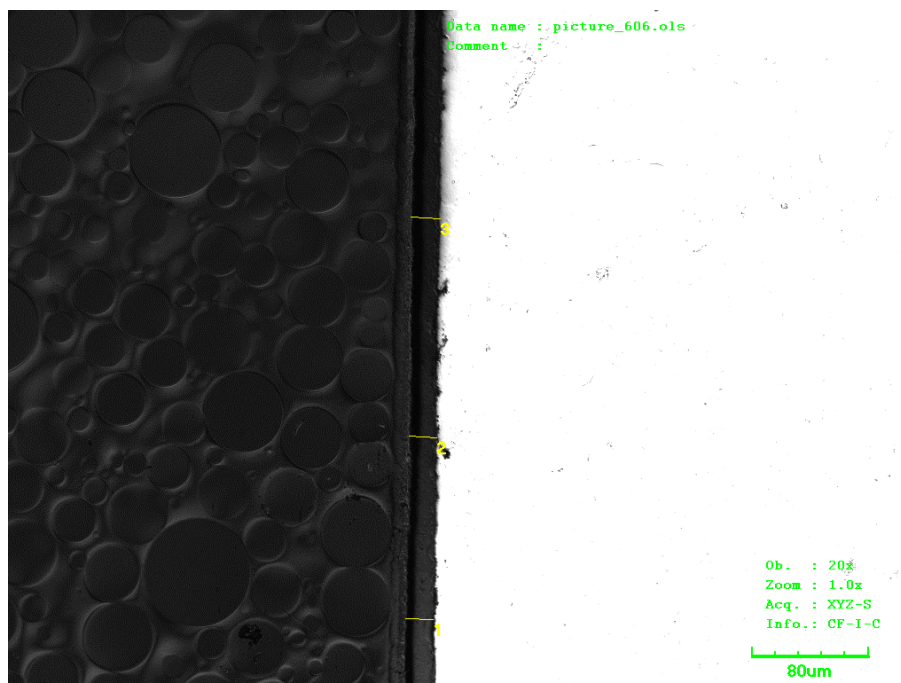
Obrázek 24 - Šrouby po 320 hodinách NSS

6.3.3. Skupina vzorků č. 1.2 - Po metalografickém výbrusu



Obrázek 25 - Detail v místě závitů (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 41 μ m, 2 - 13 μ m, 3 - 36 μ m).

(Zvětšeno 480x)



Obrázek 26 - Detail v místě boku hlavy (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 19 μ m, 2 - 19 μ m, 3 - 20 μ m).

(Zvětšeno 480x)

7. Technologicko-ekonomické zhodnocení

Důležitou roli v technologicko-ekonomickém rozhodování hraje požadovaná životnost konstrukce, která se odráží na výběru materiálu součásti, konstrukčním uspořádání a povrchové úpravě. Kataforetické lakování je velice ekologická a hospodárná technologie povrchové úpravy materiálu s vysokou životností, ale je jako všechny povrchové úpravy náchylná na kvalitní předúpravu povrchu, která se také odráží na celkové ceně povrchové úpravy.

U varianty č. 1.0 a č. 1.1 byly šrouby tryskané a náklady na samotné tryskání bude ovlivňovat způsob realizace a spotřeba tryskacího prostředku. Uzavřené tryskací boxy jsou pro šrouby, jakožto drobné díly naprosto dostačující. Jsou obstarány zařízením pro recyklaci tryskacího abraziva, čímž snižují náklady na tryskání oproti zařízením pro velké konstrukce, kde není recyklace víceméně možná.

U varianty č. 1.0 byl na šrouby nanesený povlak lamelárního zinku metodou DipSpin a u variant č. 1.1 a 1.2 byla jako hlavní předúprava použita fosfatizační zinečnatá lázeň.

Varianta č. 1.2 byla z ekonomického hlediska nejlevnější, protože se šrouby netryskaly, byly ošetřeny pouze chemickou předúpravou a zároveň vykazaly podobné výsledky jako skupina vzorků č. 1.1, která byla navíc tryskána.

8. Závěr

Experimentální část se zabývá použitelností hromadného kataforetického lakování na vysokopevnostní šrouby, jejich následné korozní zkoušky ve zkušební solné komoře metodou neutrální solné mlhy (NSS) a změřením tloušťky povlaku po provedení metalografického výbrusu. Vyhodnocení experimentální části mělo několik hledisek. Prvním z nich bylo zjistit efektivitu jednotlivých předúprav povrchu a schopnosti kataforetického povlaku povlakovat povrch součásti rovnoměrným a zároveň silným povlakem nátěrové hmoty.

V této fázi se ukázalo, že všechny tři skupiny vzorků mají své chyby. U skupiny vzorků č. 1.0 byly viditelné nahodilé doteky s katodou a mezi vzorky zároveň. Vzorky č. 1.1 a č. 1.2 nevykazovaly viditelná místa nahodilých doteků, ale vady povlaku nátěrové hmoty na nich viditelné byly.

V další části bylo potřeba ověřit korozivzdornost nátěrové hmoty při korozních zkouškách v neutrální solné mlze, která by měla vypovídat o zrychleném korozním chování a životnosti nátěrové hmoty. Čas pro expozici v neutrální solné mlze byl stanoven na 320 hodin. Nejlépe z hlediska korozní odolnosti dopadla skupina vzorků č. 1.0, která v podstatě nevykazuje žádné korozní vady. Fosfátované vzorky č. 1.1 a č. 1.2 také vykazovaly velice dobrou korozní odolnost s minimálním ale lehce viditelným korozním poškozením.

Tabulka 4 - Vizuální hodnocení skupin vzorků

Skupina vzorků	Vizuální hodnocení před NSS	Vizuální hodnocení po NSS
č. 1.0	Viditelná místa nahodilých doteků s katodou a mezi šrouby zároveň.	Plochy nahodilých doteků více odhalily vrstvu lamelárního zinku, ale vzorky jsou bez viditelné koroze.
č. 1.1	Viditelné vady nánosu KTL na jednom vzorku, jinak bez viditelných míst nahodilých doteků.	Viditelná koroze vzorků zapříčiněná nahodilými doteky s katodou a šrouby, které nebyly před zkouškou viditelné.
č. 1.2	Viditelné vady nánosu KTL ve větším množství, než u sady vzorků č. 1.2. Bez viditelných míst nahodilých doteků.	Obdobné hodnocení jako u předchozího vzorku - viditelná koroze vzorků zapříčiněná nahodilými doteky s katodou a šrouby, které nebyly před zkouškou viditelné.

Dalším zkoumaným parametrem byla tloušťka povlaku. Pro zjištění tloušťky povlaku bylo nejdříve potřeba metalografického výbrusu. Poté, pod detailním přiblížením na laserovém konfokálním mikroskopu byla změřena tloušťka nátěrových hmot. Nejtlustší výsledek byl naměřen na vzorku č. 1.0, ale výsledek nebyl konstantní a se změnou průřezu závitů se změnil z nejtlustší vrstvy 51 μm na 26 μm v místě s nejmenší vrstvou nátěrové hmoty. Nejrovnoměrnější tloušťku povrchu v celkovém průřezu vykazala skupina vzorků č. 1.1, viz tabulka 5.

Tabulka 5 - Tloušťky nátěrových hmot

Skupina vzorků	Jednotlivé tloušťky vrstvy nátěrové hmoty [μm]							
	1. měření		2. měření		3. měření		Průměrná hodnota měření	
	Závit	Hlava	Závit	Hlava	Závit	Hlava	závit	hlava
č. 1.0	51	32	44	39	26	34	40,2	35,1
č. 1.1	33	30	39	27	21	31	31,5	29,4
č. 1.2	41	19	13	19	36	20	30,7	19,3

Z provedených experimentů nelze jednoznačně doporučit žádnou skupinu vzorků, neboť každá skupina vykazovala vady povrchu. Skupina č. 1.0 má viditelná místa nahodilých doteků, ale po NSS nevykázal žádné korozní plošky. Vrstva nátěrové hmoty nebyla příliš rovnoměrná, ale i nejslabší místo vykazovalo tloušťku 26 μm, což odpovídá standardní vrstvě kataforetického povlaku.

Skupina č. 1.1 nemá viditelná místa nahodilých doteků a vadu nánosu kataforetického povlaku vykázal pouze jeden vzorek, ale po zkouškách v NSS byly na povrchu viditelné drobné korozní vady. Skupina č. 1.1 vykazovala nejlepší schopnost rovnoměrného nánosu kataforetického povlaku.

Skupina č. 1.2 vykazuje drobné vady nánosu nátěrové hmoty na každém vzorku, ale nemá viditelná místa doteku. Po zkouškách v NSS byla na povrchu viditelná místa drobných korozních vad. Vrstva povlaku nebyla rovnoměrná a největším rozdílem vrstvy bylo 28 μm při 1. a 2. měření povlakované tloušťky na ploše závitů. Tato metoda měla po vyhodnocení nejhorší výsledky, ale z ekonomického hlediska byla metodou nejlevnější.

Použité symboly, značky a zkratky

Symbol (značka, zkratka)	Celý název
KTL	Kataforetické lakování kataforéza
NSS	Korozní zkoušky v neutrální solné mlze
pH	Vodíkový exponent
RH	Relativní vlhkost
°C	Stupeň celsia
HV	Tvrdość dle Vickerse
PVC	Polyvinylchlorid
μm	10 ⁻⁶ m (mikron)
l	Litr
V	Volt
A	Ampér
Zn	Zinek
Al	Hliník
Ni	Nikl
mg	10 ⁻³ g (miligram)
g	Gram

Seznam použité literatury

- [1] *Vlastnosti a zkoušení materiálů: koroze a opotřebení* [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM11_korozeAopotrebeni.pdf
- [2] *Druhy koroze kovů: Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF
- [3] ČERNÝ, Miroslav. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [4] BARTONÍČEK, Robert. *Koroze a protikorozní ochrana kovů*. Praha: Academia, 1966.
- [5] MICHNA, Štefan a Iva NOVÁ. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, 2008. ISBN 978-80-89244-38-6.
- [6] *A REVIEW ON CORROSION OF METALS AND PROTECTION: Volume-2* [online]. [cit. 2018-03-28]. ISSN 2250–3676.
- [7] UHLIG, Herbert Henry a R. Winston REVIE. *Corrosion and corrosion control: an to corrosion science and engineering*. 3rd ed. New York: Wiley, c1985. ISBN 04-710-7818-2.
- [8] DRAŠNAR, Petr, Jan KUDLÁČEK a Tomáš MATUŠKA. *Cataphoresis of small parts device construction*. University of Rijeka, Faculty of Engineering, 2017.
- [9] KREIBICH, Viktor a Jan HRSTKA. *Teorie a technologie povrchových úprav: koroze a povrchová úprava kovů*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1472-X.
- [10] HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd.* Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
- [11] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. Ostrava: Vys. škola báňská, 1995. ISBN 80-7078-267-6.
- [12] KUDLÁČEK, Jan, Viktor KREIBICH, Petr DRAŠNAR a Dana BENEŠOVÁ. *Povrchové úpravy závitových dvojic. MM Průmyslové spektrum*. 2010, **14**(12), 64-65. ISSN 1212-2572.
- [13] DIN/ISO/ČSN a normované díly. *Www.wuerth.cz* [online]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://kat.wuerth.cz/brozury/DIN/1384/>
- [14] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-X.

- [15] KREIBICH, V.; ČSPÚ. *Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav – 6. Mezinárodní odborný seminář*. Lysá nad Labem: TISKÁRNA Lysá n. L., 2009.
- [16] ČSN EN ISO 9227:2012. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. 2013. Praha: ÚNMZ
- [17] *Korozní ztráty* [online]. 2018 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <http://www.chos.cz/cs/novinka/korozni-ztraty/>
- [18] *Kataforetické lakování* [online]. [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://www.alkeelektromobily.cz/kataforeticke-lakovani>
- [19] MURPHY, A. B. Cataphoresis in electric arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1998, vol. 31, no. 23, s. 3383-3390. ISSN 0022-3727.
- [20] JIŘIKOVSKÝ, Karel. *Nové možnosti ve světelné mikroskopii* [online]. 2009 [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-moznosti-ve-svetelne-mikroskopii.html>
- [21] KUDLÁČEK, Jan, et al. *Studie zařízení pro kontinuální kataforetické lakování drobných dílů*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017.
- [22] *Surface Finishing Tutorial* [online]. 25. dubna 2014 [cit. 2019-07-05]. Dostupné z: <https://www.misumi-techcentral.com/tt/en/surface/2014/04/183-electrodeposition-coating.html>
- [23] HYLÁK, Kamil, Viktor KREIBICH, Petr DRAŠNAR a Zbyněk MATUŠKA. *Hromadné kataforetické lakování a testování funkčnosti katod*. 2018.
- [24] KUDLÁČEK, Jan, et al. *Zařízení pro dávkové kataforetické lakování drobných dílů*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017.
- [25] NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů* [online]. [cit. 2019-07-28]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>
- [26] *Laboratorní ultrazvuková vana K-2LM nerezová* [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://www.kraintek.cz/laboratorni-ultrazvukove-vany-s-mechanicym-ovladanim/laboratorni-ultrazvukova-vana-k-2lm-nerezova-mechanicke-ovladani-d29>
- [27] *Laboratorní zdroj KXN-5005D 0-500V/5A* [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/laboratorni-zdroje/spinane-pulzni/laboratorni-zdroj-kxn-5005d-0-500v-5a.html>
- [28] PRAŽÁK, Milan. *Korozní komory* [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozni-komory.html>

- [29] *TSCALE QHW++15k, 15kg/0,1g, 300mmx230mm* [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.profi-vahy.cz/profi-vahy/eshop/27-1-Vahy-podle-provedeni/0/5/1784-TSCALE-QHW-15k-15kg-0-1g-300mmx230mm>
- [30] KUDLÁČEK, Jan, et al. *Rešerše stavu problematiky kataforetického lakování drobných dílů*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma KTL.....	18
Obrázek 2 - TSCALE (15kg/0,1g) [29]	24
Obrázek 3 - Laboratorní ultrazvuková vana KRAINTEK [26].....	24
Obrázek 4 - Ukázka konstrukce kataforetického bubnu [23].....	25
Obrázek 5 - Schéma bubnu v kataforézní vaně.....	25
Obrázek 6 - THAOXIN (0-5A, 0-500V) [27]	26
Obrázek 7 - Laserový konfokální mikroskop OLYMPUS [20].....	26
Obrázek 8 - Zařízení Liebisch SKB400ATR vhodné pro zkoušku NSS [28].....	27
Obrázek 9 - Šrouby varianty č. 1.0 po polymerizaci.....	31
Obrázek 10 - Šrouby varianty č. 1.0 po polymerizaci z jiného pohledu	31
Obrázek 11 - Šrouby po 320 hodinách NSS.....	32
Obrázek 12 - Šrouby po 320 hodinách v NSS.....	32
Obrázek 13 - Detail v místě závitů (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 51μm, 2 - 44μm, 3 - 26μm). (Zvětšeno 480x)	33
Obrázek 14 - Detail v místě boku hlavy šroubu (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 32μm, 2 - 39μm, 3 - 34μm). (Zvětšeno 480x).....	33
Obrázek 15 - Šrouby varianty č. 1.1 po polymerizaci.....	34
Obrázek 16 - Šrouby varianty č. 1.1 po polymerizaci z jiného pohledu	34
Obrázek 17 - Šrouby po 320 hodinách v NSS.....	35
Obrázek 18 - Šrouby po 320 hodinách v NSS.....	35
Obrázek 19 - Detail v místě závitů (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 33μm, 2 - 39μm, 3 - 21μm). (Zvětšeno 480x)	36
Obrázek 20 - Detail v místě boku hlavy (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 30μm, 2 - 27μm, 3 - 31μm)..	36
Obrázek 21 - Šrouby varianty č. 1.2 po polymerizaci.....	37
Obrázek 22 - Šrouby varianty č. 1.2 po polymerizaci z jiného pohledu	37
Obrázek 23 - Šrouby po 320 hodinách NSS.....	38
Obrázek 24 - Šrouby po 320 hodinách NSS.....	38
Obrázek 25 - Detail v místě závitů (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 41μm, 2 - 13μm, 3 - 36μm).	39
Obrázek 26 - Detail v místě boku hlavy (Tloušťka nátěrové hmoty: 1 - 19μm, 2 - 19μm, 3 - 20μm)..	39
Obrázek 27- Šrouby po 240 hodinách v NSS (Pouze mořeny + KTL).....	47
Obrázek 28 - Šrouby po 240 hodinách v NSS (Pouze mořeny + KTL).....	47
Obrázek 29 -Šrouby s PÚ lamelárního zinku po 240 hodinách v NSS	48
Obrázek 30 - Šrouby s PÚ lamelárního zinku po 240 hodinách v NSS	48
Obrázek 31 - Vzorky šroubů po 48 hodinách v NSS	49
Obrázek 32 - Vzorky šroubů po 96 hodinách v NSS	49
Obrázek 33 - Vzorky šroubů po 144 hodinách v NSS	50
Obrázek 34 - Vzorky šroubů po 216 hodinách v NSS	50
Obrázek 35 - Vzorky šroubů po 320 hodinách v NSS	51

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Pracovní postup - skupina vzorků č. 1.0	28
Tabulka 2 - Pracovní postup - skupina vzorků č. 1.1	29
Tabulka 3 - Pracovní postup - skupina vzorků č. 1.2	30
Tabulka 4 - Vizuální hodnocení skupin vzorků	41
Tabulka 5 - Tloušťky nátěrových hmot.....	42

Seznam příloh

Příloha č. 1: Fotografie vysokopevnostních šroubů, které bylo pouze mořeny + KTL po 240 hodinách v NSS



Obrázek 27- Šrouby po 240 hodinách v NSS (Pouze mořeny + KTL)



Obrázek 28 - Šrouby po 240 hodinách v NSS (Pouze mořeny + KTL)

Příloha č. 2: Fotografie vysokopevnostních šroubů pouze s úpravou lamelárního zinku po 240 hodinách v NSS

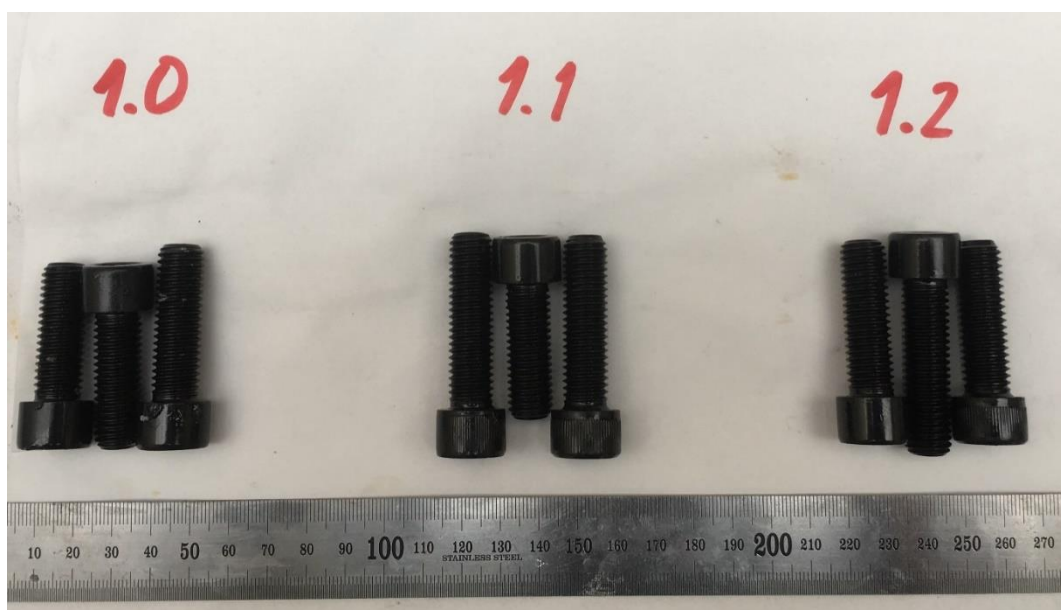


Obrázek 29 - Šrouby s PÚ lamelárního zinku po 240 hodinách v NSS

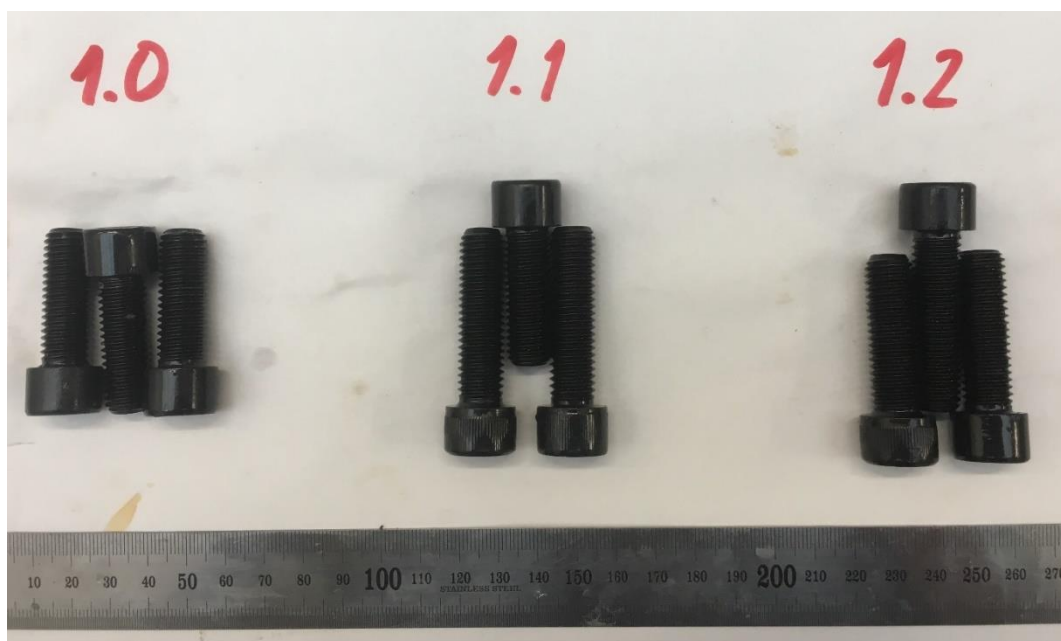


Obrázek 30 - Šrouby s PÚ lamelárního zinku po 240 hodinách v NSS

Příloha č. 3: Fotografie skupin vzorků v průběhu NSS



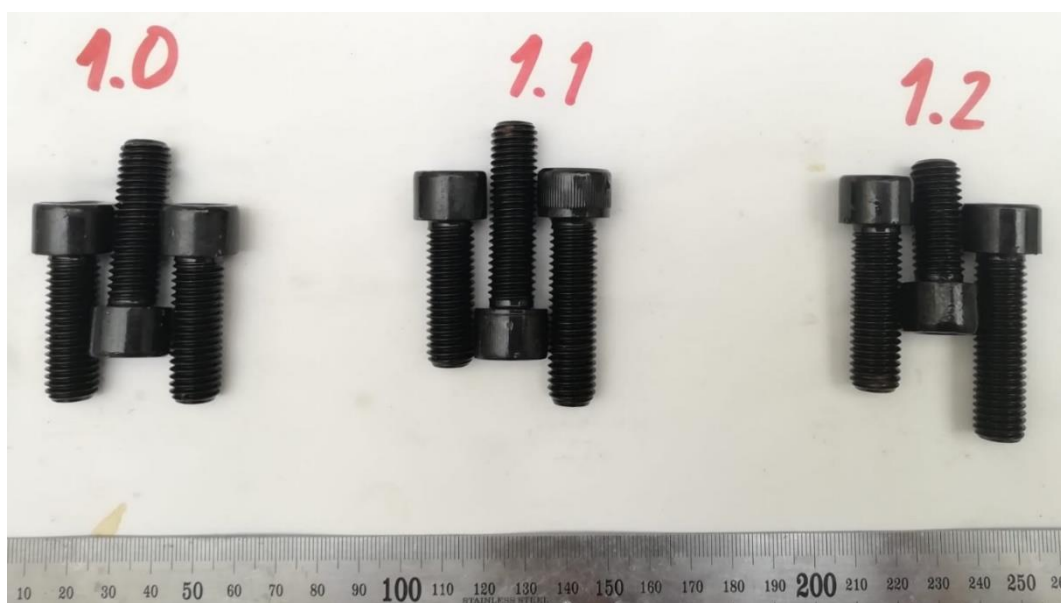
Obrázek 31 - Vzorky šroubů po 48 hodinách v NSS



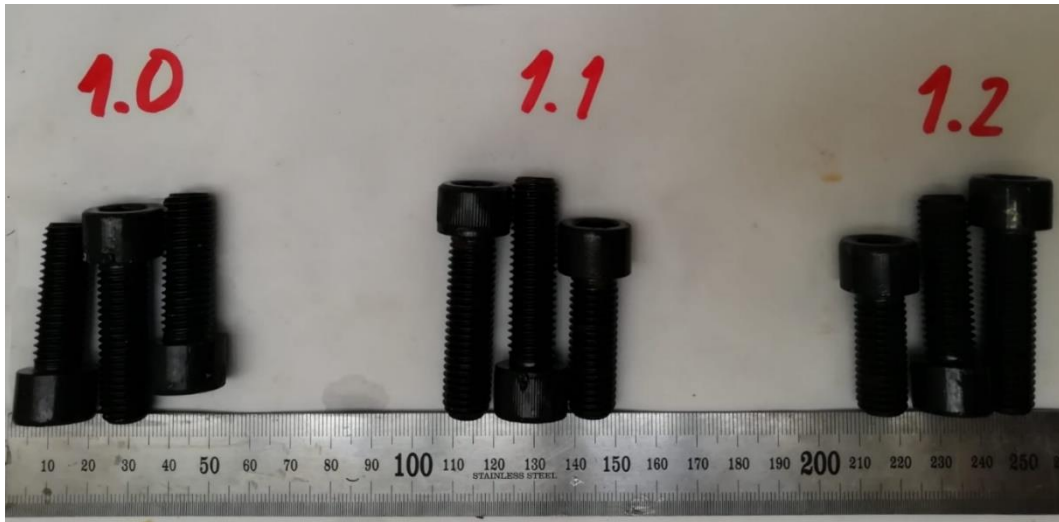
Obrázek 32 - Vzorky šroubů po 96 hodinách v NSS



Obrázek 33 - Vzorok šroubů po 144 hodinách v NSS



Obrázek 34 - Vzorok šroubů po 216 hodinách v NSS



Obrázek 35 - Vzorok šroubů po 320 hodinách v NSS