

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering**

Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Příčiny a důsledky nevhodných aplikací povrchových úprav.

**Causes and Consequences Undersirable Applications of Surface
Treatments.**

Summary

The field of surface finishing has undergone significant qualitative changes and attained a wide breadth and deep understanding thanks to the progress of science and many practical experiences.

The traditional application areas of this field include activities aimed at the protection of metals from corrosion, as well as many new and even more important tasks with respect to coatings used in production technology, transportation, medicine, and many other activities.

Surface finishing follows the worldwide trend: production possibilities get wider, but production conditions become more restrictive. Here we mainly have in mind the necessity to comply with very strict environmental-protection requirements applicable to all kinds of surface-finishing technology.

From the point of view of users, the issues seem to have been solved – there is a wide range of technology options for coating and applications of surface layers, designed and implemented to provide protection from corrosion, wear, and other aspects.

From the professionals' point of view, the situation is a bit more complex, since all members of the technical public potentially have to cope with making correct selections of a surface-finishing method.

When deciding about surface protection, or surface finishing in general, adverse effects should be eliminated by a suitable combination of materials, design and technological implementation.

The level and importance of any field can be viewed from two sides:

- as a list of positive achievements;
- pointing out the serious character of negative consequences when the importance of their causes is underestimated.

The importance of surface finishing may sometimes be better understood through instances of its insufficiency or failure.

Due to the requirements on the surface finishing, this lecture is aimed at showing selected examples of potential failure and errors, thus emphasising the importance of this field and its knowledge for designers and manufacturing engineers.

Souhrn

Obor povrchových úprav vlivem pokroku ve vědě a technice i vzhledem k mnoha praktickým zkušenostem dosáhl značných kvalitativních změn, nabyl širokého rozsahu i hlubšího smyslu.

K tradičním úkolům tohoto oboru v němž jsou zahrnuty činnosti spojené s ochranou kovů proti korozi, přistupují zcela nové a kvalitativně důležitější úkoly, které musí splňovat funkční povlaky ve výrobních technologiích, dopravě, medicíně i v řadě dalších oblastech lidské činnosti.

Stejně jako u ostatních výrobních oborů i pro povrchové úpravy se celosvětově rozšiřují výrobní možnosti, ale i omezují výrobní podmínky. Zde se jedná především o plnění velmi přísných ekologických podmínek a to u všech technologií tohoto oboru.

Z pohledu uživatele povrchových úprav zdá se být tato problematika v zásadě vyřešena značnou škálou technologií poskytujících vhodné úpravy povrchu formou povlaků a vrstev navrhovaných a realizovaných z důvodů ochrany proti korozi, opotřebení i řady dalších.

Z pohledu profesionálního, kdy je kdokoliv z technické veřejnosti potenciálně stavěn před zodpovědná rozhodnutí správné volby povrchových úprav, je tato problematika složitější.

Při rozhodování o ochraně povrchů, respektive provedení povrchové úpravy jde vždy o vhodnou kombinaci volby materiálů, konstrukčního návrhu a technologického zpracování tak, aby nedocházelo k negativním důsledkům.

Jakýkoliv obor, jeho úroveň i důležitost je možno představit dvojím způsobem:

- výčtem dosažených pozitivních výsledků
- upozorněním na závažnost negativních důsledků při podceňování významu jejich příčin.

I důležitost povrchových úprav může být více vnímána při jejich nedostatečnosti nebo selhání.

Vzhledem k nárokům kladeným na obor povrchových úprav má tato přednáška za cíl na vybraných příkladech potenciálního selhání a chyb zdůraznit potřebu znalostí tohoto oboru pro konstruktéry i technology.

Klíčová slova: povrchové úpravy, ochrana proti korozi, ochrana proti opotřebení, technologie povrchových úprav, eloxování, zinkové povlaky, kluzné laky, čištění povrchů .

Keywords: surface treatments, corrosion resistance, wear resistance, technology of surface treatments, eloxal anodizing, zink coatings, sliding varnish, surface cleaning.

České vysoké učení technické v Praze

Název: Příčiny a důsledky nevhodných aplikací povrchových úprav.

Autor: Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Počet stran:

Náklad: výtisků

© Viktor Kreibich, 2004

ISBN

Obsah:

1. Negativní vlivy povrchových úprav na konstrukční materiály	6
1.1 Poškození ocelí vyvolané vodíkem	6
1.2 Vliv úpravy povrchu eloxováním na pevnostní hodnoty materiálů	8
2. Konstrukční chyby a příčiny nevhodných povrchových úprav	10
2.1 Volba vhodného způsobu protikoroze ochrany	10
2.2 Zásady správného konstruování	12
2.3 Důsledky nevhodných povrchových úprav šroubů	13
2.3.1 Povrchové úpravy šroubů	13
2.3.2 Selhání šroubových spojů	14
3. Technologické příčiny selhání a chyb povrchových úprav	17
3.1 Odstranění příčin a důsledků nekvalitního čištění povrchů	18
3.2 Příčiny technologických chyb v eloxování	20
3.2.1 Vlastnosti eloxační vrstvy	20
3.2.2 Pracovní parametry eloxování	21
3.2.3 Nejčastější chyby při eloxování	21
4. Ekologické příčiny nevhodných povrchových úprav	22
4.1 Ekologická legislativa povrchových úprav	23
4.2 Změny v technologiích povrchových úprav	24

1. Negativní vlivy povrchových úprav na konstrukční materiály

Vzhledem k rozdílným způsobům zhotovování povrchových úprav a především k negativním vlivům některých operací na upravovaný materiál je nezbytné velmi obezřetně rozhodovat o technologickém provedení zvolené povrchové úpravy. Je nutné posoudit možná negativní ovlivnění materiálů předúpravami povrchů (odmašťování, moření, tryskání) i parametry vlastní povrchové úpravy.

K nejčastějším potenciálním nebezpečím pro upravovaný materiál v povrchových úpravách patří především poškození vodíkem. Ten vniká do upravovaného materiálu při operacích moření a při všech katodických procesech v elektrolytech. Atomární vodík difunduje do materiálu a pokud nedojde k jeho bezprostřednímu odstranění způsobuje zkřehnutí tohoto materiálu.

K dalším negativním jevům patří teplotní ovlivnění materiálů. Pokud teplota procesů povrchových úprav ovlivňuje upravovaný materiál (např. žárové pokovení vysokopevnostních ocelí) může dojít ke změně jejich mechanických vlastností ale i k deformacím.

Podstatně ovlivnit vlastnosti materiálu může jejich vnitřní pnutí (např. procesy tryskání, návary, smaltování). Především tvar tryskacího prostředku a parametry tryskání ovlivňují zpevnění povrchových vrstev, iniciaci trhlin i deformace materiálu.

Přihlédnout je nutné i k nebezpečí plynoucím z nedokonalého odstranění chemikálií a vody po procesech povrchových úprav, ale i k možnému koroznímu poškození nevhodnou povrchovou úpravou.

1.1 Poškození ocelí vyvolané vodíkem

Při procesech povrchových úprav především při moření v kyselinách nebo při galvanických procesech vzniká následkem chemických, resp. elektrochemických procesů vodík, jehož určitá část může difundovat do materiálu. Vodík může vnikat do materiálu i při použití nevhodných procesních kapalin (omílání, obrábění), ale i při korozi materiálu.

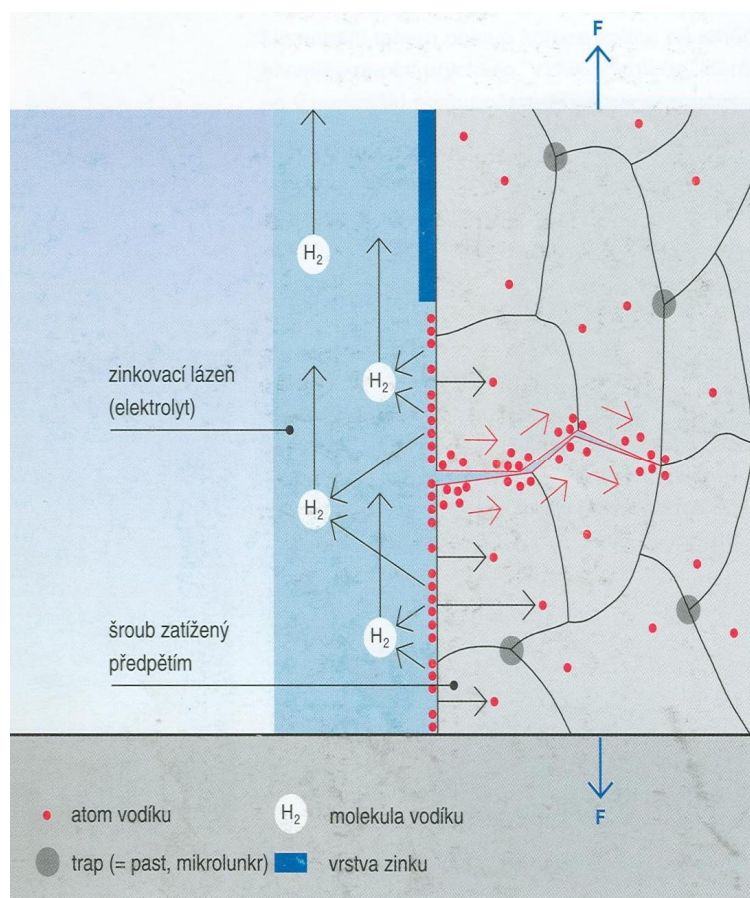
Vodíkové poškození se může objevit jako důsledek působení jednak plynného prostředí, jednak elektrolytů. Při korozi v elektrolytech na katodických místech vzniká vodík ve stavu zrodu, který může difundovat do krystalové mřížky kovu (na rozdíl od molekulárního vodíku, který difunduje do kovu velmi obtížně), kde způsobuje tzv. vodíkové zkřehnutí materiálů (obr. č. 1). Příčinou je pružná deformace mřížky intersticiálním vodíkem. Někdy bývá zkřehnutí připisováno tvorbě nestabilních a křehkých hydridů.

Vedle zkřehnutí materiálu se navodíkování může projevit vznikem tzv. zbrzděných lomů, ke kterým dochází náhle po určité době zatížení při napětí nižším než mez kluzu. Vodíkové ionty (protony) jsou v kovu zachycovány v tzv. vodíkových pastech (fázová rozhraní, vměstky, shluky dislokací, vakance, mikropóry apod.), kde rekombinují na molekulární vodík. Objem molekuly vodíku je však podstatně větší než celkový objem obou atomů vodíku. Protože molekulární vodík nemůže z materiálu difundovat, jeho tlak stoupá a vznikají stále se zvětšující dutiny. Tento proces končí tvorbou puchýřů nebo delaminací celých velkých ploch kovu. V místech lomu jsou póry, které rozrušení materiálu způsobily, vyznačeny bílými kruhovými skvrnami s hladkou a lesklou vnitřní plochou („rybí oka“).

Vedle teploty a množství pronikajícího vodíku je intenzita zkřehnutí závislá i na chemickém složení a struktuře kovové matrice.

U materiálu za předpětí (např. u předepnutého šroubu) se nejprve vytvoří mikrotrhlina na povrchu. Vysoká koncentrace napětí na špičce trhlínky přitahuje atomy vodíku. Trhlínky za působení síly předpětí a působení vodíku se dále zvětší. Vzniká nová špička napětí, která způsobuje zkřehnutí materiálu. Pokud již zbývající průřez materiálu sílu

předpětí neunese, dochází k náhlému lomu. Atom vodíku je podstatně menší než atom železa, proto velice dobře proniká do mřížky a má tendenci dostávat se do míst s vnitřním tahovým napětím. Tam pak může koncentrace vodíku kohezi kovové mřížky místně oslabit nebo tvorbou hydridů způsobit zkřehnutí materiálu.



Obr. č. 1. Schematické zobrazení dějů v mikrostruktuře materiálu při poškozování vodíkem.

Ohřátím, které rychlost difuze atomů vodíku do kovové mřížky urychlí, lze určité rozdíly koncentrací vyrovnat, nebezpečí zkřehnutí materiálu se sníží a vodík může dokonce z kovu uniknout.

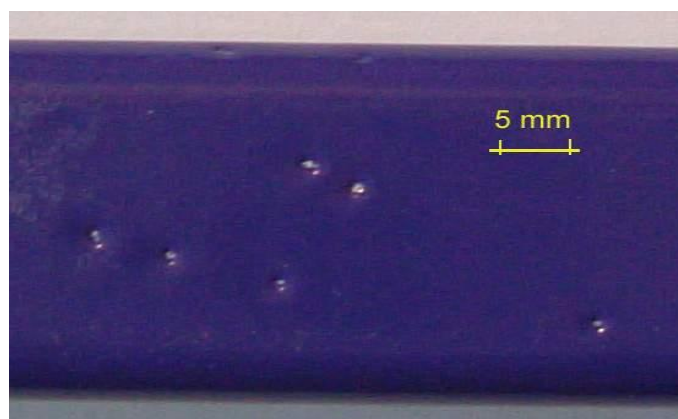
Vodíkovou křehkost lze odstranit vyžeháním po dobu 1 – 8 hodiny na teplotě 200 - 230 °C. Teplota 150 - 200 °C je i limitní teplotou pro vznik vodíkové křehkosti. Vodík rekombinovaný ve vodíkových pastech již nelze žádným způsobem odstranit.

Velikost vnitřního napětí je v přímé souvislosti s mechanickými vlastnostmi kovové součásti. Zkušenost ukazuje, že oceli od pevnosti 1000 N/mm² mohou pronikajícím vodíkem zkřehnout. V této kritické oblasti se nacházejí např. pevnostní šrouby, podložky z pružinové oceli, pojistné kroužky hřídelí a nábojů, ale i ocelové součásti, které byly zpracovány tvářením za studena extrémním způsobem.

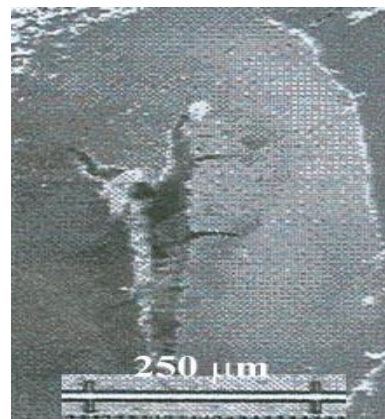
Vodíkové poškození je nebezpečné nejen pro vlastní upravovaný materiál ale zpětně i pro samotné povrchové úpravy. Při nižších teplotách je vodík méně rozpustný a tak se volné atomy či ionty začnou z materiálu částečně uvolňovat. Na obr. č. 2 jsou zobrazena poškození povlaku galvanického zinku a práškového plastu vlivem úniku vodíku z materiálu. Některé povlaky propouštění vodíku při odvodňování zpomalují (Zn) a některé mu zcela zabraňují (smalty, plasty).

Některá z opatření k odstranění příčin vodíkové křehkosti:

- změna polaritě při elektrolytickém odmašťování, resp. zavedení reverzních zdrojů (zboží je střídavě anodou / katodou)
- náhrada elektrolytického odmašťování čištěním za pomoci ultrazvuku
- omezení doby moření (z cca 3 – 4 hodin na 10 minut) otryskáním okují před mořením před žárovým zinkováním
- změna elektrolytů v galvanotechnice (nebezpečí navodíkování je menší u elektrolytů kyanidových, velké u elektrolytů slabě kyselých)



a)



b)

Obr. č. 2. Ukázky vlivu vodíku unikajícího z materiálu na destrukci povlaků:

- a) z práškového plastu při vytvrzování – polymeraci při 200 °C/ 20 min.
b) z galvanického zinku po odvodíkování - při 200 °C/1 hod

1.2 Vliv úpravy povrchu eloxováním na pevnostní hodnoty materiálů

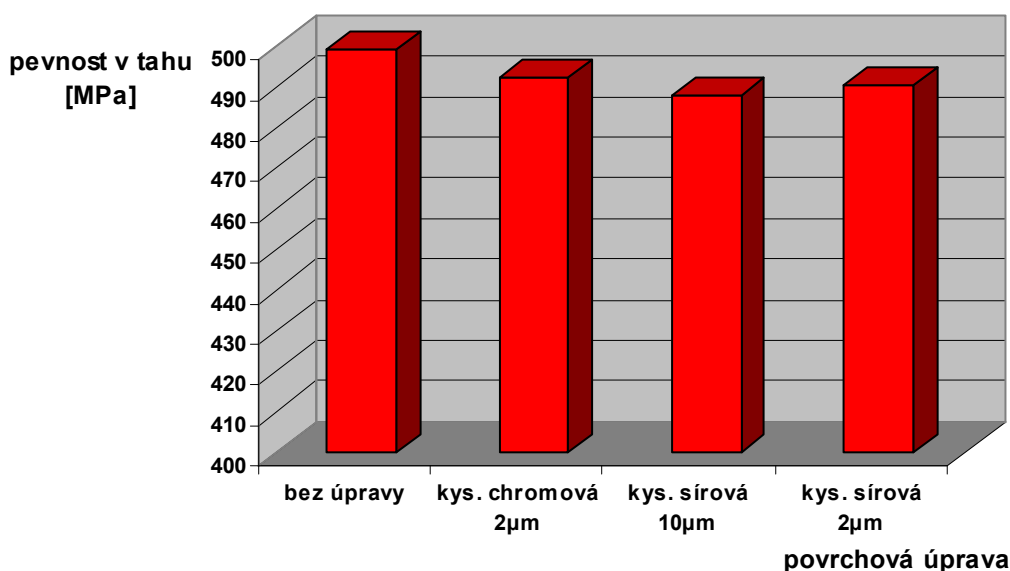
Anodická oxidace hliníku zásadně mění vlastnosti materiálu na jeho povrchu a umožňuje hliník použít za podmínek, kdy by jeho aplikace v základním stavu bez povrchové úpravy nebyla možná. Jde především o zvýšení korozní odolnosti i výrazné změny vzhledu (barevné eloxování), pozitivní změny otěruvzdornosti, tvrdosti a elektroizolačního odporu.

Vliv anodické oxidace jako povrchové úpravy na hliníkových slitinách se však projevuje negativně z hlediska snížení pevnostních hodnot materiálu a to především v aplikacích, kde je výrazný vliv povrchu součásti. Parametry meze kluzu, meze pevnosti, modulu pružnosti jsou ovlivněny poměrně málo (do 3%), zato parametry únavové pevnosti jsou ovlivněny výrazně (až o 25%).

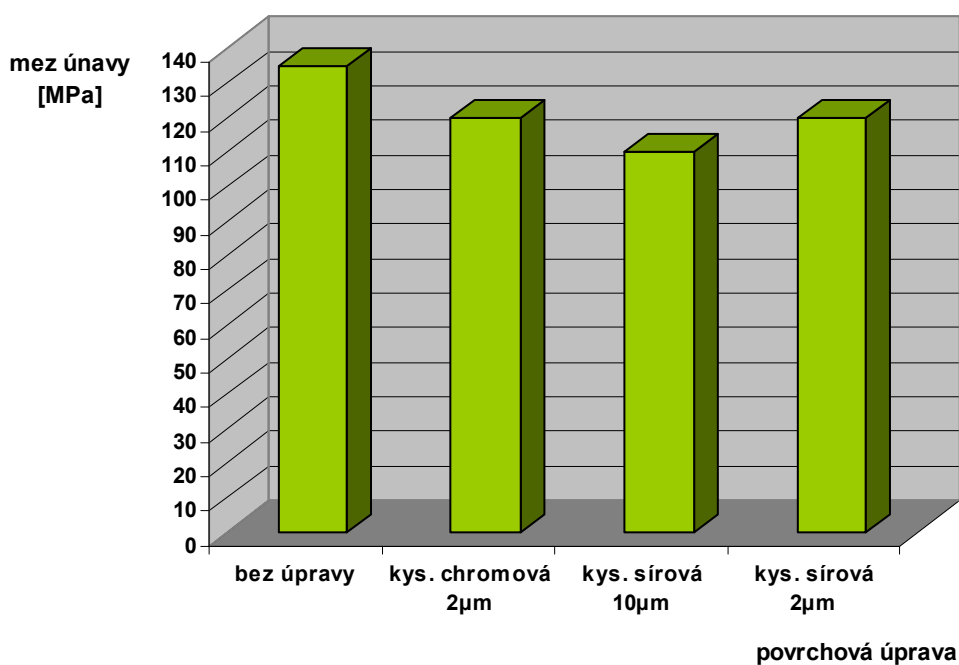
Z těchto důvodů byl sledován vliv eloxování na pevnostní (statické a únavové) hodnoty materiálů. Zkušební tyče byly podrobeny pevnostní zkoušce materiálu tahem a zkouškám cyklickým. Ploché zkušební vzorky vyrobené v souladu s normou z pevnostní slitiny hliníku 2024-T3 byly rozděleny do čtyř skupin. Prvá skupina byla ponechána bez povrchové úpravy. Druhá skupina byla eloxována v kyselině chromové na tloušťku povlaku 2 μm. Třetí a čtvrtá skupina byla eloxována v kyselině sírové na tloušťku povlaku 10 a 2 μm.

Některé z výsledků sledování vlivu různých lázní i různých tloušťek při eloxování na vlastnosti materiálů jsou zobrazeny na následujících grafech.

Na obr. č. 3. graf ukazuje na nepatrné snížení pevnosti eloxovaných vzorků při tahových zkouškách. Na obr. č. 4. je patrné podstatnější snížení pevnosti eloxovaných vzorků při únavovém namáhání.



Obr. č. 3. Grafické porovnání změny pevnostních vlastností materiálů po eloxování.
(Ověřeno na zkušebním zařízení UTS 250.4 Aero Vodochody).



Obr. č. 4. Grafické porovnání změny únavových vlastností materiálu po eloxování.
(Měřeno na pulsátoru VFP 20, SVUM Praha $\sigma_n = 2$ MPa, $F_n = 111$ N, $f = 106$ Hz).

Provedené zkoušky (ve spolupráci s podniky z letecké výroby) potvrdily nutnost eloxování v chromových eloxačních lázních u materiálů cyklicky namáhaných, přestože tato lázeň představuje větší zátěž pro životní i pracovní prostředí. Na základě potvrzení těchto zjištění a v souladu s vývojem této technologie u předních světových firem byly zavedeny tyto technologie i u leteckých výrobců v ČR.

2. Konstrukční chyby a příčiny nevhodných povrchových úprav

Spolehlivost a životnost povrchových úprav závisí podstatně na projekčním, resp. konstrukčním provedení příslušného záměru či výrobku.

Vzhledem k úzkým vazbám mezi konstrukčními požadavky a technologickými možnostmi je nutné již v projekční etapě provést volbu povrchových úprav. Dodatečná řešení, která se podvolí danému stupni konstrukčního rozpracování jsou většinou méně účinná.

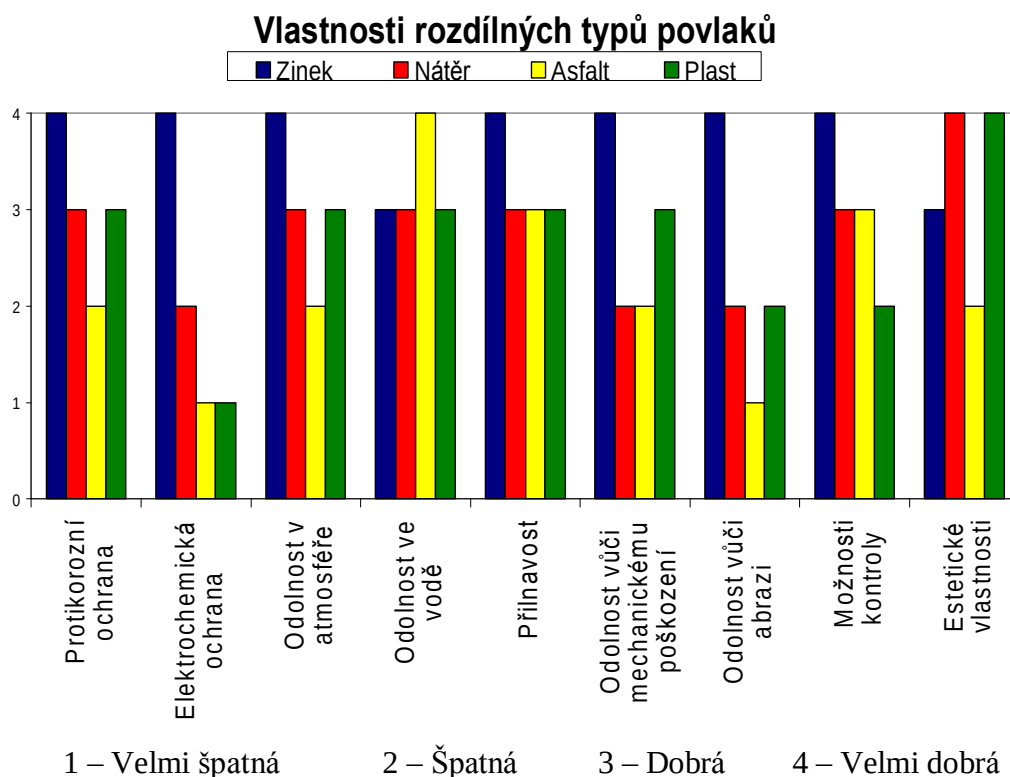
Zamezení konstrukčních chyb a nevhodných povrchových úprav je podmíněno respektováním všech poznatků a pravidel platných pro konstrukční řešení z hlediska funkce povrchových úprav a ochrany ale i z hledisek a požadavků zvolených technologií.

2. 1 Volba vhodného způsobu protikoroze ochrany

Při výběru protikoroze ochrany konstrukce je třeba posoudit a analyzovat mnoho technických faktorů. Zejména je nutné se důkladně seznámit s prostředím, ve kterém díly či konstrukce mají být provozovány. Zjišťuje se i jejich namáhání během dopravy, uskladnění, montáže nebo stavby.

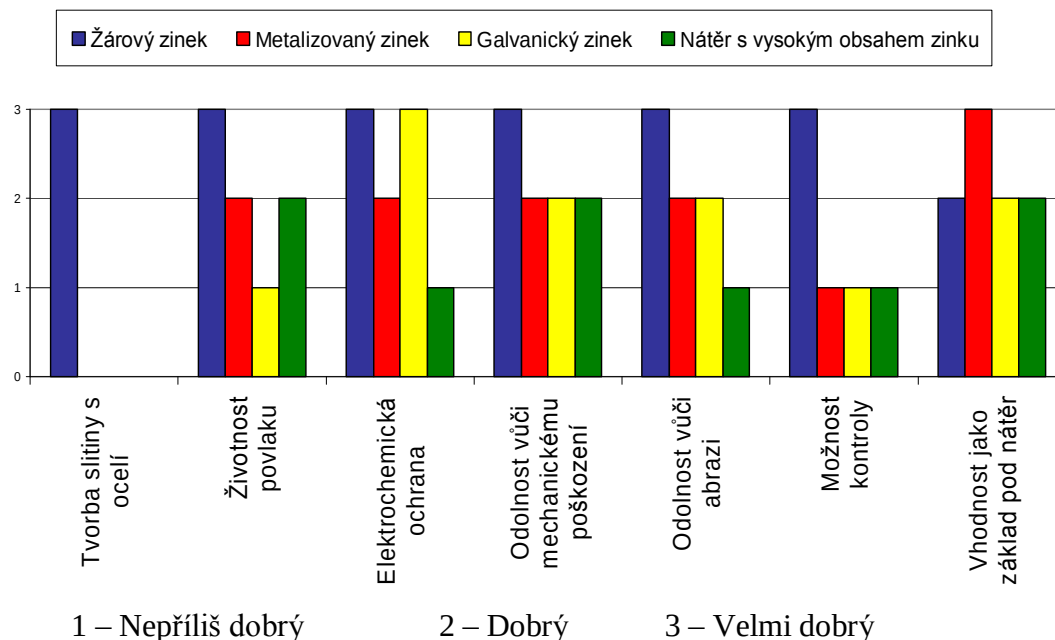
Dále by se měla provést porovnání a ekonomická analýza různých protikoroze ochrany. Je důležité, aby výběr protikoroze ochrany nevycházel pouze z výše pořizovacích nákladů na povlak, ale počítal i s cenou balení zboží pro dopravu, s cenou oprav po montáži a především s cenou údržby po celou dobu životnosti. Pořizovací cena povrchových úprav je pouze částí celkových nákladů.

Náročnost volby povrchové úpravy a zároveň i určitá zjednodušená metodika pro orientaci v této problematice je naznačena v následujících grafických porovnáních.



Obr. č. 5. Porovnání vlastností různých typů povlaků

Vlastnosti rozdílných typů zinkových povlaků



Obr. č. 6. Porovnání vlastností zinkových povlaků a nátěru s vysokým obsahem zinku.

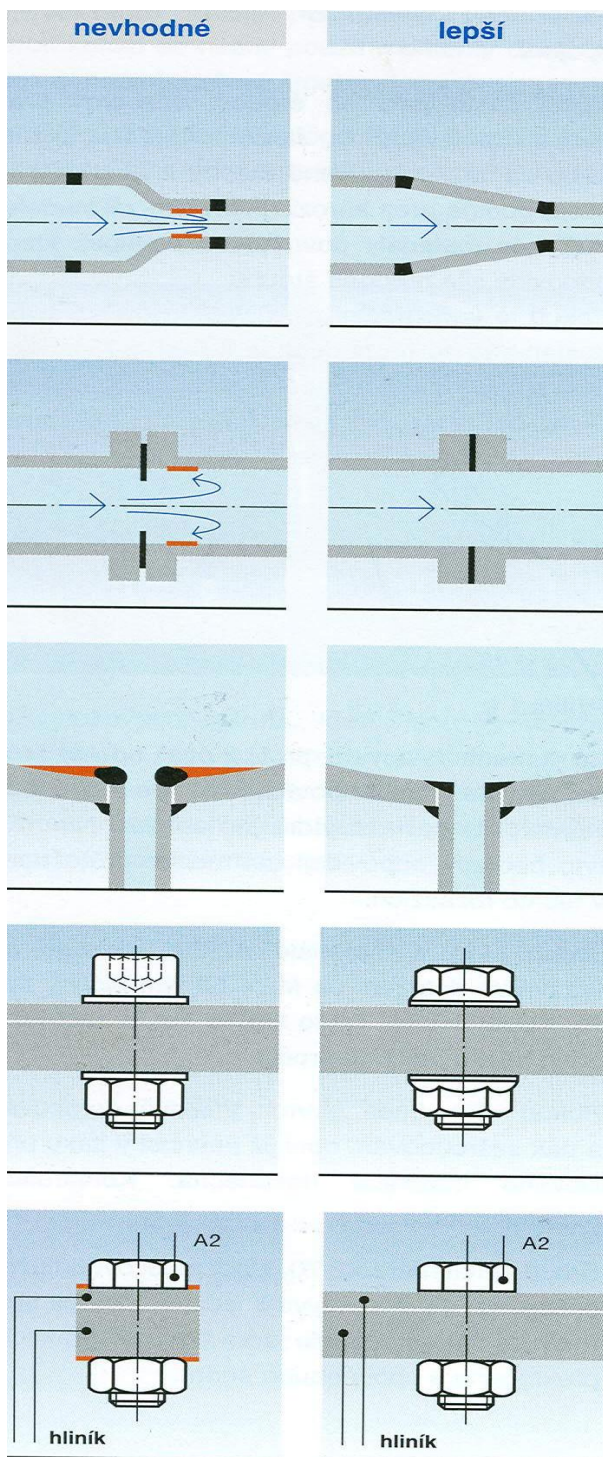
Typ povlaku	Životnost povlaku v letech																
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
galvanicky pokovená ocel dle DIN 50961 Zn 5 µm	.																
galvanicky pokovená ocel dle DIN 50961 Zn 20 µm																	
galvanicky pokovená ocel dle DIN 50967 NiCr 25 µm	..																
chemicky pokovená ocel dle DIN 50966 NiP 25µm																	
kontinuálně žárově zinkovaná ocel dle EN 10142 Zn 20 µm																	
metalizovaná ocel dle EN 22063 Zn 100 µm																	
žárově zinkovaná ocel dle EN ISO 1461 Zn 100µm																	
žárově zinkovaná ocel dle EN ISO 1461 Zn 100µm + nátěr dle EN ISO 12944																	
žárově zinkovaná ocel dle EN ISO 1461 Zn 100µm + práškový povlak																	
práškový povlak na oceli 1x 80 µm	..																
práškový povlak na oceli 2x 80 µm																	
nátěrový systém na oceli dle EN ISO 12944 160 - 200µm																	
Kategorie korozní agresivity atmosféry C 3, EN ISO 12944, průmyslová a městská atmosféra																	
..... zaručená životnost																	
----- pravděpodobná životnost																	

Obr. č. 7. Životnost rozdílných povrchových úprav při expozici v atmosféře střední Evropy.

2.2 Zásady správného konstruování

Obecné zásady při konstruování jsou ve většině případů orientovány snahou o omezení korozního poškození. Optimální konstrukční řešení z pohledu protikorozních ochranných má tyto hlavní zásady:

- zkrácení doby styku povrchu s agresivním prostředím
- zrovnoměrnění korozních podmínek (tvorba makročlánků, nehomogenita prostředí, proudění, přestup tepla, štěrby, koncentrátoři napětí)



Potrubí

Aby se zabránilo korozi a erozi, neměly by být změny průřezu a oblouků prováděny příliš těsně. Švy svarů by neměly nepříznivě ovlivňovat laminární proudění.

Příruby

Těsnění musí přesně zapadat do potrubí. Vyčnívající těsnění nepříznivě ovlivňují proudění, těsnění o menším vnějším průměru mohou vést ke štěrbinové korozi.

Správná konstrukce a špatná výroba

Je důležité, aby konstruktér dal pro kritické pracovní operace přesný návod na provedení, který pak musí být také dodržen

Šroubové spoje

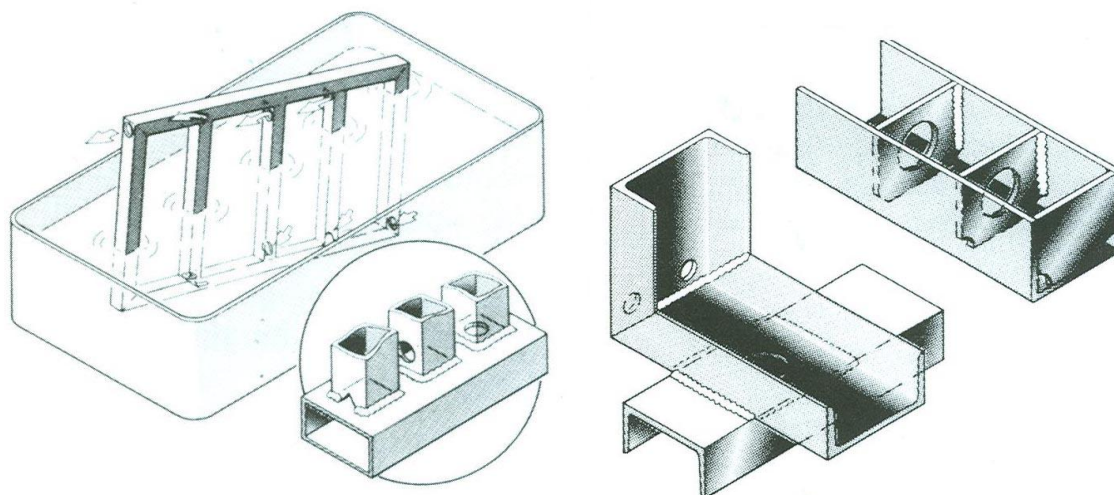
Musí se volit spojovací součásti, jejichž tvar umožňuje rychlý odvod vody. Aby se zabránilo štěrbinové korozi, mají se místo podložek volit přírubové šrouby a přírubové matice.

Rozdílné materiály

Pokud je šroubový materiál popřípadě jeho povrchový povlak podstatně ušlechtilejší, než povrchová plocha konstrukčního dílu, má být okolní plocha cca 10 x větší. Když je okolní, neušlechtilá plocha malá, může na ní dojít k silné kontaktní korozi.

Obr. č. 8. Některé z příkladů zásad konstruování.

- přispůsobení konstrukce předpokládaným technologiím povrchových úprav



Obr. č. 9. Hlavní zásada konstruování pro povrchovou úpravu žárovým zinkováním.
(Pamatovat na přítokové a odvodušňovací otvory i v přepážkách a koutech).

2.3 Důsledky nevhodných povrchových úprav šroubů

Při vzájemném pohybu i styku strojních součástí má zásadní význam stav a úprava jejich povrchů. Tribologické parametry a poznatky jsou důležité především pro provozní bezpečnost a životnost všech strojních součástí. Pro optimalizaci jejich funkce, pro pohyb a rozebíratelnost, je nutné též zohlednit i význam maziv vzájemných dvojic povrchů.

Vývoj povrchových úprav postupně dochází k aplikaci tenkých filmů, tzv. kluzných laků a to především tam, kde jsou nároky na přesnou montáž nebo kvalitní záběh.

Velmi důležitou součástí ve strojírenství je šroubový spoj. Pro jeho optimalizaci patří k rozhodujícím parametry materiálové, konstrukční, technologické, ale i parametry stavu povrchu. Šroubový spoj je spojení rozebíratelné. Tuto svoji funkci musí splňovat po celou dobu životnosti výrobků, a to buď svoji dostatečnou životností, nebo možností včasné bezproblémové výměny. Po dobu své životnosti nesmí dojít ke koroznímu poškození a proto materiál a jeho povrch musí mít dostatečnou korozní odolnost v daném prostředí.

Z hlediska funkčnosti šroubového spoje je však potřeba zajistit především bezpečnost spoje, která je odvislá nejen pouze od pevnostních hodnot materiálů, ale především od přesně definovaných parametrů montáže, a to především od osově předepínací síly šroubu. Ta je úzce závislá na stavu a úpravě povrchu, především na koeficientu tření. Povrchy šroubů musí mít proto nízké a opakovatelné hodnoty tření. Požadavky na povrchové úpravy šroubů rostou a rychle se vyvíjí v souvislosti s požadavky kladenými na jejich životnost, bezpečnost i technologii montáže. Uživatel dnes požaduje i zde kombinovaný povlak s dokonalou protikorozní ochranou i s definovaným stavem povrchu zajišťujícím bezpečnou montáž i demontáž.

2.3.1 Povrchové úpravy šroubů

Šroubové spoje je možno podle jejich určení a namáhání chránit různými úpravami povrchu nebo jejich kombinacemi. Technologie povrchových úprav nesmí ovlivnit vlastnosti materiálu (např. vodíková křehkost, ztráta pevnosti popouštěním) ani parametry šroubu (rozměry, koeficienty tření). Nejčastěji aplikované povlaky a technologie povrchových úprav u šroubových spojů jsou přehledně uvedeny v tab. č. 1.

Nejrozšířenější povrchovou úpravou šroubů jsou bezesporu povlaky ze zinku a jeho slitin. Důvodem je fakt, že zinek chrání železné kovy na principu katodické ochrany. Zinek vzhledem ke svému elektrochemickému postavení vůči železu reaguje s korozním prostředím přednostně před železem, což je výhodné především u pórů a místních poškození hran a závitů pozinkovaných spojovacích dílů.

V oblasti protikoročních povlaků na oceli se kromě čistého zinku a stále silně omezovaného kadmia rozšířilo používání slitinových povlaků zinku. Zinek legovaný kobaltem, niklem či železem v kombinaci s konverzní vrstvou vykazuje zvýšenou korozní odolnost i za extrémních podmínek a namáhání.

Druh povrchové úpravy	Technologie	Povlaky
Kovové	Žárové pokovení (ponorem)	zinkování
	Galvanické pokovení	zinkování, kadmiování, niklování, chromování, cínování
	Chemické pokovení	niklování
	Pokovení v lázni	Dacromet, Geomet, Delta Tone (Delta Seal), Altraseal, Zintek
	Mechanické pokovení	zinkování
	Termodifuzní pokovení	zinkování (scherardizování), chromování (inchromování)
Nekovové	Organické povlaky	povlakování (minicoat), kluzné laky, PTFE (Xylan), Epoxyd (Polyseal), Polyamid (Rilsan)
	Anorganické povlaky (konverzní)	tepelné černění, brynýrování, chromátování fosfátování, eloxování

Tab. č. 1. Povrchové úpravy šroubů

2.3.2 Selhání šroubových spojů

Analýzy příčin selhání šroubových spojů ukazují, že základem škod je většinou nedostatečné předepnutí šroubu - nedostatečná napínací síla nebo zadření. Obě příčiny lze ovlivnit použitím vhodné povrchové úpravy nebo náležitým mazáním.

Napínací síla šroubu F je ve velké míře závislá na součiniteli tření μ , tj. na kvalitě povrchu nebo na mazání, jak ukazuje následující rovnice.

$$M_A = F_M \cdot (0,16p + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + D/2 \cdot \mu_k)$$

kde: M_A = utahovací moment šroubu
 F_M = napínací síla šroubu
 p = stoupání závitu
 d_2 = střední průměr šroubovice závitu

μ_G = součinitel tření v závitu
 $D/2$ = účinný třecí rádius hlavy
 μ_k = součinitel tření dosednutí hlavy

Při konstantním utahovacím momentu M_A bude tedy při nízkém μ_k a μ_G napínací síla F_M vysoká a naopak. Platí, že z vynaložené utahovací síly se ztrácí až 50% jako tření hlavy a 40% jako tření v závitech a zůstává jen 10% na vytvoření požadované napínací síly.

Druhá největší příčina škod na šroubových spojích, zadření šroubu, je právě problém mazání, který se v denní praxi nejzřetelněji projevuje tím, že se nespočetné šroubové spoje v rafinériích, elektrárnách, chemických a strojárnách musí uvolňovat např. řezacími hořáky, protože mazání bylo nedostatečné nebo byly zadřené následkem koroze. Příčiny zadírání šroubových spojů jsou: svaření za studena, vyhřátí, koroze nebo odírání kmitavým třením (tribokoroze).

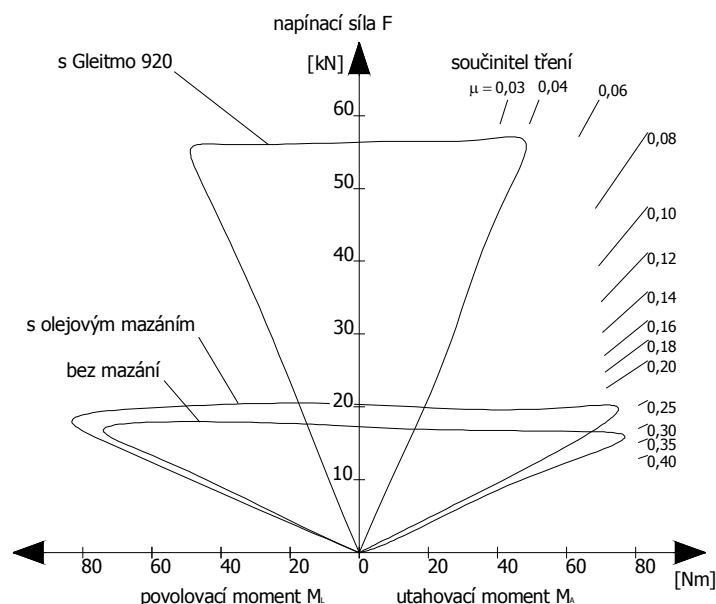
Zejména u vysoce legovaných ocelí (austenitické materiály), lehce dochází ke svaření za studena. Tyto ocele nemají silnou přirozenou vrstvu oxidu, která by účinně oddělila spojovací součásti. Chybí-li vhodná povrchová ochrana nebo vrstva vhodného maziva, dochází často již při utahování matice ke svaření povrchů.

Jsou-li šroubové spoje vystavovány vyšším teplotám, vznikají dodatečná namáhání. V závislosti na druhu materiálu, z něhož jsou šrouby vyrobeny, vznikají tvrdé a křehké vrstvy okují, které blokuji závit a znemožňují povoliti šroubový spoj.

Každý závit má boční vůli. Při utahování šroubu táhne jenom jeden bok závitu, vytvářejí se kapiláry, do nichž může lehce vniknout vlhkost nebo plyny, jež mohou způsobit korozi zejména u nelegovaných, ke korozi náchylných ocelí.

Tribokoroze vzniká vibracemi na styčných místech kovu, místech přenosu síly, v důsledku nejmenších relativních pohybů. Taková poškození materiálu vedou k únavovému lomu nebo k zadření závitu.

Na obr. č. 10 jsou zobrazeny závislosti napínacích sil na utahovacím a povolovacím momentu při různých hodnotách koeficientů tření.



Obr. č. 10. Závislost napínací síly na utahovacím a povolujícím momentu a koeficientu tření. Šrouby z ušlechtilé ocele (A2-M12) potažené kluzným lakem s MoS_2 (Gleitmo 920) v porovnání se šrouby namazanými pouze strojním olejem a nenamazanými.

Kluzné vlastnosti jednotlivých součástí lze zlepšit vhodným funkčním povlakem. V této oblasti nabývá stále širšího významu a hlubšího smyslu obor povrchových úprav. Správnou volbou a kombinací funkčních povlaků lze zlepšit kluzné vlastnosti nad kluzné vlastnosti samotného materiálu, respektive ochranného povlaku. Velké uplatnění nacházejí prostředky označované jako kluzné laky. Kluzné laky jsou suspenze tuhých maziv v rozpouštědlech s anorganickými nebo organickými pojivy. Po vytvrzení vytvářejí pevně lpící, suchý film. Jsou vyráběny na bázi rozpouštědel, ale jsou i laky na bázi vody. Do kluzných laků se používá řada pigmentů a tuhých maziv s mazacími účinky.

Součinitele tření při výpočtu šroubových spojů jsou empirická čísla, která byla vybrána ze Směrnic VDI 2230 a jsou uvedena v tab. č. 2. Z ukazatelů v této tabulce se dá učinit tento závěr: protože součinitele tření jsou relativně vysoké a jejich pole rozptylu je příliš velké, může být dosaženo vyšších předpínacích sil když se použije vhodných maziv s nízkým součinitelem tření a nebo když se podaří omezit pole rozptylu. Při volbě vhodného maziva je možné obojí. Správná volba povrchových úprav a maziv šroubových spojů má význam i pro prodloužení „životnosti“ šroubů, což znamená, že šroub se při montáži nepoškodí a může se použít několikrát. Vrstvičkou maziva se sníží místní špičky pnutí, dosáhne se lepšího záběhu povrchů, které po sobě vzájemně kloužou, dosáhne se i příznivého záběrového pole a dřík šroubu je vystaven menšímu torznímu namáhání. Šroub je pro mazání nevhodný strojní prvek: povrchy jsou často špatně opracovány, či poškozeny transportem při utahování vznikají někdy ty nejvyšší tlaky, pohyb je velice pomalý.

Povrch I					Povrch II	
a) μ_K : hlavy šroubu a matice b) μ_T : závitu					proti materiálu proti závitu matice	
ocel černěná nebo fosfátovaná Zn			ocel kadmiovaná 6 μ m	ocel pozinkovaná 6 μ m		
lisováno válcováno	soustruženo řezáno	broušeno				
0,13 až 0,19 0,10 až 0,18 0,16 až 0,22	0,10 až 0,18 0,10 až 0,18	0,16 až 0,22 0,10 až 0,18 0,16 až 0,22	0,08 až 0,16 0,10 až 0,16 0,08 až 0,16	0,10 až 0,18 0,10 až 0,18 0,10 až 0,18	ocel	válcovaná hoblovaná, frézovaná, soustruženo řezaná, broušená
0,10 až 0,18 0,16 až 0,22	0,10 až 0,18	0,10 až 0,18 0,16 až 0,22	0,08 až 0,16 0,08 až 0,16	0,10 až 0,18 0,10 až 0,18	šedá litina temperovaná litina	hoblovaná, frézovaná, soustruženo řezaná, broušená
0,08 až 0,16	0,08 až 0,16	0,08 až 0,16	0,12 až 0,20 0,12 až 0,16		ocel	ocel, kadmiovaná 6 μ m kadmiovaná, vnitřní závit
0,10 až 0,18	0,10 až 0,16	0,10 až 0,20	0,16 až 0,20 0,10 až 0,18		ocel	pozinkovaná 6 μ m pozinkovaná, vnitřní závit
0,12 až 0,20 0,10 až 0,18		0,10 až 0,20			ocel	(broušená, válcovaná), fosfátovaná (třískově obráběná), fosfátovaná
0,08 až 0,20		0,08 až 0,20			Al-Mg	slitiny
0,08 až 0,20 0,08 až 0,16 0,08 až 0,14 0,10 až 0,18		0,08 až 0,20 0,08 až 0,16 0,08 až 0,14 0,10 až 0,18			ocel	ocel, kadmiovaná 6 μ m kadmiovaná, vnitřní závit pozinkovaná 6 μ m pozinkovaná, vnitřní závit

Tab. č. 2. Hodnoty součinitelů tření pro výpočty šroubových spojů (směrnice VDI 2230).

	sírník molybdeničitý	grafit	teflon (PTFE)
přílnavost	dobrá	přiměřená	malá
tvrdost/ Vickers	měkké	měkké	měkké
	1,26 ... 1,43	0,89 ... 1,26	< 1,26
měrná hmotnost g/cm ³	4,8	2,1 ... 2,3	2,2
mazací schopnost při malém zatížení	dobrá	dobrá	vynikající
mazací schopnost při velkém zatížení	velmi dobrá	přiměřená	malá
mazací schopnost ve vakuu	velmi dobrá	malá	dobrá
barva	černá	černá	bezbarvá / bílá
odolnost proti záření	dobrá	dobrá	malá
	šestiúhelníková	šestiúhelníková	částečně krystalická,
krystalická struktura	vrstevnatá mřížka	vrstevnatá mřížka	polymerní řetězec molekul
rozpustnost	nerozpustný	nerozpustný	nerozpustný
max. provozní teplota	300°C	600°C	260 - 300°C
koefficient tření (m) (*)	0,03 ... 0,1	0,1	0,01 ... 0,25
chemická stálost	dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá
antikorozi vlastnosti	přiměřené	dobré	dobré
produkty rozpadu při oxidaci	MoO ₃ , SO ₂	CO, CO ₂	C ₂ F ₄

(*) koeficient tření závisí na mnoha faktorech, např. na tlaku, kluzné rychlosti, vlhkosti.

Tab. č. 3. Charakteristické vlastnosti tuhých maziv

Některé dosavadní prostředky na mazání šroubů, především vystavených vysokým teplotám, mohou mít na spojovací materiál i negativní vliv. Je nutné používat prostředky s tuhými mazivy pro vysoké teploty, které spojovací materiál nenapadají, tj. nevedou k žádným materiálovým změnám (Tab. č. 3.).

Povrchová úprava šroubových spojů vyžaduje pozornost nejen z hlediska ochrany proti korozi a ostatních vlivů prostředí, ale především z důvodů jisté a bezpečné montáže. Vysoké hodnoty utahovacích momentů nejsou ještě zárukou potřebného předepnutí spoje. Vhodná povrchová úprava kombinovaná s kluznými laky zajišťuje optimální montáž, zvyšuje životnost a zajišťuje i bezpečnou demontáž šroubových spojů.

3. Technologické příčiny selhání a chyby povrchových úprav

Celý obor usiluje o svoji technologickou vyspělost širokou nabídkou klasických technologií i rychlým zaváděním nových technologií na základě poznatků z chemie, fyziky, materiálů i z ostatních strojírenských technologií, na principech plazmy laseru či vakuových procesů a to v klasických i zcela nových rozměrových dimenzích z důvodů aby nedocházelo k omezování projekčních a konstrukčních záměrů.

Povlaky se zcela novými vlastnostmi, s vysokými parametry jakosti, dlouhou životností, otěruvzdorné povlaky, povlaky samomazné s tichým chodem a bezúdržbovým provozem, žáruvzdorné povlaky odolávající extrémním teplotám při vysokém stupni bezpečnosti, povlaky zabraňující vzniku zápalné jiskry, biokompatibilní povrchy chirurgických implantátů, povrchy s elektrickými a magnetickými parametry pro zpracování a uchování informací, to jsou jen některé z široké řady technologií povlaků a vrstev o parametrech a rozměrech potřebných a požadovaných pro rozvoj dalších oborů.

Neméně důležitým požadavkem na technologie povrchových úprav je vysoká kvalita povlaků a vrstev, kterou je nutno zajišťovat optimálními technologickými postupy a přísnou technologickou kázní

3.1 Odstranění příčin a důsledků nekvalitního čištění povrchů

Cílem procesu čištění je připravit součást co nejlépe pro další aplikace povrchových úprav. K tomu je zapotřebí používat účinný čisticí přípravek, účinné čisticí zařízení ale především mít možnost kontroly čistoty povrchu.

Nedokonalá technologie předúpravy povrchu a to především odmašťování způsobuje ve svém důsledku podstatné závady a chyby následných povrchových úprav. Ani při užívání vysoce kvalitních odmašťovacích přípravků a technologií není proces čištění bez chyb a závad pokud není zajištěno monitorování a kontrola procesu.

Mezi nejzávažnější a nejčastěji se vyskytující chyby procesu odmašťování patří klesající odmašťovací účinnost a především nekontrolovaný podíl koncentrací nečistot v odmašťovacích lázních. Tyto chyby lze efektivně odstranit zpětnou vazbou - kontrolou čistoty povrchu odmašťovaných součástí a bezprostředním doplněním či regenerací lázně. Tak lze optimalizovat kvalitu procesu odmašťování. Pro kontrolu čistoty odmašťovaných součástí existuje mnoho metod, avšak většina z nich je buď jen orientační a málo přesná nebo velmi zdoluhavá a použitelná pouze v laboratorních podmínkách. Na Ústavu strojírenské technologie fakulty strojní ČVUT v Praze ve spolupráci se zahraniční firmou Lames s.r.o. je v současné době testováno a kalibrováno zařízení pro bezkontaktní detekci čistoty povrchu. Toto zařízení využívá impulzní fluorescenční metodu pro detekci povrchu kontaminujících látek. Zařízení je možno zařadit přímo do čisticího procesu a umožnit ihned vyhodnocení kvality procesu čištění.

Metodika kontroly zamaštění je založená na luminiscenci některých kontaminujících látek při osvětlení ultrafialovým světlem příslušné vlnové délky. Znečištěné plochy jsou po vyhodnocení obrazu barevně vyznačené, přičemž odstínu zbarvení odpovídá určitá tloušťka znečištění (tloušťka mastnoty). Tato detekční metoda umožňuje tedy zjistit nejen rozložení znečištění ale i jeho množství. Je to progresivní způsob, který v budoucnu najde využití v odmašťovacích linkách jako samostatná operace mezikontroly. Na odmašťovacích pracovištích by měl přístroj doplnit dosavadní absenci kontroly odmaštění resp. kontrolu odmašťovacích lázní chemickou analýzou, což je zdoluhavé a nákladné.

Většina vad vyskytujících se v povrchových úpravách má za následek právě špatně či nedokonale provedenou předúpravou povrchu a proto je velmi nutné se touto problematikou zabývat a mít možnost vyhodnotit čistotu povrchu respektive odmašťovací schopnost ještě před samotnou aplikací následných povrchových úprav.

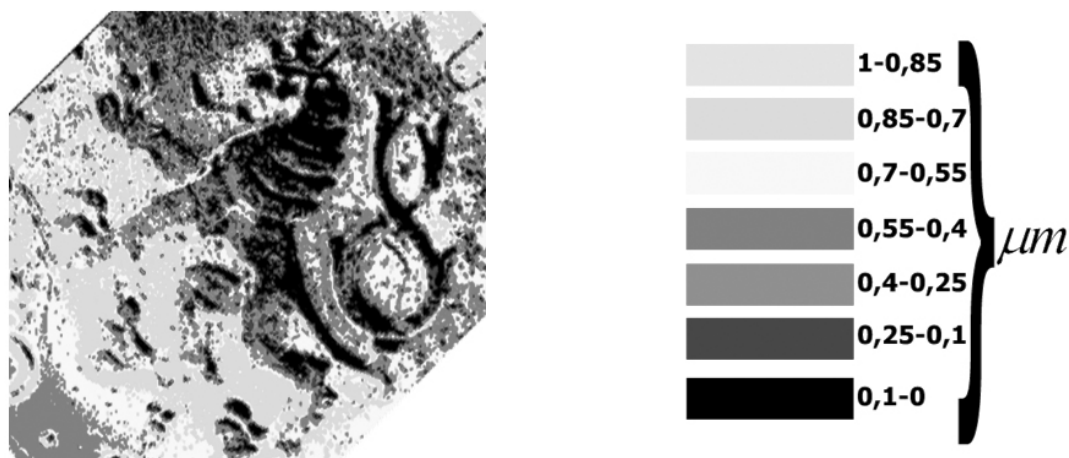
Na obr. č.11 je zobrazeno zařízení pro detekci zbytkového zamaštění na pracovišti povrchových úprav na Ústavu strojírenské technologie. Na obr. č.12 je ukázka měření stupně zamaštění resp. čistoty povrchu na reliéfu mince. Na obr. č.13 je patrná vysoká citlivost měření při detekci otisku prstu na obrobené ploše.

Toto progresivní zařízení je nyní ve fázi výzkumu, testování a kalibrace. Plně funkční je v laboratorních podmínkách, kde je připravováno pro uplatnění ve vazbě na jednotlivé povrchové technologie v podnicích majících o jeho využití zájem. (Feron a.s., Mora Moravia a.s., Autopal a.s., DK lakovny s.r.o.)

Metodika kontroly zamaštění je přínosem pro odstranění příčin nevhodného čištění a odmašťování, neboť slouží jako zpětná vazba pro zjišťování kvality těchto procesů. Zároveň je tímto způsobem možno podstatně prodloužit životnost lázní a tím optimalizovat celý proces čištění.



Obr.č. 10. Výzkumné pracoviště pro detekci zbytkového zamaštění na pracovišti povrchových úprav na Ústavu strojírenské technologie na FS - ČVUT v Praze.



Obr. č. 11. Ukázka měření tloušťky vrstvy mastnoty přístrojem na měření zbytkového zamaštění na reliefu mince.



Obr. č. 12. Zjištění stop znečištění po doteku ruky na obrobeném povrchu.

3.2 Příčiny technologických chyb v eloxování

Mezi nejvýznamnější povrchové úpravy hliníku a jeho slitin patří anodická oxidace – eloxování (elox, eloxal – elektrolytická oxidace Al). Eloxované vrstvy mají dobrou korozní odolnost, ořezuvzdornost i tvrdost a jsou dobře vybarvitelné. Při procesu eloxování se na povrchu hliníku a jeho slitin vytváří ve vhodných lázních vrstva oxidu hlinitého Al_2O_3 působením stejnosměrného (méně často střídavého) proudu. Je popsána řada technologií i lázní a to na bázi kyseliny šťavelové, citrónové, borité, chromové a sírové, která je používána nejčastěji. Podle charakteru procesu a následných vlastností rozlišujeme při eloxování vrstvy ozdobně-ochranné a tvrdé.

Struktura anodicky oxidovaného povrchu hliníku je tvořena z bezpórovité tenké vrstvy na rozhraní s kovem a postupně rostoucí podstatně silnější pórovité vrstvy na povrchu. Celková tloušťka ozdobně ochranné vrstvy Al_2O_3 se pohybuje od 5 do 20 μm , tvrdé vrstvy dosahují tloušťek až 100 μm . Mikropóry ve vrstvě Al_2O_3 mají průměr 0,01 až 0,02 μm a jejich četnost i rozměry závisí na parametrech eloxování a lázní (poměr délky a průměru pórů se pohybuje od 250 do 1000 :1). Pórovitost vrstvy má podstatný vliv především na operace praní i utěšňování, zásadní na vybarvování vrstvy, ale i na pevnostní parametry eloxovaného materiálu.

Ozdobně – ochranné vrstvy se dají vybarvovat řadou rozdílných metod, které poskytují vybarvení s odlišnými vlastnostmi. Nejběžnější je absorpční probarvení pórů anorganickými nebo organickými pigmenty. Po samotném eloxování a důkladném vyprání resp. po následném vybarvení je nutné provést utěsnění pórů, operací při které se oxid hlinitý Al_2O_3 mění na böhmit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ s větším objemem. Eloxování je konverzní povrchová úprava. Oxid hlinitý má však větší objem než čistý hliník a proto roste vrstva Al_2O_3 i částečně nad původní rozměr součásti a to cca o 33 % (2/3 tloušťky vrstvy je konverzní, tedy do materiálu a 1/3 představuje nárůst rozměru). Eloxační vrstva je elektricky nevodivá a má dobré izolační vlastnosti (průrazné napětí tloušťky 1 μm je 20 až 40 V).

3.2.1 Vlastnosti eloxační vrstvy

Hustota: Jelikož jde o pórovitou vrstvu mění se hustota vrstvy s její tloušťkou podle složení materiálu a podle parametrů eloxování (při vyšších teplotách a delších dobách oxidace jsou vrstvy pórovitější).

Pórovitost: Průměr pórů (0,01 až 0,02 μm) eloxační vrstvy závisí na způsobu eloxování. Navíc k této primární pórovitosti, která je tím nižší, čím vyšší je napětí při eloxování přistupuje i sekundární pórovitost, která vzniká rozpouštěním části vrstvy (závisí především na teplotě lázně) a navíc pórovitost strukturální, která vzniká rozpouštěním některé složky slitiny. Čím je vrstva pórovitější tím se lépe vybarvuje. Při běžných eloxačních podmínkách činí pórovitost asi 20 až 30 % objemu (vzájemná vzdálenost primárních pórů je přibližně shodná s jejich průměrem).

Tvrdost: Vlastní tvrdost oxidu hlinitého je velmi vysoká a pohybuje se mezi stupněm 7. až 8. Moosovy stupnice tvrdosti. Při ozdobně – ochranném eloxování je mikrotvrdost vrstev nižší cca 250 až 300 HV, při tvrdém eloxování mikrotvrdost vrstev dosahuje hodnot 400 až 800 HV. Tvrdost směrem od hliníku k povrchu klesá a do značné míry ji ovlivňuje teplota lázně. S klesající teplotou lázně tvrdost vrstvy roste.

Tloušťka vrstvy: Tento parametr eloxované vrstvy do značné míry ovlivňuje korozní odolnost. Tloušťka eloxované vrstvy roste se vzrůstající proudovou hustotou, vzrůstajícím napětím, s klesající teplotou a s nižší koncentrací elektrolytu. Tloušťku eloxované vrstvy h [μm] lze určit z tohoto vztahu:

$$h = 0,4 \cdot \eta \cdot I \cdot t \cdot s^{-1}$$

kde η je stupeň účinnosti lázně (0,6 až 0,7), I je hodnota stejnosměrného proudu [A], t je doba eloxování [min] a s je plocha zboží [dm^2].

3.2.2 Pracovní parametry eloxování

Jakost a tloušťka oxidické vrstvy je závislá na koncentraci lázně, teplotě, proudové hustotě a době anodické oxidace. Změnou těchto parametrů lze ovlivnit vlastnosti eloxované vrstvy. Pro nejčastěji používaný ozdobně ochranný způsob eloxování v kyselině sírové jsou obvyklé tyto pracovní parametry:

- Koncentrace H_2SO_4	5 – 20 %
- Proudová hustota	0,8 – 3 A/dm^2
- Napětí	10 – 20 V
- Teplota lázně	18 ± 2 °C
- Doba eloxování	5 – 60 minut

Při vyšších koncentracích kyseliny roste rychlost oxidace ale zároveň dochází k vyšší rychlosti rozpouštění oxidické vrstvy (max. rychlost oxidace je dosahována při koncentraci 30 % H_2SO_4). Při méně vodivé lázni (s menším obsahem kyseliny) jsou vrstvy tvrdší, je však nutný větší příkon proudu, lázeň se více ohřívá a je ji nutno více chladit. Použitím nižší koncentrace kyseliny, vyššího proudu za nižších teplot dosáhneme silnějších vrstev Al_2O_3 . Zvýšená teplota lázně je příčinou vytváření měkkých a pórovitých vrstev a prodloužení doby oxidace. Přibližně lze dobu eloxace vypočítat ze vztahu pro výpočet tloušťky eloxační vrstvy.

3.2.3 Nejčastější chyby při eloxování

Tyto závady vznikají při nedodržení technologických parametrů jednotlivých operací jak u předúprav, oxidace, barvení a utěšňování, tak především při operacích oplachu a vypírání vrstev. Technologické chyby anodické oxidace (především vzhledové vady) se mohou objevit až po delší době expozice.

Nevhodnost materiálu: Pro nejvyšší vzhledové požadavky je nutný hliník nejvyšší čistoty (99,99 % Al). Pro vysokou kvalitu oxidace vyhovuje hliník s obsahem do 0,5 % legur. Všechny hliníkové slitiny nelze eloxovat. Některé legury omezují možnost vybarvení nebo i anodické oxidace (např. mangan zbarvuje vrstvu do hněda, křemík do šeda, měď do žluta).

Pro bezproblémový proces eloxování může mít slitina hliníku obvykle tyto maximální hodnoty legur: Mg – 7 %, Zn – 10 %, Ti – 0,3 %, Cr – 0,3 %, Si – 3 %, Cu – 5 %, Mn – 1 %, Fe – 0,5 %. Nevhodnost materiálu pro eloxování ukáží orientačně již operace moření a vyjasnění.

Vady materiálu i zpracování (póry, hrubá struktura) jsou častou příčinou vad eloxovaných vrstev, respektive vyniknou při procesu oxidace nebo po vybarvení. Materiálové vady se objevují ihned při jednotlivých operacích této technologie.

Přemořený povrch: Příliš dlouhá doba moření nebo opakované moření odkryje (vyleptá) strukturální nehomogenitu materiálu. Intenzita poškození závisí na složení hliníkové slitiny i způsobu předchozího zpracování (válcování, protlačování).

Chyby při leštění: Špatným odvodem leštících zplodin jsou tato místa nedoleštěna. Vinou je špatné zavěšení.

Tenká vrstva: Důvodem je nízká proudová hustota obvykle z důvodu hodnot velikosti proudu podle hodnot napětí a ne podle skutečné plochy zboží. Příčinou může být i přehřátí lázně (rozpouštění vrstvy) a to i špatným mícháním lázně. Tato závada může být způsobena též vadou závěsu (neúplně očištěný závěs, malá přitlačná síla kontaktu upnutí).

Vrstva chybí: Pokud na některých místech chybí vrstva je příčina ve špatném odmaštění nebo došlo ke stínění špatným rozložením zboží vůči sobě ale i ke katodě. Problém vzniká někdy i po dotyku holou rukou po moření nebo výskytem bublin kyslíku v dutinách zboží. Pokud vrstva chybí vždy na spodku dílů je příčinou špatná výměna vody v oplachové vaně (vyšší kyselostí dojde k odleptání vrstvy).

Skvrny na povrchu: Příčinou je nejčastěji mastnota v mořicí lázni nebo elektrolytu, časté je místní přehřátí zboží (blízkost u katody), špatná předúprava, popřípadě nedostatečné odstranění pasivační vrstvy po elektrolytickém leštění. Příčinou může být místní přehřátí při předchozím mechanickém leštění a velmi často nekvalitní oplachy. Vinnou může být též i elektrický zkrat v lázni. Bílé skvrny na povrchu jsou často způsobeny zaschnutím špatně opláchnutého povrchu po odmaštění a nebo příliš dlouhou prodlevou před eloxováním.

Vrstva se stírá: Příliš teplá lázeň (nad 20 °C), silná koncentrace H_2SO_4 , velká proudová hustota. Zvýšení teploty eloxování má za následek zvětšení pórů v anodické vrstvě, což může způsobit porušení struktury vrstvy a její stírání. Zvýšení teploty může být i místní špatným odvodem tepla.

Změna odstínu vybarvení: Změna pH vybarvovací lázně z důvodu špatného vyprání zboží (především složitých detailů zboží) nebo málo častá nebo žádná výměna vybarvovací lázně. Nestejnoměrná teplota vybarvovací lázně. Příliš vysoká teplota vybarvovací lázně utěšňuje póry. Změnu odstínu vybarvení způsobuje nekvalitní vyprání vrstvy po eloxování a nekvalitní utěsnění pórů (nízká teplota nebo příliš krátká doba utěšňování). Pokud po vybarvení dojde k utěsnění v kyselé demi vodě, barva výrobku zreaguje s kyselým prostředím utěšňovací lázně a výrobek má tendenci změnit odstín vybarvení.

Korozní poškození: Při použití titanových závěsů dochází u některých materiálů (AlMg5 – ČSN 42 4415) reakcí v utěšňovací lázni k výskytu elektrochemického poškození hliníkových povrchů, které lze odstranit převěšením z titanových závěsů před procesem utěšňování.

Nedostatky v technologiích eloxování jsou ve většině případů způsobeny nedodržením parametrů jednotlivých operací, respektive i snahou po úsporách. Eloxování je technologie velmi jednoduchá ale zároveň velmi náročná na technologickou kázeň a dodržování minimální spotřeby chemikálií i vody. Praktické zkušenosti z provozů i výsledky laboratorních měření se shodují na minimálních spotřebách 50 až 100 g/m² upravované plochy všech základních lázní (NaOH, HNO₃, H₂SO₄) včetně odmašťovací lázně podle charakteru zboží, respektive stupně zamaštění. Vzhledem k ceně barviv je i dosti nákladnou operace vybarvování neboť při kvalitním vybarvování je spotřeba barviv 0,5 až 1 g/m² upravované plochy. Důležitá je u technologie eloxování např. i doba operace vypírání vrstvy, která se má minimálně provádět stejně dlouho jako byla doba operace anodické oxidace. Značné jsou proto nároky na spotřebu vody. Pokud se u běžných povrchových úprav galvanického charakteru předpokládá spotřeba vody na jednostupňový oplach 20 až 30 litrů na m², je spotřeba vody při anodické oxidaci až desetinásobná.

Nezbytný je i vhodný přístroj pro měření tloušťky eloxačních vrstev, respektive i další přístrojové vybavení např. pro kontrolu vybarvení popřípadě pro průběžnou kontrolu eloxační lázně.

4. Ekologické příčiny nevhodných povrchových úprav

Celosvětové ekologické uvědomování a energetické úspory mají zásadní vliv na vývoj jednotlivých technologií i celého oboru povrchových úprav.

Obor povrchových úprav je obecně k životnímu prostředí pozitivní. Brzdí a omezuje korozní a další destrukční děje a tím vede k úsporám materiálů, k jejich dokonalejšímu využívání, ke zvyšování jejich životnosti a přispívá k úsporám energie.

Vývoj však ukázal v jednotlivostech existenci i negativních důsledků: velká část činností v tomto oboru je potenciálně pro životní prostředí nebezpečná. Jsou to především technologie a materiály užívané ve výrobě organických a galvanických povlaků, inhibitory, prostředky k odmašťování a moření, ale i další látky. Na všech úrovních a ve všech technologiích čeká i obor povrchových úprav vyřešit požadavky plynoucí ze zákonů evropské legislativy.

Vzhledem k charakteru povrchových úprav jde hlavně o požadavky související s ekologickou legislativou. Tato legislativa EU je implementována především v těchto zákonech:

- Zákon č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivu na životní prostředí (EIA)
- Zákon č. 76/2002 Sb. o integrované prevenci (IPPC 96/61/EC)

V přímých souvislostech ekologické legislativy probíhá i optimalizace stávajících a vývoj nových strojírenských technologií.

4.1 Ekologická legislativa povrchových úprav

Jedním ze způsobů technických řešení zvyšování ochrany životního prostředí, efektivnosti a udržitelnosti technického rozvoje jsou v duchu zákona č. 76/2002 Sb. techniky BAT - Best Available Technique, tedy nejlepší dostupné techniky včetně souvisejících zařízení pro omezení negativních vlivů na životní prostředí.

Nejlepší dostupná technika BAT je definována jako nejúčinnější a nejpokrokovější stupeň vývoje použitých technologií a způsobů jejich provozování, které jsou vyvinuty v měřítku umožňujícím jejich zavedení v příslušném hospodářském odvětví za ekonomicky a technicky přijatelných podmínek s ohledem na náklady a přínosy, pokud jsou provozovateli zařízení za rozumných podmínek dostupné a zároveň jsou nejúčinnější v dosahování ochrany životního prostředí jako celku (zákon č. 76/2002 Sb.).

Smyslem používání a zavádění technologií BAT je předcházení vzniku emisí a pokud to není možné, alespoň tyto emise omezit a zabránit tak nepříznivým dopadům na životní prostředí jako celek. Nejlepší dostupné techniky BAT jsou souhrnem jednotlivých dílčích technických řešení, které doplňují a ovlivňují vlastní pracovní i související technologie a zajišťují jejich optimální řešení s ohledem na životní prostředí. Techniky BAT a referenční dokument BREF tak umožňují obecné hodnocení dané technologie a její vliv na ŽP. Techniky BAT byly v menší nebo větší míře používány i v předchozích letech, ale nebyly takto jednoznačně definovány.

Na úrovni EU vznikají v procesu výměny informací o BAT základní dokumenty popisující evropský standart, tzv. referenční dokumenty BREF. Tyto dokumenty mají charakter doporučení. BREF nestanoví žádné povinné techniky, technologie nebo hodnoty emisních limitů, ale potřebné informace k posouzení aplikovatelnosti určité techniky jak obecně, tak v konkrétních případech. Ne vždy je technikou BAT vysoký stupeň technického vybavení.

Na zavedení optimálních technologií a tedy i BAT technik se podílí zejména:

- technický rozvoj a aplikace nových vědecko-technických poznatků
- ekonomické tlaky na úspory (surovin a energií)
- výstavba nových a rušení zastaralých provozů.

Smyslem „Integrované prevence“ a BAT technik, resp. technologií je preventivně zamezit vzniku emisí optimalizací technologických postupů a teprve pokud to není možné omezit vliv emisí na životní prostředí.

BAT techniky musí podléhat z ekologických důvodů nepřetržitému procesu zdokonalování a aplikací nových poznatků a technologických zdokonalení.

4.2 Změny v technologiích povrchových úprav

Z ekologických důvodů i nových legislativních skutečností jsou po vstupu ČR do EÚ i v povrchových úpravách patrné podstatné změny v řadě technologií. Na ty nejzávažnější je upozorněno v následujících příkladech.

V povrchových úpravách obecně jsou jedním z největších znečišťovatelů a tudíž z nejproblematictějších operace čištění a odmašťování.

Z pohledu zákon č. 76/2002 Sb. a BAT jsou v procesech čištění zásadní tato kritéria:

- minimalizace zamaštění (omezování obráběcích kapalin – suché a polosuché obrábění, konzervace bez ropných produktů)
- monitorování procesu čištění a odmašťování (zpětná vazba v procesu čištění)
- údržba a čištění lázní (prodlužování životnosti lázní)

V oblasti nejčastěji aplikovaných povrchových úprav ve strojírenství jsou v současnosti požadovány vyřešit dva stěžejní problémy:

- náhrady ekologicky vhodných nezávadných dokončovacích operací po zinkování z důvodu omezení resp. zákazu šestimocného chromu Cr^{6+}
- zavedení alternativních způsobů zinkování za klasické způsoby zinkování
 - neelektrolyticky vylučovanými povlaky a systémy se zinkovými lamelami
 - organickými povlaky s vysokými obsahy zinku

Pod názvem „End of Life Vehicles“ („konec života automobilů“) odsouhlasil Evropský parlament požadavky na snížení nebezpečných látek ve vozidlech. Konečné znění z podzimu 2000 nabylo účinnosti jako vyhláška 2000/53/EG. Vyhláška stanoví, že vozidla uvedená do provozu po 1. červenci 2003 (později změněn termín na rok 2006) nesmí obsahovat žádné olovo, rtuť, kadmium nebo šestimocný chrom, kromě případů uvedených v příloze této vyhlášky. Pro obor povrchových úprav je nejdůležitější skutečností zákaz Cr^{6+} . Uvádí se zde, že maximální přípustná hodnota na vozidlo s hmotností do 3,75 t je 2g Cr^{6+} . Protože neexistuje metoda na stanovení obsahu šestimocného chromu v reálném voze, bude požadováno, aby nebyl v galvanizovnách Cr^{6+} používán vůbec. Toto opatření se týká především dokončovacích operací pasivace chromátováním.

Nové metody pasivace. Podle směrnice EU 2000/53/EG se musí veškeré systémy dokončovacích operací obsahující Cr^{6+} nahradit postupy bez šestimocného chromu. Doporučené náhrady dokončovacích operací typů chromátování-pasivace jsou v tab. č. 4.

Pasivace současná	Ochrana	Náhrada
modrá trojmocná	nízká odolnost	zůstane zachována
žlutý chromát	vysoká odolnost	vysoce odolná modrá pasivace
		silnovrstvá pasivace
žlutý chromát utěsněný	vysoká odolnost	vysoce odolná nebo silnovrstvá pasivace + utěsnění

Tab. č. 4. Současné a náhradní typy dokončovacích operací chromátování-pasivace.

Sloučeniny se šestimocným chromem patří mezi nebezpečné látky a jsou zdravotně a ekologicky závadné. Je prokázáno, že jsou toxické, karcinogenní a jedovaté, jsou rozpustné a tedy vylouhovatelny i lidským potem. Z těchto důvodů se celosvětově používání šestimocného chromu v současné době omezuje novými technologiemi pasivace.

Povlaky se zinkovými lamelami. Jednou z progresivních povrchových úprav, které vyhovují ekologickým požadavkům směrnic EU i požadavkům výrobců automobilů, jsou neelektrolyticky nanášené systémy s mikrolamelami či mikrovločkami zinku (Zincflake-coating) příp. hliníku ve speciálních anorganických resp. organických pojivech. Základem pojiv basecoatů jsou komplexní titanáty nebo zirkonáty na rozpouštědlové bázi nižších alkoholů a nejnověji, především u topcoatů i komplexní silikáty na vodné bázi. O pojivech na bázi titanátů, zirkonátů a silikátů je známo, že sama o sobě i bez zinku zlepšují korozní odolnost oceli. Povlaky se nanáší máčením, stříkáním a technologií dip-spin coating (namáčením, postřikováním a odstředěním v bubnu) s následujícím vysušením a vytvrzením v jedné i více vrstvách.

Povlaky na bázi mikrolamel zinku jsou mimo jiných aplikací, vzhledem k možnostem hromadného povlakování s výhodou používány k povrchové úpravě spojovacích součástí (šroubů, svorníků, vrutů, matic, podložek, některých druhů nýtů a elementů pro mechanické spojování plechu), pružin, spon, svorek a jiných kovových dílů. Tloušťka povlaku se pohybuje od 4 do 22 μm , podle typu povlakových materiálů a počtu vrstev. Tyto materiály snadno vnikají do dutin a kapilárních prostorů, lze je kombinovat i s kataforetickým lakováním a modifikací systémů lze snížit velikost součinitele tření. Vytvrzovací proces (při cca 200 °C) má velkou důležitost, protože kovové částice se s anorganickým pojivem navzájem spojují a současně reaguje pojivo s kovovým podkladem. Povlak se spojuje s podkladem pomocí chemické reakce. Povlak po vytvrzení obsahuje průměrně 80 objemových % Zn a Al částic v pojivu.

Povlak	Tloušťka povlaku [μm]	ISO 9227 solná mlha [h]	DIN 50017 kondenzační komora [h]
Delta-Tone	8	do 240	do 300
Delta-Tone	12	do 500	do 600
Delta-Seal	8	do 120	do 120
Delta-Tone + Delta-Seal	8 + 6	do 500	do 600
Delta-Tone + Delta-Seal	10 + 8	do 1000	do 1000
Delta-Protekt KL 100	10	min.600	-
Delta-Protekt KL 100 + Delta-Protekt VH 300	10 + 2	do 1000	-
Delta-Protekt KL 100 + Delta-Protekt VH 301GZ	8 + 2	do 1000	-
Galvanický Zn	10	do 72	do 200
Galvanický ZnCr	10	do 96	do 240

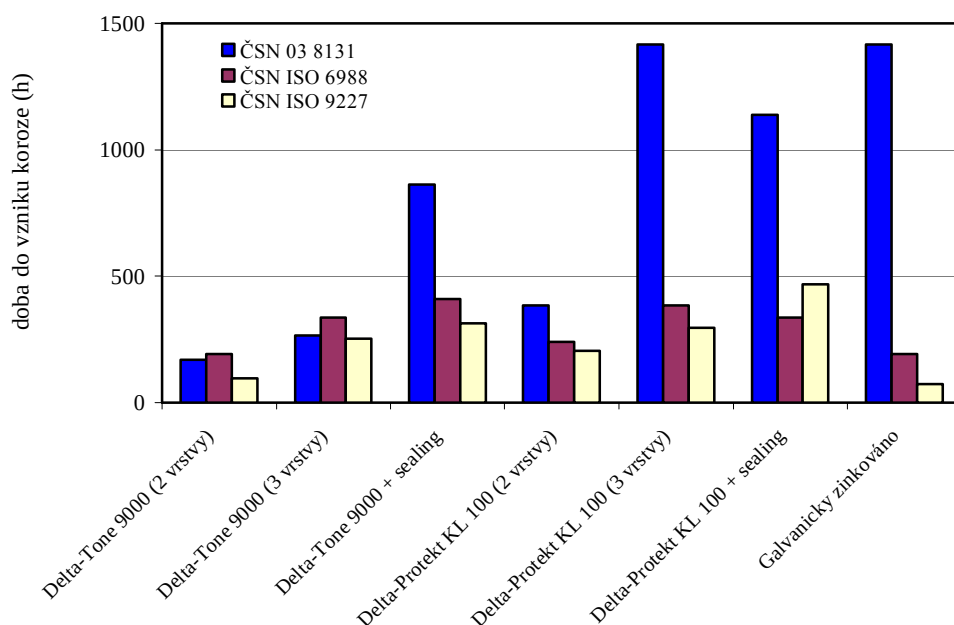
Tab. č. 5. Orientační hodnoty korozní odolnosti povlaků typu Delta® dle údajů výrobce Dörken MKS-Systeme GmbH.

V rámci diplomové práce byla provedena na Ústavu strojírenské technologie FS ve spolupráci se SVÚOM s.r.o. s těmito povlaky typu Delta[®] řada těchto urychlených korozních zkoušek:

- zkouška v kondenzační komoře dle ČSN 038131
- zkouška oxidem siřičitým s povšechnou kondenzací vlhkosti dle ČSN ISO 6988
- zkouška solnou mlhou dle ČSN ISO 9227.

Vzorky byly umístěny do korozních zkoušek a v pravidelných intervalech byly vizuálně vyhodnocovány změny povrchu. Rozhodujícím parametrem byl vznik prvních červených korozních bodů (tj. koroze podkladového kovu), případně změny stavu povrchu (puchýřky).

Výsledky korozních zkoušek (obr. č. 13) prokázaly rozdílné korozní chování povlaků v různých prostředích, kde se projevil rozdílný mechanismus koroze zinkového povlaku. Dosud byly publikovány jen výsledky korozních zkoušek mikrolamelových povlaků v prostředí čisté kondenzace a solné mlhy. V obou těchto korozních prostředí dochází ke vzniku objemných korozních produktů zinku, které postupně uzavrou případné póry a prostory mezi mikrolamelami tak, že korozní prostředí nepronikne k podkladovému kovu. V podmínkách zkoušky povšechnou kondenzací s SO₂ nevznikají objemné korozní produkty zinku a korozní prostředí rychle proniká póry a nespojitostmi povlaku k podkladovému kovu a vyvolá jeho korozní napadení. Výrazně se tento efekt projevil na plochých vzorcích s relativně vysokou tloušťkou povlaku.



Obr. č. 13. Grafické porovnání doby do vzniku koroze podkladového kovu při korozních zkouškách šroubů M10 – 45 (ČSN 021101.10) s povlaky typu Delta[®].

Výše uvedené výsledky měření potvrdily, že systémy Delta-MKS[®] jsou vhodné zejména pro použití v automobilovém průmyslu na spojovací součásti, pružiny, příchytky a další. Systémy Delta-MKS[®] vykazují ve většině korozních prostředích vyšší korozní odolnost v porovnání s galvanicky a žárově vyloučenými povlaky zinku. Na základě výsledků zkoušek byly zjištěny rozdíly v korozním chování různých typů povlaků Delta-MKS[®]. Obecně lze konstatovat, že byla potvrzena závislost korozní odolnosti povlaku na jeho tloušťce, resp. na

počtu a typu vrstev Delta-MKS®. Výsledná korozní odolnost závisí na typu a geometrii dílů a na způsobu povlakování. Předúprava povrchu zinečnatým fosfátem prokázala, že je vhodnější než úprava tryskáním.

Mimo fakt, že tyto progresivní technologie vyhovují požadavkům evropské legislativy je jejich výhodou především úplné odstranění nebezpečí vodíkové křehkosti a potlačení ztráty pevnosti popouštěním u pevnostních materiálů a pružin nízkou teplotou vytvrzování (200 °C).

Závěr

Ptáme-li se po příčinách nevhodných aplikací povrchových úprav, zjišťujeme, že jde téměř vždy o podcenění znalostí a poznatků z nauky o materiálech, konstruování i strojírenských technologiích.

Důsledky těchto příčin mohou být rozdílné: od selhání funkce povrchových úprav (koroze, opotřebení) až po ovlivnění původních vlastností materiálů.

Nevhodné povrchové úpravy mohou vést ve svých důsledcích i k negativnímu působení na životní prostředí, ale i na bezpečnost pracovního prostředí.

Předložené příklady povrchových úprav, respektive příčin a důsledků chyb v tomto oboru byly vybrány na základě prací autora řešených ve své pedagogické činnosti na strojní fakultě ČVUT v Praze.

Tyto příklady měly za cíl poukázat na důležitost:

- poznání vlivu povrchových úprav na materiály
- volby povrchových úprav konstruktérem
- provedení povrchových úprav konstruktérem

a tím i zdůvodnit smysluplnost pedagogické práce v této oblasti strojírenských technologií na technické univerzitě i v technickém vzdělávání.

Literatura

- [1] KREIBICH, V.: Chyby v technologiích povrchových úprav, Celostátní aktiv galvanizérů, Jihlava 2003, st. 55 - 57, ISBN: 36
- [2] KUDLÁČEK, J. – KREIBICH, V.: Optimalization of cleaning process, In: CO-MAT-TECH 2004 – Zborník abstraktov, Trnava, 2004, s.707-713, ISBN 80-227-2121-4
- [3] KREISLOVÁ, K., KREIBICH, V., HLAVÁČEK, V.: Korozní vlastnosti lamelových zinkových povlaků, konference legislativa EU do čistějších technologií, Trenčín 2004
- [4] ASM HB Volume 5 - Surface Engineering, 1994, ISBN:0-87170-384-X
- [5] LIBORA, P.: Problematika povrchových úprav šroubových spojů, Diplomová práce FS – ČVUT, Praha 1999
- [6] SVOBODA, Z.: Neelektricky vylučované povlaky se Zn mikrolamelami, Diplomová práce FS –ČVUT, Praha 2003
- [7] GÄNSHEIMER, J.: Optimierung von Schraubenverbindungen, Gleitmo – bond, 1998, firemní literatura
- [8] HLAVÁČEK, V. - KREIBICH, V.: Pvlaky s mikrolamelami zinku, MM – průmyslové spektrum, říjen 2004, st. 30 - 32
- [9] KREIBICH, V.: Eloxal – anodizing technology and errors. In: 45. Medzinárodná galvanická konferencia, Bratislava, 2003, s.78-84, ISBN 80-227-1916-1
- [10] THURNER, M.: Registrace žádosti o vydání integr. povolení, Sborník Kvalita, technika a technologie ve strojírenství, Praha 2003, st. 32 - 36
- [11] KREIBICH, V. - VYŠOHLÍD, V.: Zinkové povlaky v lakovnách, MM – průmyslové spektrum, říjen 2004, st. 38 – 38
- [12] CHOVANCOVÁ, M. - FELLNER, P.- ŠPIRK, E.: Základy korózie a povrchovej úpravy kovových materiálov, STU Bratislava, 2002.
- [13] KREIBICH V.: Progresivní a ekologické metody čištění povrchů, konference Progresivní technologie a materiály, Praha 2002, st. 73 - 77
- [14] SEDLÁČEK, V.: Povrchy a povlaky kovů, Praha, ČVUT Praha, 1992.
- [15] HOLMBERG, K. – MATTEWS, A.: Coatings Tribology; Properties, Techniques and Applications in Surface Engennering, 1994, s. 442.
- [16] Předpis VDI 2230, 1997: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindund. Nakladatelství Beuth GmbH, Berlín
- [17] NILSEN, R. – SCHEIE, J.: Testing the Accuracy of Adhesion / Cohesion Equipment. Protective coatings Europe 1 (11), 24-32. (1996).
- [18] MATTHEWS, A.- ARTLEY, R.J. - HOLIDAY, P. - STEVENSON, P.: The UK Engineering Coatings Industry In 2005, The Research Center in Surface Engineering, University of Hull, UK, 1992
- [19] KUDLÁČEK, J. - KREIBICH, V.: Analysis of Thin Composite Layers. In: MM Industrial Magazin Western Europe, Vol.20, No. 1 – 2 March 2003, ISSN 1432-6345, s. 4.
- [20] KREIBICH, V.: Problematika ovlivňování vnitřních pnutí v galvanických povlacích. In: 41. Medzinárodná galvanická konferencia. Bratislava : Dom techniky, 1999, s. 113-118. ISBN 80-233-0432-1.
- [21] KREIBICH, V.: Kluzné laky v povrchových úpravách. In: Korózia a ochrana materiálu proti korózii - IV. medzinárodná konferencia. Trenčín : Výstavisko TMM, 2000, s. 24-27.
- [22] KREIBICH, V. – KUDLÁČEK, J.: Zinkování – možnosti a požadavky, In: 46. Medzinárodná galvanická konferencia, Bratislava, 2004, s. 168–180, ISBN 80-227-2085-2

Odborný životopis

Jméno:	Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Vzdělání:	SVVŠ v Písku Fakulta strojní ČVUT v Praze 1972 Aspirantura FS – ČVUT v Praze 1982
Zaměstnání:	SNTL - Nakladatelství technické literatury - Odborný redaktor 1973-1974 FS-ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie 1974 – dosud
Odborná činnost :	Odborný asistent na Ústavu strojírenské technologie FS – ČVUT v Praze. Přednáší ve všech formách výuky. Vedoucí autor učebnice Strojírenská technologie pro střední průmyslové školy, autor řady skript, odborných článků a příspěvků do sborníků odborných konferencí. Odborný garant postgraduálního studia „Povrchové úpravy ve strojírenství“ v rámci Celoživotního vzdělávání na ČVUT a garant řady odborných seminářů. Aktivní spolupráce s řadou podniků, výzkumných pracovišť a firem v ČR i zahraničí. Členem odborných společností a asociací ve strojírenství. Znalec v oboru strojírenství jmenovaný ministrem spravedlnosti od roku 1982.

Přehled aktivního působení v různých komisích, organizacích apod.:

Člen výboru ASI (Asociace strojních inženýrů na fakultě strojní ČVUT)	1999 – dosud
Člen výboru ČSPÚ (Česká spol. pro povrchové úpravy)	1999 - dosud
Viceprezident ČSPÚ	1999 do 2001
Člen komise IPPC při Ministerstvu průmyslu - skupiny pro povrchové úpravy kategorie 2.3c, 2.6 a 6.7 podle přílohy č.1 zákona 76/2002 Sb	2002 - dosud
Člen SSPÚ (Slovenské spol. pro povrchové úpravy)	1999 - dosud
Soudní znalec Ministerstva spravedlnosti ČR;	1982 - dosud
Vedoucí redaktor periodika Zpravodaj ČSPÚ	1999 – dosud