

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav strojírenské technologie**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Odolnost proti otěru žárově zinkovaných povlaků**

**Autor:** Lenka Koudelková  
**Studijní program:** Teoretický základ strojírenského inženýrství  
**Studijní obor:** bez oboru  
**Vedoucí práce:** Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

**Praha 2016**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro Lenku KOUDELKOVOU

Program: Teoretický základ strojírenského inženýrství

Obor:

Název: Odolnost proti otěru žárově zinkovaných povlaků

Název anglicky: Abrasion resistance of hot-dip galvanization

### Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky žárového zinkování
2. Vliv chemického složení základního materiálu
3. Legování zinkovací lázně
4. Vliv cínu na otěruvzdornost zinkových povlaků

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

Konzultant: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 12. 8. 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání bakalářské práce převzal dne: 3. 5. 2016

  
-----  
Student

  
-----  
Vedoucí ústavu



  
-----  
Děkan

V Praze

dne 24. 4. 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně pouze s použitím podkladů, které jsem uvedla v příloženém seznamu a poskytnutých konzultací.

V Praze dne:

.....

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za cenné rady, které mi v průběhu vytváření této práce poskytoval. Dále bych ráda poděkovala paní Ing. Ireně Kubelkové za změření složení zinkových lázní spektrometrem Q4 Tasman a panu Ing. Tomáši Kramárovi, Ph.D., IWE za zhotovení metalografických výbrusů.

## **Anotace**

Jméno autora:	Lenka Koudelková
Název bakalářské práce:	Odolnost proti otěru žárově zinkovaných povlaků
Anglický název:	Abrasion resistance of hot-dip galvanization
Akademický rok:	2015/2016
Studijní program:	Teoretický základ strojínského inženýrství
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 51 Počet obrázků: 34 Počet tabulek: 4 Počet příloh: 4
Klíčová slova:	žárové zinkování, povlak, otěr, odolnost proti otěru, vliv přidaných prvků, cín
Keywords:	hot-dip galvanizing, coating, wear, abrasion resistance, the influence of added elements, tin
Abstrakt:	V teoretické části této práce je popsán proces žárového zinkování a charakteristika zinkového povlaku. Dále jsou uvedeny vlivy některých prvků v oceli nebo v zinkové lázni na vlastnosti a strukturu vytvořeného povlaku. Experimentální část hodnotí odolnost proti otěru zinkového povlaku v závislosti na množství cínu, které obsahuje zinková lázeň.
Abstract:	The theoretical part of this thesis describes process of hot-dip galvanizing and characteristics of zinc coating. There are also introduced effects of some elements in iron or in zinc bath on quality and structure of formed coating. The experimental part evaluates abrasion resistance of hot-dip galvanization depending on amount of tin contained in zinc bath.

## Obsah

1. Úvod.....	8
2. Žárové zinkování .....	9
2.1. Suchý proces .....	9
2.2. Mokrý proces .....	10
3. Předúpravy povrchu.....	12
3.1. Odmašťování.....	13
3.2. Moření.....	14
3.3. Oplach .....	15
3.4. Nanesení tavidla .....	16
4. Zinkový povlak .....	17
4.1. Diagram Fe – Zn .....	17
4.2. Slitinové fáze.....	18
4.3. Vlastnosti zinkového povlaku .....	19
5. Vliv složení oceli na zinkový povlak.....	21
5.1. Vliv křemíku (Si) .....	21
5.2. Vliv fosforu (P) .....	23
5.3. Vliv síry (S).....	24
5.4. Vliv manganu (Mn), chromu (Cr) a niklu (Ni) .....	24
5.5. Vliv hliníku (Al).....	24
6. Vliv prvků přidaných do lázně na zinkový povlak.....	25
6.1. Vliv hliníku (Al).....	25
6.2. Vliv cínu (Sn).....	25
6.3. Vliv niklu (Ni).....	26
6.4. Vliv olova (Pb).....	26
6.5. Vliv bismutu (Bi) .....	27
7. Vliv teploty lázně na zinkový povlak .....	28
7.1. Nízkoteplotní zinkování .....	28
7.2. Vysokoteplotní zinkování .....	28
8. Otěr .....	30
8.1. Abrazivní opotřebení.....	30
8.2. Adhezivní opotřebení .....	31
8.3. Erozivní opotřebení.....	31

8.4. Hodnocení odolnosti proti otěru.....	31
9. Experimentální část.....	34
9.1. Příprava vzorků .....	34
9.1.1. Předúpravy povrchu .....	35
9.1.2. Zinkování .....	35
9.2. Metalografie .....	37
9.3. Měření otěru .....	39
9.4. Vyhodnocení .....	42
10. Závěr .....	45
Seznam použité literatury a zdrojů .....	46
Seznam obrázků.....	48
Seznam tabulek .....	50
Seznam příloh .....	51



# 1. Úvod

V současné době je ocel nejpoužívanějším technickým materiálem vůbec. Svoje postavení získala díky výborným mechanickým vlastnostem, které dovolují použití v nejrůznějších oblastech. Její velkou nevýhodou je ovšem vysoká korozní rychlost, která způsobuje nižší životnost a stálost ocelových produktů. Z tohoto důvodu se ocel a ocelové konstrukce, které jsou nejčastěji vystaveny koroznímu prostředí, chrání povrchovými úpravami. Jednou z takových povrchových úprav je i žárové zinkování. Žárové zinkování nabízí dlouhodobou protikorozní ochranu oceli především díky slitinovému povlaku, který se na povrchu oceli utvoří metalurgickou reakcí železa a zinku. Oproti organickým nátěrům nevyžaduje opakované nanášení a údržbu a jeho životnost je v běžném prostředí více než 50 let. [1] Další výraznou výhodou zinkového povlaku je jeho mechanická odolnost, která se hodí především při manipulaci a přepravě výrobků. Vlastnosti zinkového povlaku lze navíc podle použití částečně ovlivňovat přidáním některých prvků do oceli nebo zinkové lázně.

Cílem této práce je zpracovat rešerši o metodice žárového zinkování a vlivech prvků v oceli nebo v zinkové lázni na strukturu a vlastnosti zinkového povlaku. Dále má také zhodnotit odolnost proti otěru zinkového povlaku v závislosti na obsahu cínu v zinkové tavenině.

## 2. Žárové zinkování

Žárové zinkování (také žárové zinkování ponorem) je jednou z technologií povrchových úprav oceli, které zvyšují její korozní odolnost. Jedná se o metodu, při které se ocelové součásti ponoří do roztaveného zinku a na jejich povrchu se vytvoří zinkový povlak. Tento povlak je tvořen slitinovými železo-zinkovými fázemi. Na povrchu dílů určených k pozinkování nesmí před ponořením do zinkové lázně zůstat žádné nečistoty ani mastnota, které by zhoršily přilnavost a vlastnosti povlaku nebo způsobily znečištění lázně. Proto je nutné, aby se povrch oceli před ponořením předupravil. Mezi předúpravy povrchu patří mechanické očištění, odmaštění, moření a oplach. Oplach je prováděn mezi každou z operací, aby se jednotlivé lázně s chemickými roztoky nezanášely a nezneškodily. Po předúpravě je také důležité povrch aktivovat tavidlem. Podle způsobu nanášení tavidla rozlišujeme suchý nebo mokrý proces kusového žárového zinkování.

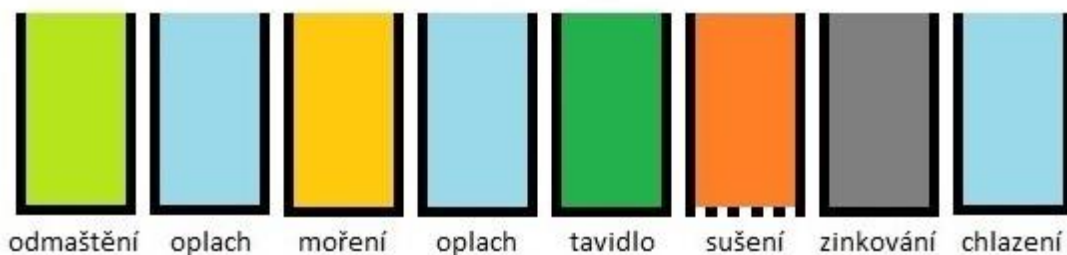
Žárové zinkování se využívá především pro nízké vstupní náklady, dlouhou životnost, rovnoměrný a kvalitní povlak i ve špatně dostupných místech a dobrou mechanickou odolnost povlaku. Za největší omezení této technologie je považován rozměr zinkovací vany, pevné zařízení v zinkovně, zinkování pouze materiálů s vyšší teplotou tavení a riziko deformace součásti vlivem tepla roztaveného zinku. [1]

Zinkový povlak ocel dlouhodobě chrání před korozí a to hned několika způsoby. První je ochrana oceli, která vyplývá z různých elektrodových potenciálů železa (Fe) a zinku (Zn). Zinek má v běžných prostředích nižší elektrodový potenciál, a proto se při vodivém spojení s železem chová jako obětovaná anoda a tím chrání ocel před oxidací. To znamená, že je ocelová součást nadále chráněna i při drobném poškození zinkového povlaku. Dalším způsobem ochrany oceli zinkovým povlakem je zabránění přístupu korozního prostředí k povrchu oceli (tzn. bariérová ochrana). Posledním způsobem je schopnost zinku pasivovat se (vytvořit na svém povrchu vrstvičku uhličitanu zinečnatého) a tím zpomalovat rychlost koroze. [2]

### 2.1. Suchý proces

Suchý proces je způsob kusového žárového zinkování, při kterém se po odmaštění, moření a oplachu ponoří součást do tavidla (vodný roztok chloridu zinečnatého a chloridu amonného) a následně se usuší. Tavidlo se musí usušit, aby při ponoření do zinkové lázně

nedošlo k rozstříku zinku. Po vysušení tavidlo na povrchu vytvoří ochrannou vrstvičku, která brání oxidaci. Pro sušení se využívá odpadní teplo z technologického ohřevu zinkové lázně. Ihned po usušení se součást ponoří do zinkové lázně, kde proběhne metalurgická reakce. Před ponořením a vynořením součásti se z hladiny roztaveného kovu odstraňují zbytky spáleného tavidla a oxidy zinku, které by se jinak mohly zachytit na povrchu součásti a zhoršovat kvalitu vytvořeného povlaku. Technologií suchého procesu je vybavena většina komerčních zinkoven, kde mají k dispozici rozměrné vany, a využívá se technologie závěsného zinkování. Linky pro žárové zinkování jsou uspořádány do jedné linie, nebo do písmene U a lázně předúprav i zinková lázeň jsou v nich seřazeny podle sledu operací v technologickém postupu (viz Obr. 1). Za zinkovou lázeň se někdy zařazuje i chladicí lázeň s vodou podle toho, jestli se zinkované zboží chladí na vzduchu nebo ve vodě. Následně zboží pokračuje ke kontrole, balení a expedici. [1; 2]



Obr. 1: Schéma sledu operací suchého procesu žárového zinkování [2]

## 2.2. Mokrý proces

Dalším způsobem kusového žárového zinkování je mokrý proces. U tohoto procesu je hladina roztaveného zinku rozdělena hradítkem na dvě části. V jedné části je na hladině vrstva tavidla, které se tak nanáší na povrch součásti těsně před vstupem do roztaveného zinku, a druhá část hladiny je volná. U mokrého procesu odpadá operace sušení, protože po odmaštění a moření se součást ihned (v mokrému stavu) ponoří přes vrstvu tavidla do zinkové lázně. Následně se protáhne do míst, kde je hladina volná, a tudíž se z lázně vynoří. Před vynořením se z volné hladiny stírají oxidy zinku a popel ze spáleného tavidla podobně jako u suchého procesu. Po vynoření se součást ochladí na vzduchu nebo ve vodní lázni a pokračuje ke kontrole a expedici. Schéma sledu operací mokrého procesu žárového zinkování ukazuje Obr. 2. [1; 2]



Obr. 2: Schéma sledu operací mokrého procesu žárového zinkování [2]

Metoda mokrého procesu má poměrně nízkou produktivitu, protože se s výrobky manipuluje převážně ručně. Z důvodu snazší mechanizace výrobního procesu je tedy běžnější suchý proces. Mokvý proces je ale nepostradatelný pro některé složité výrobky, které by v jiných zařízeních nebylo možné pozinkovat. Při suchém i mokrém procesu se dosahuje stejné kvality zinkového povlaku. Porovnání suchého a mokrého procesu zinkování je v Tab. 1. [1; 2]

Tab. 1: Porovnání kusově nanášených žárově zinkovaných povlaků [2]

Způsob nanesení	Charakteristika	Použití
suchý proces	omezená manipulace při nanášení povlaku, vysoká produktivita	součásti, které je možné jednotlivě zavěsit
mokrý proces	dobrá manipulace při nanášení povlaku, omezená hmotnost	složité tvary vyžadující ruční manipulaci

### 3. Předúpravy povrchu

Nečistoty, mastnota a nedostatečná jakost povrchu oceli snižují kvalitu a životnost povrchových úprav. Předúpravy povrchu zajišťují přípravu požadované mikrostruktury a kvality povrchu a poskytují požadovanou čistotu povrchu. Proto jsou předúpravy povrchu nezbytnou součástí technologického postupu. Předúpravy povrchu se dělí do dvou skupin, na mechanické úpravy povrchu a chemické úpravy povrchu. [3]

#### *Mechanická předúprava*

Mechanická úprava výrobků určených k pozinkování se využívá, když je povrch oceli znečištěn barvou, nebo struskou po svařování. Tyto nečistoty je nutné z povrchu odstranit, a to tryskáním nebo broušením. U odlitků se musí otryskáním z povrchu odstranit zbytky formovacího písku, který není možné odstranit chemickou úpravou. [1]

#### *Chemická předúprava*

Chemické úpravy povrchu ovlivňují přilnavost, dokonalost, ochrannou schopnost a trvanlivost povrchových vrstev [3]. Pro úspěšný vznik zinkového povlaku na povrchu oceli je důležité, aby byl povrch výrobku určeného k pozinkování dokonale kovově čistý a aktivovaný. Mezi chemické předúpravy patří odmašťování, moření a v případě suchého procesu také nanášení tavidla a sušení (viz Obr. 3). Mezi jednotlivé operace se zařazuje technologický oplach, aby nedošlo ke znehodnocení lázní s chemikáliemi. Chemická předúprava je prováděna v uzavřených odvětrávaných pracovištích, aby se zajistilo, že zplodiny vznikající z reakcí při moření nebudou mít negativní dopad na životní prostředí a zdraví pracovníků zinkovny. [2]



Obr. 3: Schéma sledu operací chemické předúpravy před žárovým zinkováním [2]

### 3.1. Odmašťování

Účelem odmašťování je uvolnit nečistoty z povrchu, převést je do roztoku a zabránit jejich opětovnému vyloučení na povrch oceli. Při odmašťování se ocelový povrch zbavuje nečistot jako je mastnota, prach, kovové třísky atd.

Při žárovém zinkování by mastnota na oceli způsobila špatné smáčení povrchu v zinkové lázni, a tím vznik nepokovených míst. Nejčastěji je odstraňována dvěma způsoby alkalickým nebo kyselým odmašťováním. V současné době se také využívají lázně s tenzidy a bakteriemi, které jsou z hlediska ekologie příznivější. [1; 2]

#### *Alkalické odmašťování*

Alkalické odmašťování je nejrozšířenější způsob čištění kovového povrchu [4]. Provádí se ponořením výrobku do vodného roztoku alkalického odmašťovacího přípravku s přídavkem tenzidů. Alkalické přípravky jsou složeny hlavně z hydroxidu sodného (NaOH) a fosforečnanu draselného ( $K_3PO_4$ ). Účinnost alkalického odmašťovacího přípravku se hodnotí především z hlediska emulgace a dispergace nečistot. Pro dostatečnou účinnost odmašťování musí být alkalická lázeň ohřátá nad  $50^\circ C$ , což zvyšuje náklady na výrobu. Při odmašťování postupně narůstá množství emulgovaného tuku v lázni, až se lázeň nasytí a přestane účinkovat. Takovou lázeň nelze dále používat a je nutné jí nahradit novým roztokem. [2; 4]

#### *Kyselé odmašťování*

Při kyselém odmašťování se využívá kyselá lázeň s přídavkem tenzidů. Účinnou látkou bývá směs kyseliny fosforečné s kyselinou sírovou, chlorovodíkovou nebo dusičnou. Kyselé odmašťování má několik předností:

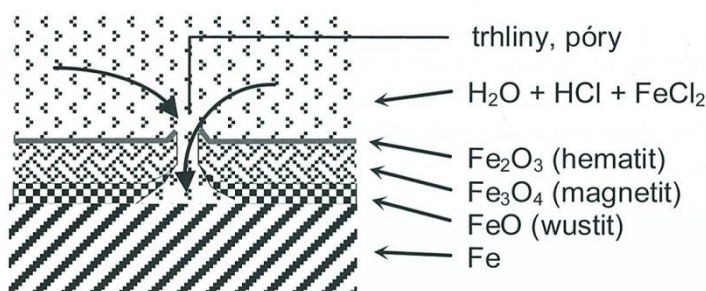
- částečné moření výrobku už při odmašťování,
- odmaštění výrobku při teplotě okolí,
- vysrážení tuků v podobě sedimentu, který klesá na dno nádrže, odkud může být snadno odčerpán a lázeň doplněna o množství účinných látek, které s tuky reagovaly.

Nevýhodou kyselého odmašťování je nižší účinnost. [2]

### 3.2. Moření

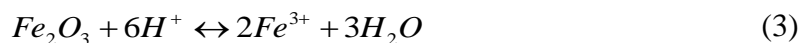
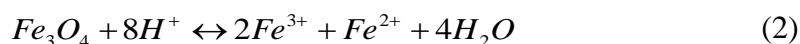
Moření je předúprava povrchu, při které jsou z povrchu oceli odstraňovány okuje a nežádoucí oxidy, aby bylo dosaženo kovově čistého povrchu. Pro moření se využívají anorganické kyseliny, ve kterých se oxidy rozpouští. Moření je časově náročné, a proto bývají zinkovny vybaveny větším množstvím van pro moření (viz Obr. 3).

V zinkovnách se pro moření nejčastěji využívá 14% roztok kyseliny chlorovodíkové (HCl), do kterého se přidá chlorid železnatý. Chlorid železnatý zvyšuje účinnost lázně a lépe tak rozpouští okuje. Při moření se uvolňuje do lázně železo a HCl se při reakcích s oxidy spotřebovává. To ovlivňuje rychlost moření, a proto se musí poměr obou složek kontrolovat a případně upravit. Princip moření a složení oxidů v okujích znázorňuje Obr. 4. [2]



Obr. 4: Princip moření a složení oxidů v okujích [2]

Vrstvička okují na povrchu oceli je tvořena různými oxidy železa, jejichž poměr je dán podmínkami, při kterých se okuje vytvořily. V této vrstvě je přítomný wüstit (FeO), magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) a hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Zmíněné oxidy mají v kyselině chlorovodíkové odlišnou rozpustnost. Nejsnáze se rozpouští wüstit a nejobtížněji hematit. Proto je výhodné, aby bylo ve vrstvě okují wüstitu, který je nejbliž čistému kovu, co největší množství. Rychlost moření je tedy závislá na složení oxidů ve vrstvě okují. Kyselina chlorovodíková ve vodě disocijuje na ionty H<sup>+</sup> a Cl<sup>-</sup> a reakce s oxidy probíhají podle rovnic:



Ionty  $Fe^{3+}$  se mohou dále redukovat na  $Fe^{2+}$  které spolu s  $Cl^-$  tvoří chlorid železnatý.



Problémem při moření je rozpouštění čistého železa, při kterém dochází k úbytku materiálu a vzniku vodíku, který difunduje do kovu a způsobuje vodíkové křehnutí.



Z tohoto důvodu se do lázně přidávají inhibitory, které rozpouštění železa omezují.

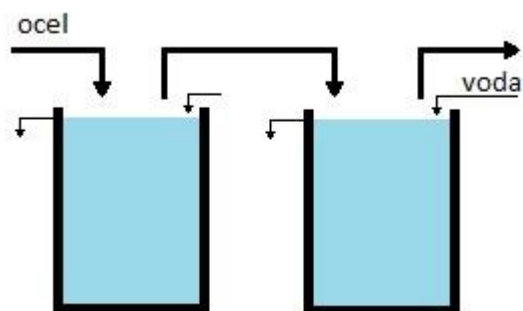
Dobu moření lze zkrátit vhodnou koncentrací kyseliny a  $Fe^{2+}$  iontů nebo zvýšením teploty mořicí lázně. Při zvyšování teploty lázně dochází ke zvýšení nákladů na výrobu a k většímu odpařování chlorovodíku z lázně. Proto se musí dbát na dostatečné odsávání plynů nad lázní a zachycení škodlivin do absorbérů. [4]

### 3.3. Oplach

Oplach je důležitou součástí technologického postupu, která se musí provést mezi každou operací. Při odmašťování nebo moření ulpí na povrchu výrobku vždy určité množství lázně, které by se bez oplachu přenášelo do dalších lázní předúprav. Tím by se lázně znehodnocovaly. Například při odmašťování se používají alkalické roztoky, které by při přenesení do kyselé mořicí lázně neutralizovaly kyselinu a snižovaly tak účinnost moření. To souvisí i se zvýšením nákladů na výrobu, protože by se mořicí lázně musela častěji upravovat.

Oplach se provádí (po odkapání technologické lázně) ponořením výrobku do vody. Po moření se využívá dokonce vícestupňový oplach, aby bylo zajištěno kvalitní očištění. Z vody prvního oplachu se tak stane slabý roztok kyseliny, kterým se doplňuje odpařená mořicí lázeň. Lázeň prvního oplachu se potom doplní lázní z druhého oplachu a ta se doplní vodou. Tím se zajistí, že zinkovna neprodukuje odpadní vody, které by se musely ekologicky likvidovat. Schéma tohoto postupu je na Obr. 5. [2; 4]





Obr. 5: Schéma dvoustupňového oplachu [4]

### 3.4. Nanesení tavidla

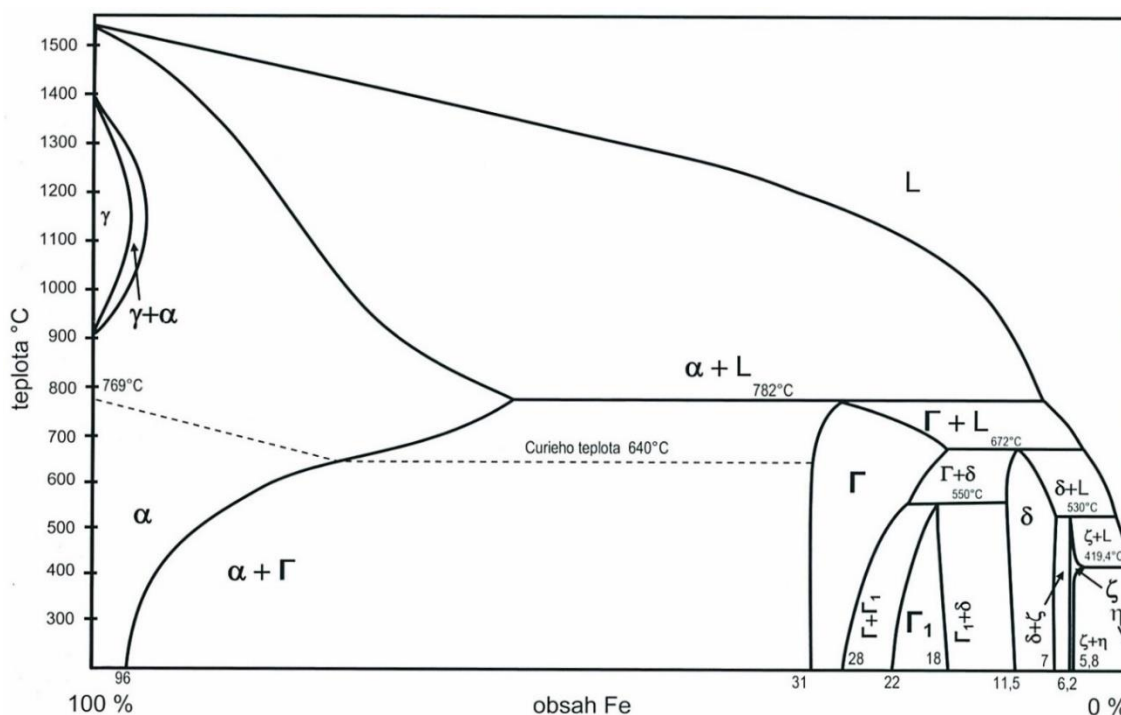
Mezi předúpravou povrchu lze při suchém procesu žárového zinkování zařadit i nanesení tavidla a následné sušení. Tavidlo chrání povrch výrobku před oxidací, aktivuje ho a pomáhá při vzniku slitinové vrstvy.

Tavidlem je vodný roztok chloridu zinečnatého ( $\text{ZnCl}_2$ ) a chloridu amonného ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) v poměru 3:2, který se odpadním teplem ze zinkové lázně udržuje na teplotě do  $50^\circ\text{C}$ . Chlorid zinečnatý při ponoření do zinkové lázně snižuje povrchové napětí zinku, aktivuje povrch a iniciuje metalurgickou reakci. Chlorid amonný se rozkládá na čpavek a chlorovodík, který na hladině roztaveného kovu rozpouští oxidy zinku a hliníku. [2]

## 4. Zinkový povlak

Zinkový povlak se na povrchu ocelové součásti utváří při ponoření do lázně s roztaveným zinkem. Ta se při kusovém zinkování závěsovým způsobem ohřívá na teplotu 450°C až 460°C a při zinkování s odstředěním na teplotu 540°C až 560°C [1]. Při ponoření do lázně proběhne mezi zinkem a ocelovým výrobkem metalurgická reakce, při které se na povrchu oceli vytvoří slitinový železo-zinkový povlak. Výrobek se musí do lázně ponořit pod určitým úhlem, aby mohl roztavený zinek stékat a nedocházelo ke zvýšení tloušťky zinkového povlaku na některé z ploch. Dále se musí dbát na vhodnou konstrukci dílů určených k pozinkování. Ty se musí konstruovat s ohledem na snadné uchycení, ale i na vhodné umístění a velikost drenážních otvorů tak, aby ve výrobku nezůstávaly kapaliny z předúprav povrchu nebo roztavený zinek. Průběh metalurgické reakce mezi zinkem a železem a výsledná kvalita zinkového povlaku jsou ovlivňovány spoustou faktorů. Těmi je například složení oceli, teplota lázně, složení lázně atd.

### 4.1. Diagram Fe – Zn



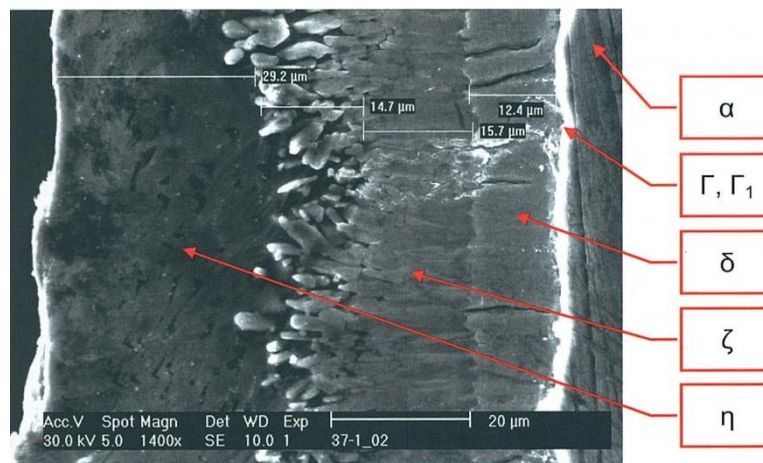
Obr. 6: Rovnovážná soustava železo – zinek [5]

Z Obr. 6 je zřejmé, že ke vzniku slitinového povlaku dochází vzájemnou difuzí železa a zinku a složitými fázovými přeměnami, protože teplota kusového zinkování (450°C) je mezi teplotou tavení zinku (419,4°C) a teplotou tavení železa (1538°C).

Pro soustavu železo – zinek je charakteristická odlišná rozpustnost obou složek. Substituční primární roztok  $\alpha$ , který se skládá z feritu a zinku, může obsahovat až 41% zinku. Naproti tomu tuhý zinek může obsahovat pouze 0,03% železa. Diagram Fe – Zn obsahuje tři peritektické přeměny a jednu peritektoidní, při kterých vznikají slitinové fáze  $\Gamma$ ,  $\Gamma_1$ ,  $\delta$  a  $\zeta$  (Obr. 6). [5]

## 4.2. Slitinové fáze

Na povrchu oceli se při ponoření do roztaveného zinku vytvoří především dvě slitinové fáze. Blíže k oceli fáze  $\delta$  a nad ní fáze  $\zeta$ . Při setrvání v zinkové lázni se tyto fáze přeměňují do konečné struktury a tloušťky. Fáze obsahující různý poměr železa a zinku dohromady tvoří slitinový povlak (viz Obr. 7). Obsah železa ve slitinovém povlaku se směrem od oceli snižuje až k povrchu, kde po vytažení ze zinkové lázně ztuhne vrstvička čistého zinku (fáze  $\eta$ ). [1; 5]



Obr. 7: Struktura zinkového povlaku na oceli [2]

Při teplotě zinkování se zvyšuje rozpustnost zinku ve feritu a tím vzniká v povrchové vrstvě oceli nasycený tuhý roztok zinku v železe  $\alpha$ . Přímou syntézou v důsledku difuze železa a zinku potom vznikají fáze  $\Gamma$  a  $\Gamma_1$ . Tyto fáze mohou rovněž vznikat segregací z okolních fází při pomalém ochlazování a vzájemně se liší pouze velikostí mřížkové konstanty. Při kusovém zinkování bývá jejich přítomnost téměř nezatelná a dá se prokázat pouze přesnými analytickými postupy. [5]

Pro fázi  $\delta$  jsou charakteristické šesterečné krystaly, které k sobě těsně přiléhají a tvoří velmi konzistentní vrstvu. Fáze  $\delta$  je také ze slitinových fází nejtvrďší (viz Obr. 8). Díky tomu se vyznačuje kvalitními mechanickými vlastnostmi. [5]

Slitinová fáze  $\zeta$  se vyznačuje jednodílnou krystalovou strukturou a vysokou homogenitou při pokojové teplotě. Obsah železa ve fázi  $\zeta$  je velmi stálý od 5,8% do 6,2%. [5] Přehled jednotlivých slitinových fází je uveden v Tab. 2.

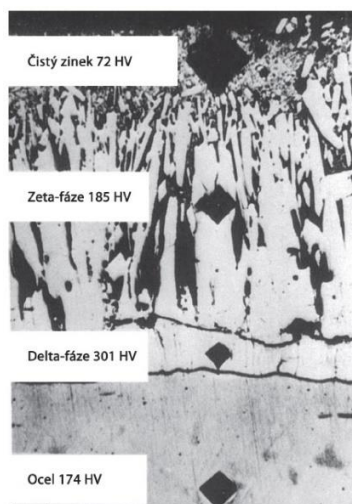
Tab. 2: Přehled železo-zinkových slitinových fází [5]

Fáze	$\alpha$	$\Gamma$	$\Gamma_1$	$\delta$	$\zeta$	$\eta$
Složení	Fe	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	$\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$	$\text{FeZn}_{10}$	$\text{FeZn}_{13}$	Zn
% Fe	59 ÷ 100	19 ÷ 31	18 ÷ 22	7 ÷ 11	5,8 ÷ 6,2	–
Krystal. struktura	kubická (prostorově středěná)	kubická (prostorově středěná)	kubická (prostorově středěná)	hexagonální (kolumnární)	jednodílná	hexagonální (nejtěsnější uspořádání)
Mechanické vlastnosti	feritická ocel	silně adhezivní	silně adhezivní	konzistentní	tvrdá křehká	houževnatá

### 4.3. Vlastnosti zinkového povlaku

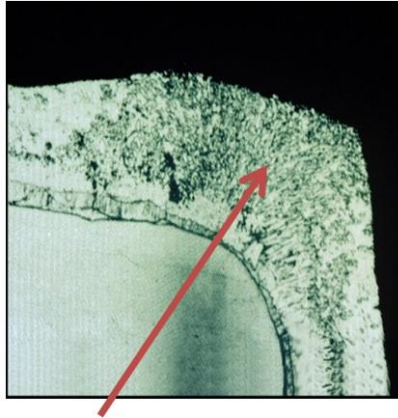
Mechanické vlastnosti určité vrstvy povlaku jsou charakterizovány její tvrdostí (mikrotvrdostí). V souvislosti s opotřebením má hodnota tvrdosti povrchu podstatný význam, přestože vztah mezi tvrdostí a opotřebením není všeobecně platný. Tvrdost lze použít jako pomocné měřítko pro hodnocení odolnosti proti opotřebení (otěru). [6]

I přes to, že se zinek řadí mezi měkké kovy, má větší tvrdost než většina organických nátěrů. Naproti tomu slitinové fáze Fe-Zn vznikající při žárovém zinkování ponorem jsou velice tvrdé (tvrdší než klasická konstrukční ocel viz Obr. 8). Fe-Zn fáze proto snášejí otěr mnohem lépe než čistý zinek. Zjistilo se, že odolnost proti otěru slitinové vrstvy je čtyři- až pětkrát vyšší než odolnost čistého zinku. Z tohoto důvodu se žárové zinkování využívá na výrobky, jejichž povrch bude vystaven otěru. [1; 7]



Obr. 8: Tvrdost některých slitinových fází měřena mikrotvrdoměrem [1]

Zinkový povlak má také schopnost vytvářet na hranách výrobku tlustší, nebo alespoň stejně tlusté vrstvy slitinového povlaku jako na přilehlém povrchu (viz Obr. 9). Tím je oproti klasickým nátěrům odolnější proti otěru a využívá se pro ochranu hran. Tato schopnost je dána především tím, že při ponoření do zinkové lázně narůstá vrstva povlaku na všech místech kolmo k povrchu. [7]



*Obr. 9: Zvýšená tloušťka povlaku na hraně součásti [7]*

## 5. Vliv složení oceli na zinkový povlak

Chemické složení oceli má výrazný vliv na průběh metalurgické reakce mezi železem a zinkem. Při různém složení oceli se slitinový povlak vytváří odlišnou rychlostí, v různých tloušťkách a složení intermetalických fází, což ovlivňuje tvrdost povlaku a jeho otěruvzdornost. Kromě legujících prvků se v oceli vyskytují prvky, které se do ní dostaly při výrobě (např. jako dezoxidační činidlo).

### 5.1. Vliv křemíku (Si)

Křemík se do oceli dostává při výrobě uklidněné oceli jako dezoxidační činidlo. Ze všech prvků v oceli má na tvorbu zinkového povlaku největší vliv. Jednotlivé Fe-Zn fáze vznikají v různých tloušťkách, a tak přítomnost křemíku ovlivňuje i výsledné mechanické vlastnosti povlaku. Podle množství křemíku lze oceli rozdělit do několika skupin:

- oceli s nízkým obsahem křemíku: do 0,04 % Si,
- oceli s obsahem křemíku v Sandelinově oblasti: od 0,04 % Si do 0,14 % Si,
- oceli s obsahem křemíku v Sebistyho oblasti: od 0,14 % Si do 0,25 % Si,
- oceli s vysokým obsahem křemíku: nad 0,25 % Si.

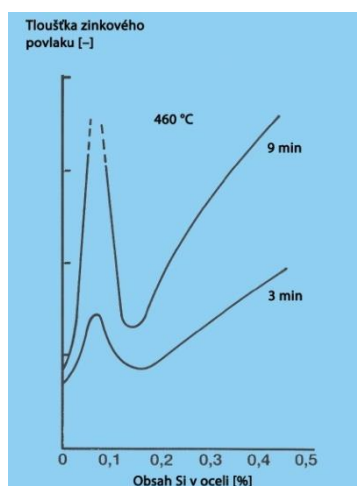
#### *Oceli s nízkým obsahem křemíku*

Obsah křemíku v těchto ocelích je velmi nízký (do 0,04 % Si), a proto se dají považovat za oceli neuklidněné křemíkem. Pro žárové zinkování jsou velice vhodné díky fázím, které se na povrchu po ponoření vytvoří (viz Obr. 11 a). Důležitý je výrazný podíl vrstvy fáze  $\delta$ , která má hexagonální těsně uspořádanou strukturu. Utváří se ihned po ponoření a brání dalšímu přístupu zinku k oceli. Další reakce a vznik slitinových fází probíhá omezeně pomocí difuze. Tím se snižuje rychlost reakce a výsledná tloušťka vrstvy. Ani při delším setrvání v lázni se tloušťka vrstvy nezvětšuje a zinkový povlak zůstává relativně tenký. Zinkový povlak se skládá z fáze  $\delta$ ,  $\zeta$  a povrch překrývá vrstvička čistého zinku (fáze  $\eta$ ). Takto vyloučený povlak má dobré mechanické vlastnosti a díky výraznému podílu tvrdé  $\delta$  fáze také odolnost proti otěru. [1; 2]

#### *Oceli s obsahem křemíku v Sandelinově oblasti*

Oceli s obsahem křemíku od 0,04 % do 0,14 % se někdy také nazývají Sandelinovské podle Roberta W. Sandelina, který se zabýval tloušťkou naneseného povlaku v závislosti na obsahu křemíku. Při tomto obsahu křemíku je zinkový povlak

složen převážně z fáze  $\zeta$ , která je v podobě jemných krystalů rozptýlena v čistém zinku. Tím vzniká kašovitá struktura povlaku (viz Obr. 11 b), která pro difuzi železa a zinku nepředstavuje žádnou zábranu, a proto probíhá růst vrstvy velmi rychle a dosahuje velkých tloušťek. Z Obr. 10 je zřejmé, že v blízkosti této oblasti dochází při nepatrné změně obsahu Si k rychlému nárůstu tloušťky povlaku. Tyto oceli lze žárově pozinkovat pouze při speciální úpravě zinkovací lázně. [1; 2]



Obr. 10: Závislost tloušťky zinkového povlaku na obsahu Si v oceli při různých dobách zinkování [1]

Tloušťka povlaku má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti povlaku. Čím je povlak tlustší, tím více je náchylný k poškození při hrubém mechanickém namáhání. Nejčastěji pak může nastat prasknutí povlaku uvnitř metalurgických fází [8]. Zrna fáze  $\zeta$  rozptýlená v čistém zinku navíc nemají tak vysokou tvrdost a těsnou strukturu jako fáze  $\delta$ , a proto je otěruvzdornost těchto ocelí horší.

#### *Oceli s obsahem křemíku v Sebistyho oblasti*

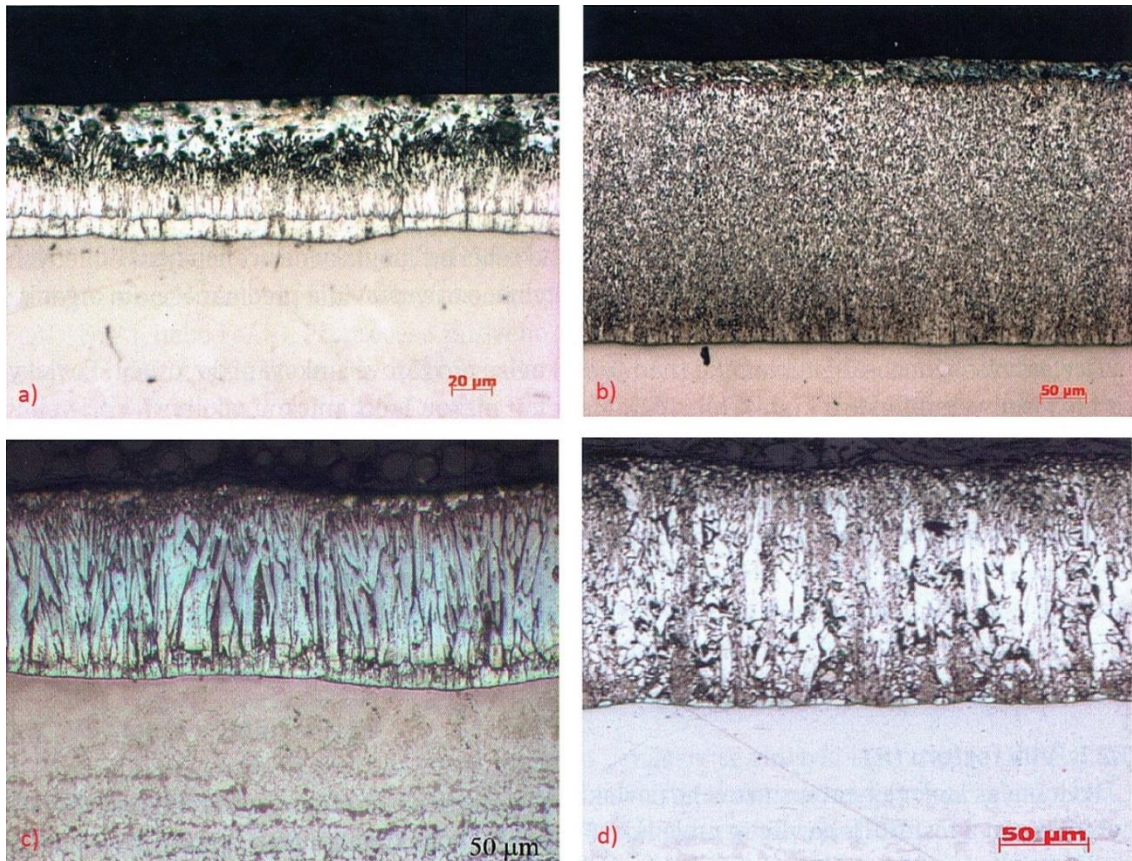
V oblasti od 0,14 % Si do 0,25 % Si se růst tloušťky povlaku na povrchu oceli opět zpomaluje. Tloušťka povlaku u těchto ocelí je sice vyšší než u ocelí neuklidněných, ale i tak dosahují dobré mechanické odolnosti a jsou vhodné pro pozinkování. Povlak je při tomto složení oceli po pozinkování složen převážně z dlouhých sloupcových krystalů  $\zeta$  fáze (viz Obr. 11 c). Fáze  $\delta$  je přítomna pouze v tenké vrstvě. [1; 2]

#### *Oceli s vysokým obsahem křemíku*

Oceli s obsahem křemíku vyšším než 0,25 % Si se pro žárově zinkování nehodí. S dobou ponoru se relativně rychle zvyšuje tloušťka zinkového povlaku. Na povrchu oceli



se tak utváří tlustý a křehký povlak. Tento povlak se skládá hlavně z nepravidelně uspořádaných jednoklonných krystalů fáze  $\zeta$  a většinou ani neobsahuje povrchovou vrstvičku zinku (viz Obr. 11 d). Povlaky vytvořené na těchto ocelích mají špatnou odolnost proti opotřebení a snadno delaminují. [1; 2]



Obr. 11: Struktura povlaku v daných oblastech: a) ocel s 0,003 % Si, b) ocel s 0,08 % Si, c) ocel s 0,21 % Si, d) ocel s 0,38 % Si [2]

## 5.2. Vliv fosforu (P)

Fosfor (P) ovlivňuje reakci se zinkem podobným způsobem jako křemík. Jeho vliv se projevuje nejvíce u ocelí s nízkým obsahem křemíku, kde může přítomnost P způsobit, že se povlak tvoří stejně jako v Sandelinově oblasti. Při obsahu fosforu nad 0,035 % se zvyšuje reaktivita oceli a tloušťka slitinového povlaku. Pro to, aby se neprojevil Sandelinův efekt, je nutné dodržovat, aby koncentrace obou prvků splňovala rovnici:

$$\text{Si} + 2,5 \text{ P} \leq 0,09 \quad (6)$$

Slitinový povlak na oceli s vyšším obsahem fosforu se projevuje velkou tloušťkou povlaku, převládající fází  $\zeta$  a špatnou přilnavostí. [2; 9] Tento slitinový povlak nemá vysokou tvrdost ani přilnavost, a tudíž špatně odolává mechanickému namáhání.



### 5.3. Vliv síry (S)

V běžných ocelích je obsah síry tak nízký, že lze jeho vliv na metalurgickou reakci železa se zinkem zanedbat. Při větším obsahu síry (nad 0,18 %) se u některých automatových ocelí výrazně zvyšuje reakční rychlost. Reakce železa se zinkem je tak rychlá, že dochází až k rozpadu oceli. Oceli s vysokým obsahem síry se tedy pro žárové zinkování nehodí. [9]

### 5.4. Vliv manganu (Mn), chromu (Cr) a niklu (Ni)

Tyto prvky při žárovém zinkování zvyšují reakční rychlost podobně jako síra. V ocelích se ovšem běžně vyskytují v tak nízkých koncentracích, že zvýšení rychlosti není podstatné. [1]

Kromě toho mangan v koncentraci vyšší než 1,25 % podporuje těsnější uspořádání jednodílných krystalů fáze  $\zeta$ . Tím se u ocelí uklidněných křemíkem vytváří povlaky s lepší konzistencí slitinové vrstvy a příznivějšími mechanickými vlastnostmi [2]. To souvisí i s odolností proti otěru, která je u takových ocelí lepší.

### 5.5. Vliv hliníku (Al)

Hliník je vedle křemíku dalším prvkem, který se při výrobě uklidněné oceli používá jako dezoxidační činidlo. Hliník se v oceli vyskytuje v podobě železo-hliníkových slitin, které vznikly při výrobě. Fe-Al slitiny jsou v oceli rozptýlené nerovnoměrně a jejich přítomnost v povrchové vrstvě brání difuzi železa k roztavenému zinku. V takových místech může železo se zinkem reagovat jen omezeně a nepravidelné rozložení Fe-Al slitin může způsobit nerovnoměrnost slitinového železo-zinkového povlaku. [2]

Struktura železo-zinkového povlaku je stejná jako u ocelí neuklidněných. Krystaly slitinových fází se vytváří těsně na sobě, omezují difuzi železa a zpomalují rychlost růstu vrstvy. [1]

Z toho vyplývá, že slitinový povlak zůstane relativně tenký a díky fázi  $\delta$ , která se zde stejně jako u neuklidněných ocelí vyskytuje v poměrně výrazném zastoupení, i tvrdý. Tyto vlastnosti jsou z pohledu odolnosti proti otěru výhodné, ale nerovnoměrnost slitinové vrstvy může způsobit, že vlastnosti povlaku nebudou ve všech místech stejné.

## 6. Vliv prvků přidaných do lázně na zinkový povlak

Zinková tavenina ve skutečnosti není složená pouze ze zinku, ale leguje se dalšími prvky. Příměsi, jako je hliník, cín, nikl, olovo aj., se do lázně přidávají pro ovlivnění vzhledu, kvality, vlastností povlaku nebo průběhu reakce. Také umožňují snížit teplotu zinkování o 5–10°C. Podle ČSN EN ISO 1461 nesmí obsah příměsí v zinkové lázni kromě železa a cínu převýšit 1,5 hm. %.

### 6.1. Vliv hliníku (Al)

Hliník se do zinkové taveniny přidává běžně v koncentracích od  $10^{-3}$  hm. % jako ochrana před rychlou oxidací vzduchem. Hliník na povrchu zinkové lázně tvoří tenkou vrstvičku oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ), a zabraňuje oxidaci roztaveného kovu. Při ponoření oceli do zinkové lázně s přidavkem Al dochází přednostně k reakci železa s volným hliníkem a vzniká železo-hliníková fáze. Fe-Al fáze vytvoří tenkou vrstvu, která brání další difuzi železa k zinkové tavenině. To může být výhodné pro ocele s vysokým obsahem křemíku, kde se částečně zmírní nárůst povlaku. Hliník v tavenině zlepšuje lesk povlaku a odolnost na ohyb. [10; 11]

Při obsahu hliníku vyšším než 0,03 hm. % se zvyšuje riziko vytvoření nepozinkovaných míst (tzv. černých skvrn), které vznikají ze dvou důvodů. Jedním je zvýšení povrchového napětí taveniny a druhým větší vrstva oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) na povrchu taveniny, kterou tavidlo při ponořování ocelové součásti nedovede rozpustit. [2; 10; 11]

U povlaků, které vznikly v lázních s vyšším obsahem hliníku (5 hm. %), bylo zjištěno výrazné zlepšení korozní odolnosti. Tyto povlaky se nanášejí za speciálních podmínek. Ve srovnání s klasickými zároveň zinkovanými povlaky odolávají lépe prostředí se solnou mlhou i vlhkému prostředí s obsahem  $SO_2$ . [12]

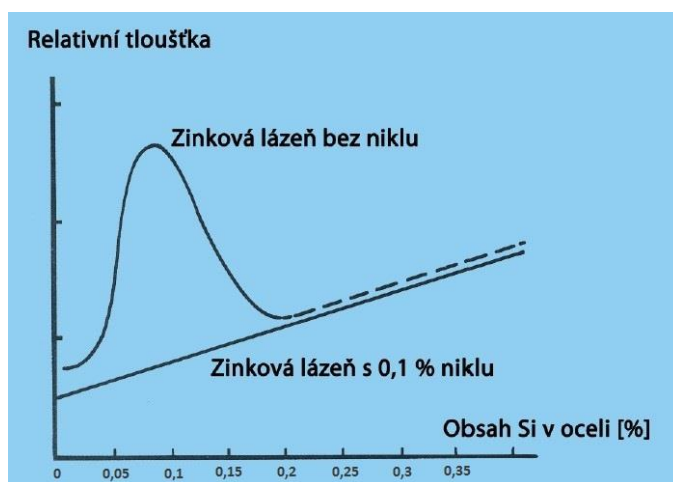
### 6.2. Vliv cínu (Sn)

Cín se přidává do lázně za účelem snížení tloušťky povlaku na ocelích s obsahem křemíku od 0,2 %. Naopak u ocelí neuklidněných křemíkem s nízkým obsahem uhlíku se přidavek cínu v tavenině projevuje zvýšením tloušťky povlaku. Cín také zvyšuje lesk a podporuje tvorbu zinkového květu (kresba na povrchu povlaku, která je způsobena různě orientovanými krystaly zinku, které tak tvoří geometrické obrazce). Kromě toho

zinek ovlivňuje i vlastnosti taveniny, která se stává tekutější. Cín se do zinkové lázně přidává obvykle v koncentracích do 0,2 % hm., protože vyšší koncentrace zvyšují riziko LMAC (Liquid Metal Assisted Cracking – praskání za asistence tekutého kovu). [10; 11]

### 6.3. Vliv niklu (Ni)

Tavenina obsahuje nikl obvykle v koncentracích 0,045 až 0,055 hm. %. Nikl má významný vliv hlavně na zinkování ocelí ukliďných křemíkem v Sandelinově oblasti (viz Obr. 12). U nich způsobuje snížení tloušťky povlaku a zvýšení jeho lesku. U ocelí s obsahem křemíku nad 0,22 % už nikl na reaktivitu nemá vliv. [1; 11]



Obr. 12: Vliv niklu na tloušťku povlaku v Sandelinově oblasti [1]

Komerčně se slitina s 0,05 až 0,06 hm. % niklu jmenuje Technigalva. Další slitinou s niklem je například Galveco, které kromě niklu obsahuje i cín a bismut a snižuje reaktivitu ukliďných ocelí až do 0,4 hm. % Si. [8]

Nejvýraznější zlepšení mechanických vlastností přidavkem niklu do lázně se získává u ocelí v Sandelinově oblasti, kde se místo kašovitě struktury vyloučí povlak s těsně uspořádanou strukturou a poměrně vysokým podílem fáze  $\delta$ . Slitinový povlak se vyznačuje konzistentní strukturou, přiměřenou tloušťkou a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi [2]. Tyto faktory ovlivňují ořezuvzdornost, která je tedy u těchto povlaků lepší.

### 6.4. Vliv olova (Pb)

Olovo se běžně vyskytuje v zinkové tavenině v koncentracích 0,5 až 1,2 %. Až o třetinu snižuje povrchové napětí lázně a zlepšuje stékání zinkové taveniny. Navíc chrání dno zinkovací vany před nárůstem tvrdého zinku a usnadňuje jeho odstraňování.

V zinkovém povlaku není olovo rozloženo pravidelně. Ve slitinových železo-zinkových fázích není olovo rozpustné, a tak se vylučuje ve formě malých kapiček po hranicích zrn. Přítomnost olova může u následných povlaků snížit přilnavost. Mezi další vlastnosti, které přidavek olova způsobuje, patří zmenšení drsnosti žárově zinkovaných povlaků a zlepšení odolnosti proti nárazu resp. tvárnost zinkového povlaku. Olovo má také vliv na tvorbu zinkového květu. Za největší nevýhody se považuje zvýšené riziko LMAC praskání a hlavně toxicita olova. Vzhledem k tomu se jeho obsah v tavenině snižuje a nahrazuje se jinými prvky s podobnými účinky na povrchové napětí lázně. [13]

### **6.5. Vliv bismutu (Bi)**

Bismut se do zinkové lázně přidává obvykle v koncentraci 0,1 hm. %. Díky snížení povrchového napětí se bismut používá jako náhrada toxického olova. Tento efekt ale u taveniny s bismutem v koncentraci 0,1 hm. % není tak výrazný jako u taveniny s 1 hm. % olova. Bismut podporuje tvorbu zinkového květu. [10; 11]

## 7. Vliv teploty lázně na zinkový povlak

Teplota zinkové taveniny má výrazný vliv na reakci mezi železem a zinkem, strukturu povlaku a jeho tloušťku. Všechny tyto faktory ovlivňují mechanické vlastnosti vzniklého povlaku a jeho ořezuvzdornost. Žárové zinkování se tak podle různých teplot lázně dělí na nízkoteplotní (~450°C) a vysokoteplotní (~550°C).

Mezi nízkoteplotním a vysokoteplotním zinkováním je oblast teplot od 480°C do 530°C, ve které není vhodné žárové zinkování provádět. V této oblasti dochází k výraznému rozpouštění železa v zinkové lázni. Výrobek mění svoje geometrické rozměry a zinková lázeň se znehodnocuje. [2]

### 7.1. Nízkoteplotní zinkování

Nízkoteplotní zinkování se využívá pro kusové zinkování výrobků a probíhá při teplotě 450°C. Při této teplotě se jednotlivé slitinové vrstvy v povlaku tvoří na základě difuzních pochodů. Povlak, který při nízkoteplotním zinkování vnika, běžně obsahuje všechny železo-zinkové slitinové fáze ( $\alpha$ ,  $\Gamma$ ,  $\Gamma_1$ ,  $\delta$ ,  $\zeta$ ,  $\eta$ ). Tyto fáze se objevují v různých poměrech podle dalších faktorů, které mají vliv na metalurgickou reakci. Největší rozdíly jsou ve struktuře povlaků u ocelí neuklidněných a uklidněných křemíkem, které byly popsány výše. Zinkové povlaky mívají dobrou odolnost proti mechanickému opotřebení. Jejich tloušťka je závislá na době ponoru a tloušťce stěny výrobku. Obvykle platí, že čím je substrát tlustší, tím tlustší je i výsledný povlak. Tlustý povlak je z hlediska ořezu a mechanické odolnosti nevýhodný. [2]

### 7.2. Vysokoteplotní zinkování

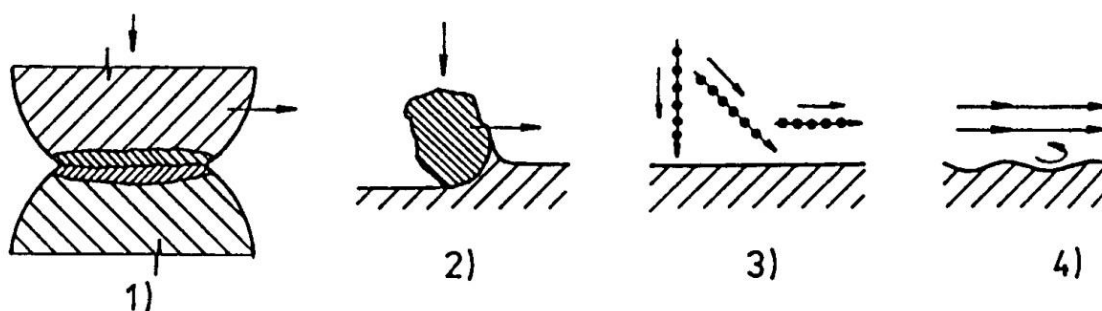
Vysokoteplotní zinkování probíhá při teplotách nad 530°C (zpravidla při 550°C). Většinou bývá spojeno s odstředěním, při kterém se z výrobku odstraní přebytečný zinek a následně se výrobek rychle ochladí ve vodě. Z fázového diagramu je zřejmé, že se teplota 550°C nachází nad teplotou stability fáze  $\zeta$ , a proto při této teplotě fáze  $\zeta$  nemůže vzniknout. Při vyšší teplotě zinkování dochází k vyššímu rozpouštění železa, které společně se zinkem tvoří fázi  $\delta$ . Po pokovení v roztaveném zinku se výrobky musí rychle ochladit, aby z fáze  $\delta$  nevznikly nežádoucí krystaly fáze  $\zeta$ . Ostatní železo-zinkové fáze se tvoří jen omezeně a to z důvodu krátké doby ponoru zinkovaného výrobku a rychlého ochlazení, při kterém fáze  $\Gamma$  a fáze  $\Gamma_1$  nestačí z fáze  $\delta$  segregovat. Tvrdá fáze  $\delta$  má ve slitinovém povlaku naneseným tímto způsobem největší zastoupení. Blízko substrátu

tvoří krystaly fáze  $\delta$  konzistentní vrstvu a směrem k povrchu povlaku jsou prostoupeny čistým zinkem. [2]

Slitinový povlak, který vzniká při vysokoteplotním zinkování, se vyznačuje poměrně malou tloušťkou a (díky výraznému zastoupení fáze  $\delta$ ) také dobrou mechanickou odolností. Vysokoteplotní zinkování s odstředěním se používá pro pokovení drobných součástí (například šroubů), u kterých je potřeba získat vhodné mechanické vlastnosti povrchu. [2]

## 8. Otěr

Otěr se řadí mezi mechanické opotřebení povrchu, které se projevuje u abraze, eroze nebo adheze. Opotřebení je nežádoucí jev, při kterém se mechanickými účinky přemísťuje nebo odstraňuje materiál z povrchu výrobku. Kromě mechanických účinků na materiál působí ještě další vlivy jako je teplota, vlhkost, korozní prostředí aj., které mohou ovlivňovat děje na povrchu materiálu. Otěruvzdornost (odolnost proti opotřebení) je tedy velmi důležitou materiálovou vlastností a schopností povrchu odolávat účinkům vnějších sil. Principy opotřebení materiálu, u kterých se projevuje otěr, jsou zobrazeny na Obr. 13. Vědní disciplína, která se zabývá vlivem tření, opotřebení a mazání povrchu, se nazývá tribologie.



Obr. 13: Schéma vybraných opotřebení materiálu, u kterých se projevuje otěr: 1) adhezivní, 2) abrazivní, 3) a 4) erozivní [14]

Žárově zinkované oceli mají dobrou odolnost proti otěru, což je výhodné pro manipulaci s výrobkem i pro jeho využití. Pozinkované výrobky se využívají například jako kryty v podlaze, prahy v dopravních prostředcích, schodiště, regály apod.

### 8.1. Abrazivní opotřebení

Pro abrazivní opotřebení je charakteristické odstraňování materiálu vzájemným třením dvou těles. V tomto případě závisí otěr na tvrdosti a nerovnostech povrchu a velikosti přítláčné síly. Dalším charakteristickým způsobem abrazivního opotřebení je odstraňování materiálu tvrdými částicemi, které se pohybují mezi dvěma povrchy. Rychlost a velikost opotřebení potom závisí na tvaru, velikosti a množství těchto částic (abraziva), jejich tvrdosti a velikosti přítláčné síly. Třením může dojít k rýhování povrchu, při kterém částice podél dráhy pohybu vytváří val, nebo způsobí odstraňování materiálu a vznik třísky podobně jako u obrábění. [14]

## 8.2. Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je způsobeno vzájemným pohybem dvou ploch, při kterém jsou mikročástice z jednoho povrchu odtrhávány a přenášeny na druhý. O adhezivní opotřebení se jedná i v případě, kdy jsou mikročástice pohybem dvou ploch z povrchu pouze odtrženy. K oddělení dochází působením meziatomových sil, které se snaží povrchy sloučit do jednoho celku. Tento mechanismus opotřebení se u kovových materiálů uplatňuje nejčastěji. Povrchy materiálu se nedotýkají v celé ploše, ale jen na mikronerovnostech povrchu, které se vlivem tření elasticky a plasticky deformují. Při vyšší rychlosti pohybu dvou ploch se mezi nimi zvyšuje teplota a dochází k mikrospojům povrchu, ty se ale vlivem pohybu vzápětí odtrhnou a dochází tak k adhezivnímu opotřebení. [6; 14]

## 8.3. Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení probíhá dvěma způsoby. Jedním je opotřebení povrchu materiálu částicemi, které jsou unášeny médiem (proudící kapalinou nebo plynem). Druhým způsobem erozivního opotřebení je opotřebení povrchu médiem samotným. Při nárazu částice (nebo média) o povrch se kinetická energie mění na deformační, což se projevuje rýhováním povrchu nebo odtržením povrchových částic. Poškození vlivem eroze je velmi složitý proces, který ovlivňují:

- podmínky dopadu (úhel, rychlost),
- vlastnosti exponovaného materiálu,
- vlastnosti média a částic, které na povrch dopadají.

Zajímavé je, že k erozivnímu opotřebení může dojít nejen při dopadu tvrdé částice, ale i při dopadu částice měkčí než je povrch materiálu. Nejčastěji se vyskytuje v potrubí, čerpadlech, ventilátorech atd. [6; 14]

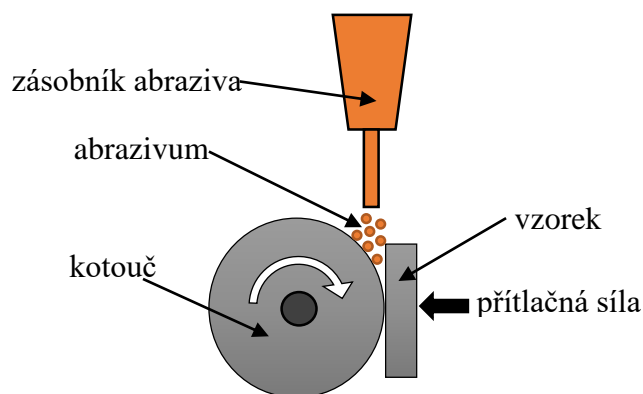
## 8.4. Hodnocení odolnosti proti otěru

Pro měření tření, opotřebení i otěru se používají přístroje nazývané tribometry. Tribometry hodnotí odolnost proti opotřebení různými metodami, v různém uspořádání, ale princip zůstává stále stejný. Jde o tření dvou těles. V další části jsou popsány některé metody, které se pro hodnocení používají.



## Test abrazivního opotřebení

Někdy se tato metoda testování nazývá Dry sand/rubber wheel method podle druhu použitého abraziva (písek) a materiálu pohybujícího se kotouče (kotouč s vrstvou pryže). Schéma metody je znázorněno na Obr. 14. Vzorek je přitlačován na motorem poháněný kotouč a do místa jejich styku je přisypáváno abrazivum ze zásobníku. Vzorek je ve formě

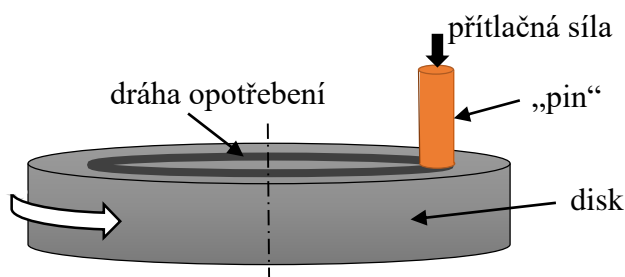


Obr. 14: Schéma přístroje na testování abrazivního opotřebení [15]

desky nebo bloku a velikost přítláčné síly je dána hmotností závaží, které je připevněno na přístroj přes zatěžovací páku. Abrazivní částice jsou přidávány ze zásobníku. Po uplynutí nastavené doby chodu se vzorek vyjme z přístroje a změří se ztráta otěrem. Důležitými parametry pro měření jsou velikost přítláčné síly, rychlost otáčení kotouče, typ abraziva a jeho dávkování. [15]

## Metoda „Pin on disc“

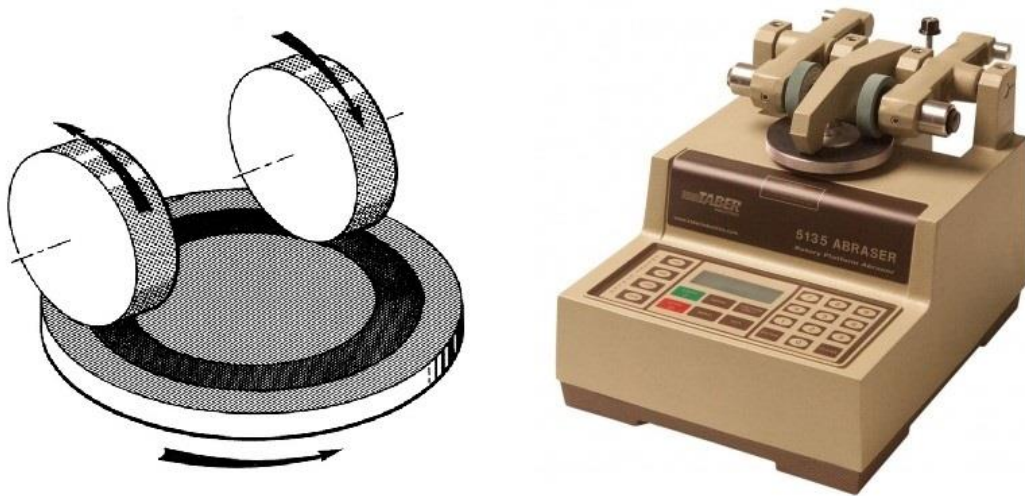
„Pin on disc“ je metoda, při které zatížený „pin“ (tělísko) působí na plochý rotující disk (viz Obr. 15). Tím se na povrchu disku vytvoří kruhová dráha způsobená opotřebením. Rozměry dráhy jsou dány tvarem „pinu“ a nastavením přístroje. Přístroj lze použít k vyhodnocení opotřebení a zjištění třecích vlastností materiálu. Vzorek může být na přístroj umístěn jako „pin“ nebo jako disk, ale nikdy jako oba současně. „Pin“ se používá v několika různých geometrických provedeních. [15]



Obr. 15: Schéma metody „Pin on disc“ [15]

### *Taber Abraser*

Dalším tribometrem, na kterém lze testovat odolnost proti otěru, je Taber Abraser (Obr. 16). Princip tohoto přístroje je podobný jako u metody „Pin on disc“. Vzorek ve tvaru disku je umístěn na rotačním stole, který se otáčí stálou rychlostí okolo vertikální osy. Výška vzorku může být maximálně 40 mm. Na vzorek dosedají dva kotouče z abrazivního materiálu umístěné na nezávislých ramenech. Každé rameno váží 250g a navíc ho lze zatížit přídatným závažím. Naopak pro snížení zatížení lze použít protizávaží, které se přidá na opačnou stranu ramene. Zatížení působící na kotouč určuje kontaktní tlak mezi vzorkem a kotoučem. Čím větší zatížení tlačí kotouč na vzorek, tím rychleji bude docházet k opotřebení. Dále také závisí na materiálu kotoučů. Vlivem rotace otočného stolu se brusné kotouče odvalují v opačných směrech kolem vodorovné osy. Takový pohyb způsobuje vznik výsledné stopy opotřebení (mezikruží o ploše přibližně 30 cm<sup>2</sup>), na které jsou patrné zkřížené oblouky od kotoučů. Nad touto stopou je při provozu kvůli odděleným částicím připojeno odsávání. Při výměně vzorků ho lze jednoduše odklopit. [16]



*Obr. 16: Taber abraser a jeho princip [16]*

## 9. Experimentální část

Cílem experimentální části této bakalářské práce je zhodnotit ořezuvzdornost zinkového povlaku v závislosti na množství cínu přidaného do zinkové lázně. Pro experiment bylo nutné zvolit tvar vzorků s ohledem na velikost lázně a způsob umístění v tribometru. Použita byla ocel S235JRG1 (ČSN 11 373) ve tvaru disku o průměru 105 mm a výšce 2 mm, který má ve svém středu otvor o průměru 7 mm. Otvor je důležitý z hlediska zavěšení vzorku při žárovém zinkování i následném připevnění na tribometr při měření otěru.

Za účelem zhodnocení vlivu cínu byly ve spolupráci se zinkovnami ACO Industries k. s. a Wiegel CZ žárové zinkování s.r.o. vytvořeny 4 lázně, ve kterých se vzorky pozinkovaly. Ve společnosti Wiegel byla pozinkována první sada vzorků v lázni s 0 hm. % cínu. Společnost ACO Industries pozinkovala další sadu vzorků v lázni s 0,068 hm. % cínu. Běžně používané lázně pro žárové zinkování obsahují pouze malé množství cínu, a proto bylo nezbytné si lázně s vyššími obsahy cínu připravit samostatně v laboratoři Ústavu strojírenské technologie ČVUT v Praze a pozinkovat vzorky na místě. Lázně s 0,499 hm. % cínu a 1,12 hm. % cínu tak vznikly v laboratoři přidáním vypočteného množství čistého cínu do lázně od společnosti ACO Industries. Předúprava vzorků a pozinkování v těchto lázních je popsáno v následující podkapitole. Složení zinkovacích lázní bylo změřeno stolním spektrometrem Q4 Tasman a nejvíce zastoupené prvky uvádí Tab. 3. Kompletní protokoly z měření jsou v Příloze A. V lázni od společnosti Wiegel je znám pouze obsah cínu a to 0 hm. %.

Tab. 3: Složení zinkovacích lázní

Prvek	Lázeň 0	Lázeň 1	Lázeň 2	Lázeň 3
<b>Sn [%]</b>	<b>0</b>	<b>0,068</b>	<b>0,499</b>	<b>1,12</b>
Pb [%]		0,013	0,015	0,018
Cu [%]		0,007	0,008	0,008
Zn a jiné		zbytek	zbytek	zbytek

### 9.1. Příprava vzorků

V této podkapitole je popsána předúprava a pozinkování vzorků v laboratorních podmínkách v lázni s 0,499 hm. % cínu a 1,12 hm. % cínu. Ostatní vzorky byly pozinkovány v profesionálních zinkovnách.

### 9.1.1. Předúpravy povrchu

Ocelové vzorky nebyly příliš znečištěné, a tak se mohlo přistoupit rovnou k odmašťování. Odmašťování proběhlo v průmyslové ultrazvukové vaně K-2IE viz Obr. 17, ve které byl namíchan 10% roztok přípravku Star 75 PN. Technický list tohoto alkalického přípravku je uveden v příloze B. Do lázně byly vloženy vždy současně dva vzorky a odmašťování trvalo 15 minut při teplotě 50°C. Po odmaštění byl proveden oplach.



Obr. 17: Průmyslová ultrazvuková vana K-2IE

Moření probíhalo při pokojové teplotě zavěšením vzorků do lázně s 11% roztokem HCl. Povrch vzorků nevykazoval výrazné korozní napadení, a proto byla doba moření stanovena na 1,5 hodiny. Následně byl proveden důkladný dvoustupňový oplach.

Po důkladném oplachu bylo na vzorek nanášeno tavidlo. Tavidlem byl vodný roztok chloridu zinečnatého ( $ZnCl_2$ ) a chloridu amonného ( $NH_4Cl$ ) v poměru 3:2. Protože se v laboratorních podmínkách jednalo o suchý proces žárového zinkování, bylo nanášení tavidla provedeno ponořením vzorku do lázně a setrváním po dobu 5 minut. Po vynoření z tavidla byl vzorek vysušen horkovzdušnou pistolí, aby se zabránilo rozstříku zinku při ponořování do zinkové lázně. Zvýšená pozornost byla věnována vysušení místa pod závěsem, kde by mohla vlhkost zůstat.

### 9.1.2. Zinkování

Před samotným žárovým zinkováním bylo nutné připravit odpovídající zinkovou lázeň. Lázeň s 0,499 hm. % Sn vznikla přidáním vypočteného množství cínu do lázně poskytnuté zinkovnou ACO Industries. Pro žárové zinkování byl v laboratoři k dispozici zinkovací kelímek ve tvaru válce o průměru 120 mm a výšce 70 mm. Z těchto rozměrů byl vypočítán objem lázně a dle hustoty zinku přepočítána hmotnost lázně, podle které se určil odpovídající přírůstek cínu. Přesné složení lázně se pak ověřilo odebráním vzorku

a analýzou na stolním spektrometru Q4 Tasman. Stejný postup byl využit i při výrobě lázně s 1,12 hm. % Sn.

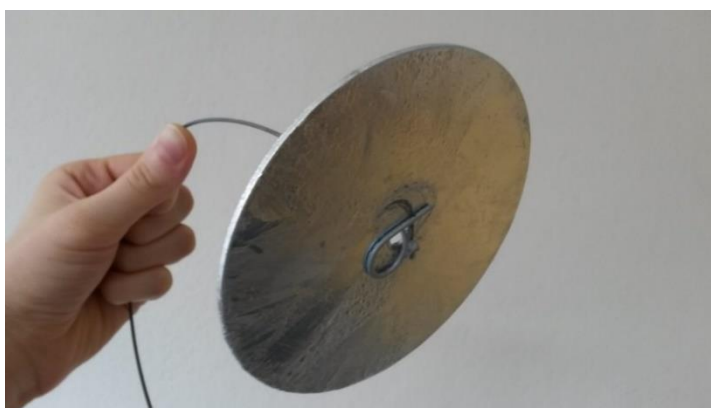
Žárové zinkování probíhalo při teplotě 450°C. Osušený vzorek byl opatrně ponořen do zinkové lázně (s 0,499 nebo 1,12 hm. % Sn) a zinkování trvalo 5 minut. Po vyjmutí z lázně se vzorek nechal na vzduchu vychladnout. Tímto způsobem bylo v každé lázni pozinkováno 10 vzorků. Zinkovací kelímek je na Obr. 18 a Obr. 19. Pozinkovaný vzorek ukazuje Obr. 20.



*Obr. 18: Zinkovací kelímek*



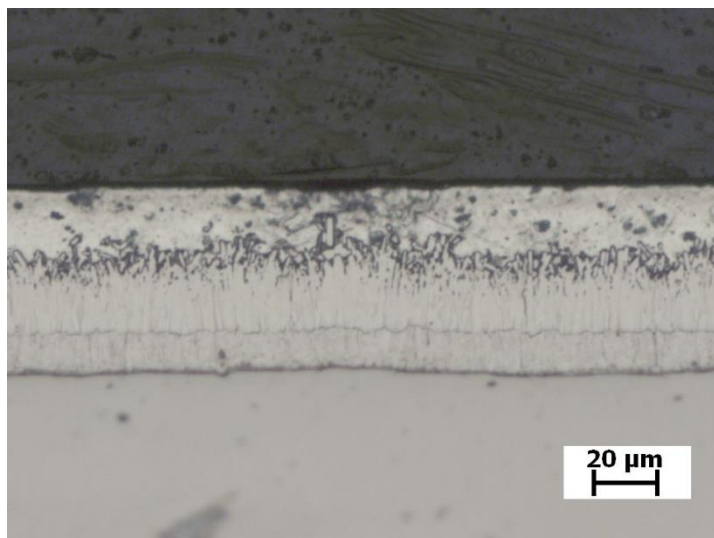
*Obr. 19: Zinkovací kelímek – pohled na lázeň*



*Obr. 20: Vzorek se závěsem po pozinkování a vychladnutí*

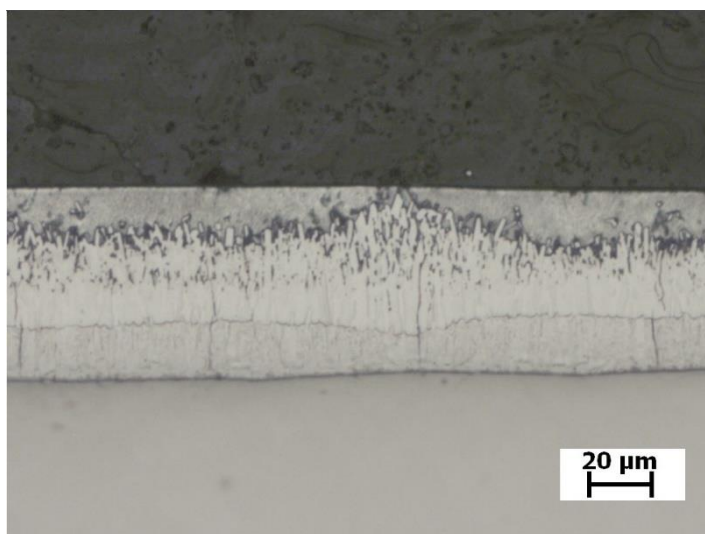
## 9.2. Metalografie

Z každé lázně se vybral jeden vzorek, ze kterého se vytvořil metalografický výbrus. Při přípravě se vzorky nejprve nařezaly na menší části, které se za tepla zalisovaly do jednotné formy. Po preparaci vzorků bylo ještě nutné zkoumanou plochu vybrousit, vyleštit a následně naleptat. Broušení a leštění probíhalo v několika stupních. Leptání se pro zviditelnění mikrostruktury zinkového povlaku provedlo leptadlem Nital.



Obr. 21: Struktura povlaku z lázně s 0 hm. % Sn

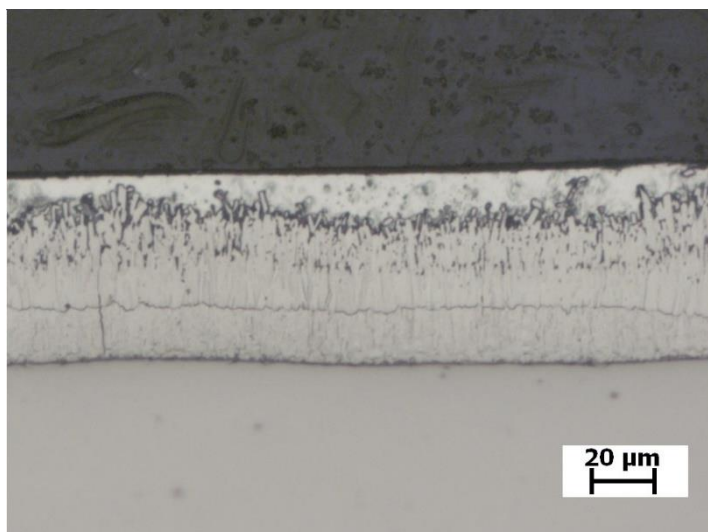
Na Obr. 21 je struktura zinkového povlaku z lázně s 0 hm. % cínu. Ta odpovídá struktuře zinkového povlaku na oceli s nízkým obsahem křemíku (do 0,04 % Si), pro kterou je typická souvislá vrstva fáze  $\delta$ . Nad touto vrstvou jsou vidět krystaly fáze  $\zeta$ , které k sobě dobře přiléhají. Na rozhraní s vrstvou čistého zinku jsou krystaly fáze  $\zeta$  rozvolněné. Průměrná tloušťka povlaku je 59,34  $\mu\text{m}$ .



Obr. 22: Struktura povlaku z lázně s 0,068 hm. % Sn

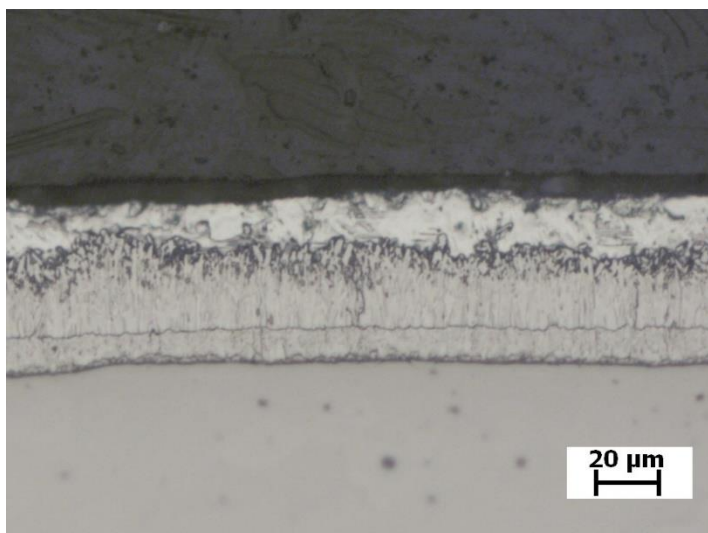


Z Obr. 22 lze vidět, že struktura zinkového povlaku z lázně s 0,068 hm. % cínu se liší pouze větším podílem rozvolněných krystalů fáze  $\zeta$  a slabší vrstvou čistého zinku (fáze  $\eta$ ). Průměrná tloušťka povlaku je 60,2  $\mu\text{m}$ .



*Obr. 23: Struktura povlaku z lázně s 0,499 hm. % Sn*

Na struktuře zinkového povlaku z lázně s 0,499 hm. % cínu (Obr. 23) je ještě výraznější vrstva rozvolněných krystalů fáze  $\zeta$ , které prostupují do čistého zinku. Fáze  $\delta$  je zde zastoupena v podobné tloušťce jako u lázně s 0,068 hm. % cínu. Průměrná tloušťka povlaku je 57,1  $\mu\text{m}$ .



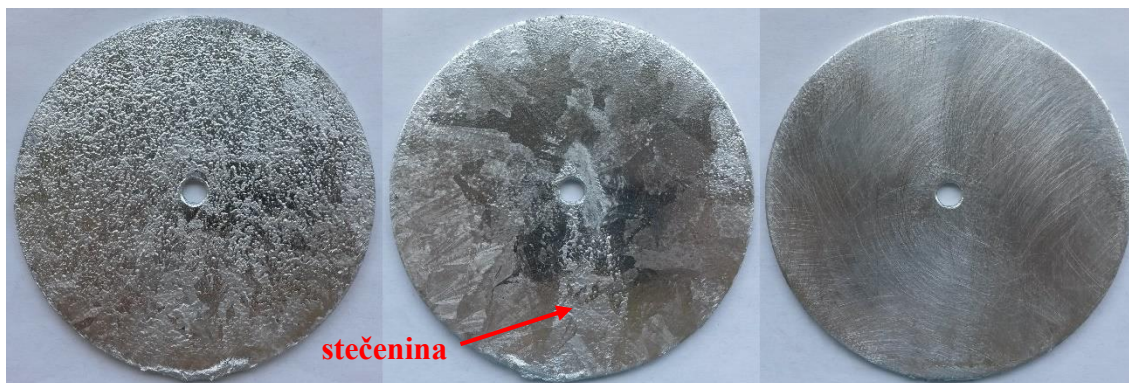
*Obr. 24: Struktura povlaku z lázně s 1,12 hm. % Sn*

Struktura zinkového povlaku z lázně s 1,12 hm. % cínu (Obr. 24) se od ostatních liší nejvíce vrstvou fáze  $\delta$ , která je u ní nejtenčí. Vrstva fáze  $\zeta$  je tvořena krystaly, které k sobě přiléhají podobně jako u povlaku z lázně s 0 hm. % cínu. V této struktuře je oproti

povlakům z lázně s 0,068 hm. % cínu a 0,499 hm. % cínu výraznější vrstva čistého zinku (fáze  $\eta$ ). Průměrná tloušťka povlaku je 54,9  $\mu\text{m}$ .

### 9.3. Měření otěru

Měření odolnosti proti otěru proběhlo na tribometru Taber Abraser, jehož princip byl popsán v teoretické části. Konkrétně se jednalo o Taber Abraser model 503 standard abrasion tester. Pro měření na Taber Abraseru je důležité, aby byl povrch vzorku relativně hladký bez výrazných nerovností. Toto kritérium splňovaly vzorky pozinkované v profesionálních zinkovnách z lázní s 0 hm. % Sn a 0,068 hm. % Sn. Vzorky, které byly pozinkovány v laboratoři (0,499 hm. % Sn a 1,12 hm. % Sn), měly na svém povrchu výraznější nerovnosti a stečeniny (viz Obr. 25). Příčinou byly pravděpodobně malé rozměry zinkovacího kelímku, které způsobily omezenou manipulaci se vzorkem. Další příčinou mohl být i vznik tvrdého zinku při zinkování, který v tomto případě nemohl klesnout na dno lázně, ale ulpěl na horní straně vzorku. Pro měření otěru se tedy použila pouze spodní strana vzorku, kde bylo nerovností méně. Vzorky bylo ale i tak nutné lehce přebrousit, aby vznikl hladší povrch a kotoučky na nerovnostech a stečeninách nepřeskakovaly (viz Obr. 25). Bez přebroušení by brusné kotouče ubíraly materiál pouze z vrcholků nerovností a nevytvořila by se spojitá stopa. Tím by bylo značně ovlivněné vyhodnocení otěru, protože by odebraná plocha a tedy i hmotnost byla nižší.



Obr. 25: Vzorek pozinkovaný v lázni s 1,12 hm. % Sn (zleva) horní strana vzorku, spodní strana vzorku, vzorek po přebroušení

Z přípravných měření na Taber Abraseru se zjistilo, že při měření bez přídavných závaží zinkový povlak nevykazuje téměř žádné známky opotřebení. A to ani při vyzkoušení různých typů abrazivních kotoučů. Nakonec se zdály neoptimálnější následující podmínky. Každé rameno přístroje bylo zatíženo závažím o hmotnosti 500 g



a nebylo použito žádné protizávaží (viz Obr. 27). Kotouče byly zvoleny nepružné Calibrade H-18 od oficiálního výrobce Taber Industries (Obr. 26).



Obr. 26: Použité kotouče Calibrade H-18



Obr. 27: Taber Abraser před spuštěním testu

Hodnocení odolnosti proti otěru se provedlo metodou úbytku hmotnosti a hloubkou opotřebení, které jsou uvedeny na stránkách výrobce přístroje. U těchto metod je důležité při měření průběžně zaznamenávat hmotnost vzorku a také měnící se tloušťku povlaku v místě opotřebení v závislosti na počtu uběhnutých cyklů. Jeden cyklus odpovídá jedné otáčce rotačního stolu (tzn. i vzorku) a trvá 1 s.

Při prvním měření se ukázalo, že kotoučky Taber Abraseru od začátku nezanechávají na všech místech vzorku stejnou stopu, ale je potřeba několika cyklů na „zaběhnutí“. Potřebný počet takových cyklů závisí na nerovnostech vzorku a jejich odolnosti. Pro pozinkované vzorky se stanovil optimální počet těchto cyklů na 90. Po uběhnutí 90 cyklů se vzorek zvažil na analytických vahách a tloušťkoměrem se změřila tloušťka povlaku v opotřebené stopě. Stav vzorku po 90 cyklech sloužil jako výchozí a není započítán do samotného měření.

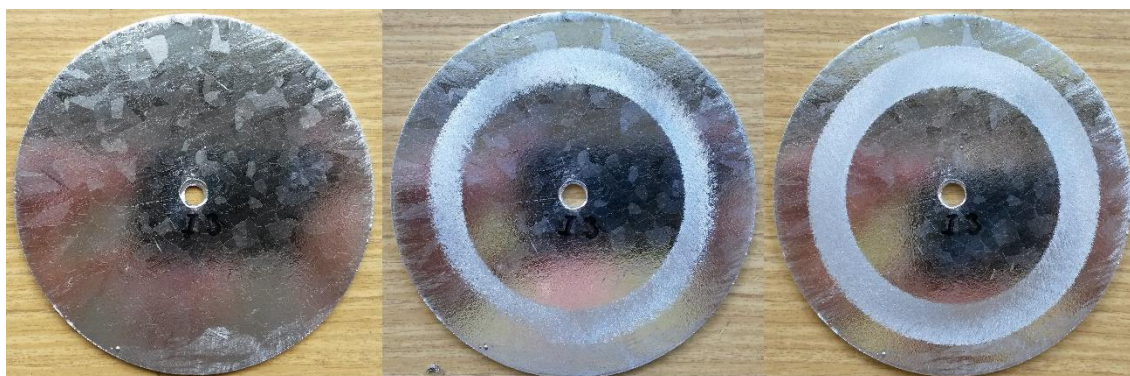
Samotné měření se rozdělilo na úseky po 200 cyklech. Po každých 200 cyklech se vzorek opět zvažil a změřila se tloušťka povlaku v opotřebené stopě. Měření pokračovalo do té doby, než tloušťkoměr ukázal tloušťku povlaku 0  $\mu\text{m}$  (tj. když opotřebení dosáhlo základního ocelového materiálu).

U většiny vzorků nastal tento stav po 2800 cyklech. Nejen, že tím bylo měření časově náročné, ale při tak vysokém počtu cyklů docházelo i k vysoké spotřebě abrazivních kotoučů. Proto byly z časového i ekonomického hlediska vyhodnoceny z každé zinkové lázně pouze 3 vzorky.

V následující části je ukázka naměřených dat (Tab. 4) jednoho vzorku včetně fotografií z měření (Obr. 28 a Obr. 29) a vynesení hodnot do grafů (Obr. 30 a Obr. 31). Ostatní naměřená data jednotlivých vzorků a jejich fotografie jsou uvedeny v Příloze C a Příloze D.

Tab. 4: Naměřená data vzorku č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn

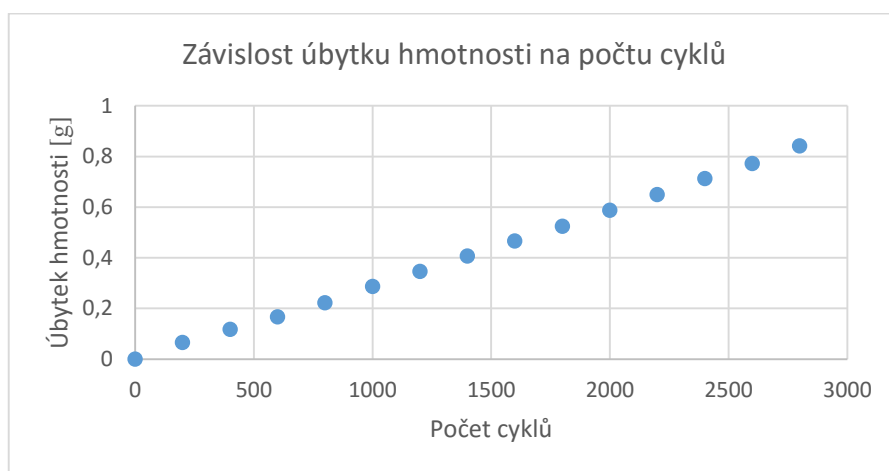
počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka povlaku [ $\mu\text{m}$ ]
0	142,35131	0	53,8 $\pm$ 2,6
200	142,28596	0,06535	48,8 $\pm$ 2,8
400	142,23423	0,11708	46,5 $\pm$ 3,6
600	142,18536	0,16595	42,8 $\pm$ 1,9
800	142,12921	0,2221	40,6 $\pm$ 1,4
1000	142,06505	0,28626	35,1 $\pm$ 2,4
1200	142,00532	0,34599	31,6 $\pm$ 1,5
1400	141,94518	0,40613	28,3 $\pm$ 2,7
1600	141,88596	0,46535	22,9 $\pm$ 2,2
1800	141,82686	0,52445	19,1 $\pm$ 2,1
2000	141,76450	0,58681	17,5 $\pm$ 3,3
2200	141,70269	0,64862	13,4 $\pm$ 1,9
2400	141,63937	0,71194	10,4 $\pm$ 1,6
2600	141,57908	0,77223	4,0 $\pm$ 1,8
2800	141,51013	0,84118	1,4 $\pm$ 2,4



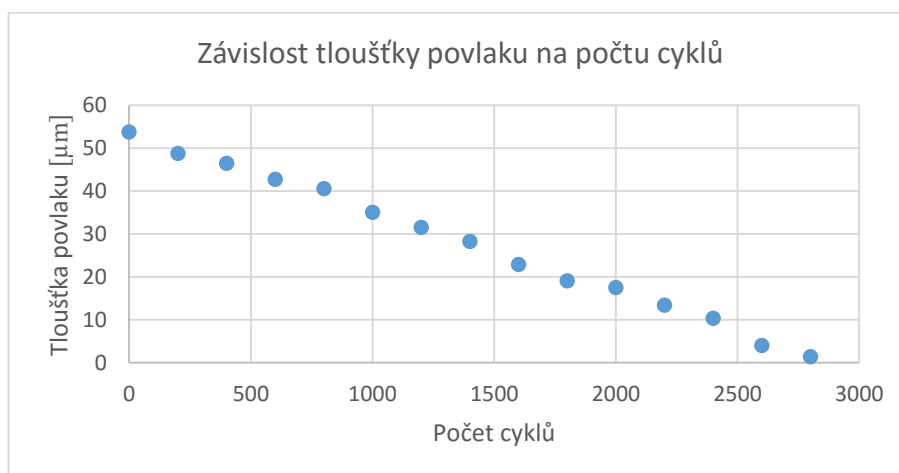
Obr. 28: Vzorek č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn (zleva) před testem, po 90 cyklech (začátek hodnocení), po 600 cyklech



Obr. 29: Vzorek č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn (zleva) po 1200 cyklech, 2000 cyklech, 2800 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obr. 30: Graf závislosti úbytku hmotnosti na počtu cyklů vzorku č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn

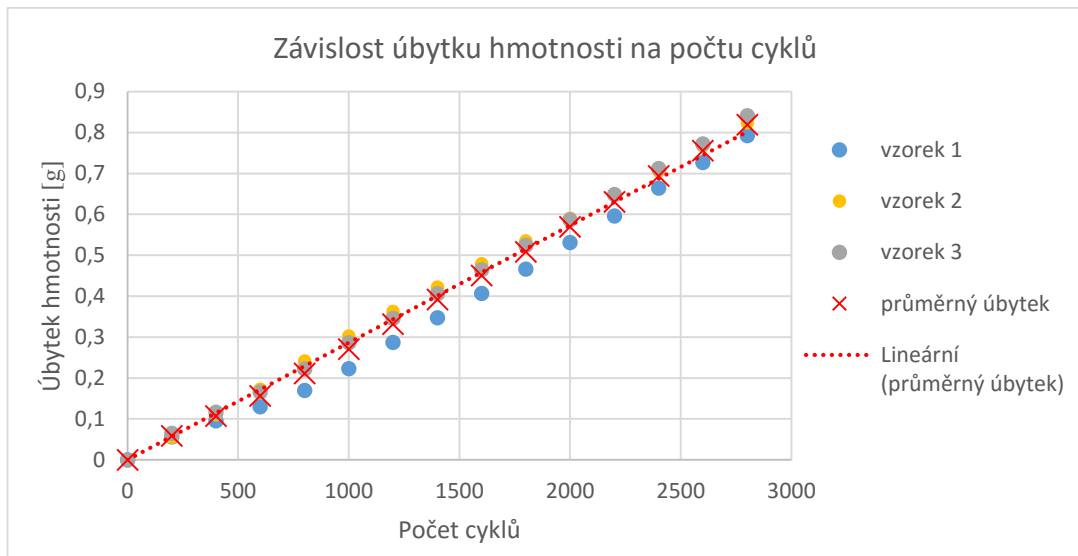


Obr. 31: Graf závislosti tloušťky povlaku na počtu cyklů vzorku č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn

## 9.4. Vyhodnocení

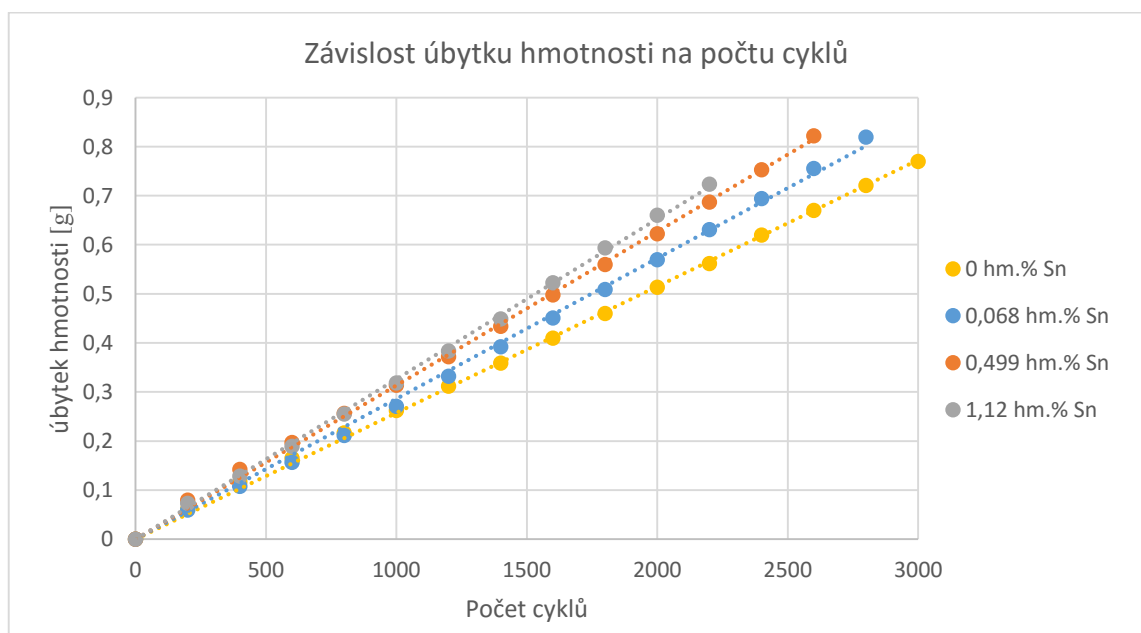
Vyhodnocení odolnosti proti otěru zinkových povlaků vzniklých v lázních s různým obsahem cínu se provedlo porovnáním naměřených dat. Aby se mezi sebou daly porovnávat výsledky jednotlivých lázní, musely být napřed ze vzorků vyhodnoceny

závislosti charakterizující danou lázeň. Jako příklad budou opět uvedeny vzorky z lázně s 0,068 hm. % cínu.



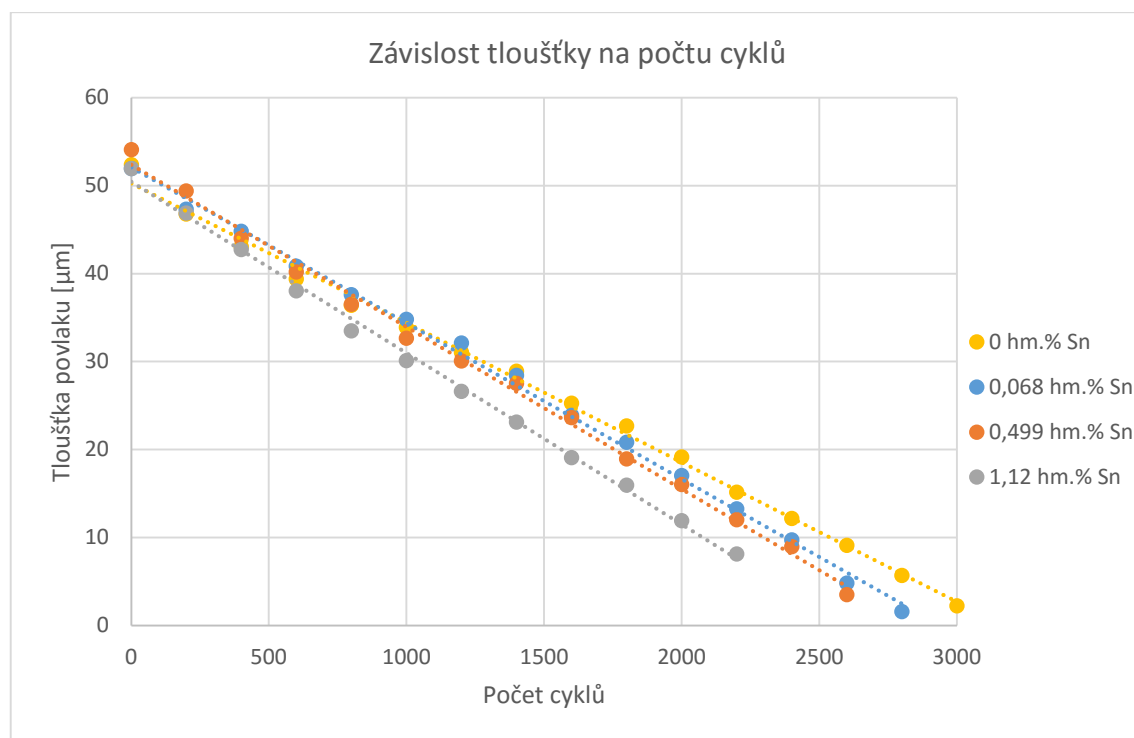
Obr. 32: Graf výsledné závislosti úbytku hmotnosti na počtu cyklů lázně s 0,068 hm. % Sn

Výsledná závislost úbytku hmotnosti na počtu cyklů charakterizující lázeň s 0,068 hm. % cínu (viz Obr. 32) byla určena jako průměr naměřených hodnot jednotlivých vzorků. Při určení výsledné závislosti tloušťky povlaku na počtu cyklů dané lázně se postupovalo stejným způsobem. Po získání závislostí ze všech lázní byly tyto grafy spojeny do jednoho, ze kterého lze jednoduše vyčíst, který povlak byl v závislosti na obsahu cínu v lázni proti otěru nejodolnější (viz Obr. 33).



Obr. 33: Porovnání grafů závislosti úbytku hmotnosti na počtu cyklů pro lázně s různým obsahem cínu

Z Obr. 33 je patrné, že s vyšším obsahem cínu v lázni se zrychluje úbytek hmotnosti v závislosti na počtu cyklů. To znamená, že dochází k výraznějšímu otěru. U vzorků z lázně s 1,12 hm. % cínu se kotoučky dostaly na základní ocelový materiál dokonce už při 2200 cyklech.



Obr. 34: Porovnání grafů závislosti tloušťky povlaku na počtu cyklů pro lázně s různým obsahem cínu

Stejné výsledky ukazuje i Obr. 34, ze kterého lze vyčíst, že s vyšším obsahem cínu v lázni dochází k rychlejšímu úbytku tloušťky zinkového povlaku v závislosti na počtu cyklů. Tento graf neukazuje výsledky tak přehledně jako Obr. 33, ale závislosti jednotlivých lázní se v první polovině grafu překrývají. Překrytí je způsobeno různou počáteční tloušťkou povlaku. I přes to se ale výsledky shodují s těmi z Obr. 33. Například vzorky z lázně s 0,499 hm. % cínu dosahovaly průměrně největší počáteční tloušťky povlaku, ale k opotřebení na základní ocelový materiál došlo už po 2600 cyklech (tzn. druhé nejrychlejší opotřebení). Hodnoty naměřené tloušťkoměrem u jednotlivých vzorků měly také poměrně velkou odchylku, viz Tab. 4 nebo Příloha C, proto Obr. 34 neukazuje tak přesné výsledky jako Obr. 33.

## 10. Závěr

Cílem této práce bylo provést rešerši vlivů prvků přidávaných do oceli a zinkové lázně na vlastnosti zinkového povlaku. Konkrétně pak v experimentální části prověřit vliv cínu v zinkové tavenině na odolnost proti otěru zinkového povlaku. Z tohoto důvodu se ocelové vzorky pozinkovaly ve 4 lázních s obsahem cínu od 0 hm. % do 1,12 hm. %. Metalografické výbrusy vzorků neukázaly výrazné odlišnosti ve struktuře povlaku ani jejich skryté vady. Pouze u vzorku z lázně s 1,12 hm. % cínu byla odhalena o něco menší vrstvička fáze  $\delta$  než u vzorků s nižším obsahem cínu. Měření odolnosti proti otěru ukázalo, že s vyšším množstvím cínu v lázni docházelo k rychlejšímu úbytku hmotnosti vzorků, tzn. k rychlejšímu opotřebení. Stejně výsledky potvrdilo i kontrolní měření tloušťky povlaku. Tloušťka povlaku se v závislosti na počtu cyklů měření snižovala rychleji u vzorků pozinkovaných v lázni s vyšším obsahem cínu.

Z výsledků měření je tedy patrné, že přítomnost cínu v zinkové lázni snižuje odolnost proti otěru. To ovšem nemusí znamenat, že je přítomnost cínu v zinkové lázni nevýhodou. Vždy závisí na oblasti použití daného výrobku, kde odolnost proti otěru nemusí být nejdůležitější vlastností.



## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] *Příručka žárového zinkování*. [4. aktualiz. vyd.]. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2011, 56 s. ISBN 978-80-260-3324-0.
- [2] KUKLÍK, Vlastimil a Jan KUDLÁČEK. *Žárové zinkování*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2014, 199 s. ISBN 978-80-905298-2-3.
- [3] NOVOTNÝ, Jiljí. *Technologie I: slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996, 227 s. ISBN 80-01-01420-7.
- [4] ŠTURC, Josef. *Moření oceli*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985, 256 s.
- [5] KUKLÍK, Vlastimil. Metalurgie tvorby povlaku žárového zinku. *Povrcháři* [online]. 2013, **2013**(7), 2-6 [cit. 2016-02-18]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201312\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201312_povrchari.pdf)
- [6] LASEK, Stanislav. *Základy degradačních procesů: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 149 s. ISBN 978-80-248-3373-6. Dostupné také z: [http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek\\_Zaklady\\_degradacnich\\_procesu.pdf](http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf)
- [7] *The Basics of Hot Dip Galvanized Steel: First and Last Line of Defence* [online]. Galvanizers Association of Australia, 2012 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.hartway.com.au/uploads/pdfs/The%20Basics%20of%20Hot%20Dip%20Galvanized%20Steel.pdf>
- [8] HAVRÁNKOVÁ, Zdeňka. *Žárové zinkování ponorem - Základní informace pro uživatele* [online]. b.r. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.acsz.cz/clanek/zarove-zinkovani-ponorem-zakladni-informace-pro-uzivatele/>
- [9] Steels suitable for galvanizing. *Nordic galvanizers* [online]. b.r. [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://www.nordicgalvanizers.com/narvar/Steelssuitableforgalvanizing.htm>

- [10] SCHULZ, Wolf-Dieter. Jaké výhody a nevýhody mají legované zinkové taveniny?. In: *Sborník přednášek: 15. konference žárového zinkování*. Asociace českých a slovenských zinkoven, 2009, s. 92-105. ISBN 978-80-254-5069-7.
- [11] SCHULZ, Wolf-Dieter. Časté chyby při žárovém zinkování kusového zboží - příčiny a možnosti jejich předcházení. In: *Sborník přednášek: 19. konference žárového zinkování*. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2013, s. 43-52. ISBN 978-80-905298-1-6.
- [12] KANIA, Henryk, Piotr LIBERSKI, Anna SKUPIŃSKA a Marzena NOWICKA-NOWAK. Srovnání korozní odolnosti Zn A Zn-5Al povlaků. *Konstrukce* [online]. 2016 [cit. 2016-03-10]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/srovnani-korozni-odolnosti-zn-a-zn-5al-povlaku/>
- [13] SCHULZ, Wolf-Dieter. Taveniny pro žárové zinkování s obsahem olova a „bezolovnaté“ – co bychom o nich měli znát. In: *Sborník přednášek: 18. konference žárového zinkování*. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2012, s. 73-82. ISBN 978-80-905298-0-9.
- [14] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070826681.
- [15] LI, C. X. Wear Testing and Wear Measurement. In: *University of Miskolc* [online]. b.r. [cit. 2016-07-14]. Dostupné z: [http://emrtk.uni-miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz\\_anyagtech/1\\_konzultacio\\_elemei/wear\\_testing\\_measurement.htm](http://emrtk.uni-miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_testing_measurement.htm)
- [16] Taber Abraser (Abrader). *Taber Industries* [online]. c2011-2016 [cit. 2016-07-19]. Dostupné z: <http://www.taberindustries.com/taber-rotary-abraser>



## Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma sledu operací suchého procesu žárového zinkování [2].....	10
Obr. 2: Schéma sledu operací mokrého procesu žárového zinkování [2] .....	11
Obr. 3: Schéma sledu operací chemické předúpravy před žárovým zinkováním [2] .....	12
Obr. 4: Princip moření a složení oxidů v okujích [2] .....	14
Obr. 5: Schéma dvoustupňového oplachu [4].....	16
Obr. 6: Rovnovážná soustava železo – zinek [5].....	17
Obr. 7: Struktura zinkového povlaku na oceli [2] .....	18
Obr. 8: Tvrdost některých slitinových fází měřená mikrotvrdoměrem [1].....	19
Obr. 9: Zvýšená tloušťka povlaku na hraně součásti [7] .....	20
Obr. 10: Závislost tloušťky zinkového povlaku na obsahu Si v oceli při různých dobách zinkování [1].....	22
Obr. 11: Struktura povlaku v daných oblastech: a) ocel s 0,003 % Si, b) ocel s 0,08 % Si, c) ocel s 0,21 % Si, d) ocel s 0,38 % Si [2] .....	23
Obr. 12: Vliv niklu na tloušťku povlaku v Sandelinově oblasti [1] .....	26
Obr. 13: Schéma vybraných opotřeбенí materiálu, u kterých se projevuje otěr: 1) adhezivní, 2) abrazivní, 3) a 4) erozivní [14] .....	30
Obr. 14: Schéma přístroje na testování abrazivního opotřeбенí [15] .....	32
Obr. 15: Schéma metody „Pin on disc“ [15] .....	32
Obr. 16: Taber abraser a jeho princip [16].....	33
Obr. 17: Průmyslová ultrazvuková vana K-2IE.....	35
Obr. 18: Zinkovací kelímek .....	36
Obr. 19: Zinkovací kelímek – pohled na lázeň.....	36
Obr. 20: Vzorek se závěsem po pozinkování a vychladnutí.....	36
Obr. 21: Struktura povlaku z lázně s 0 hm. % Sn.....	37
Obr. 22: Struktura povlaku z lázně s 0,068 hm. % Sn.....	37
Obr. 23: Struktura povlaku z lázně s 0,499 hm. % Sn.....	38
Obr. 24: Struktura povlaku z lázně s 1,12 hm. % Sn.....	38
Obr. 25: Vzorek pozinkovaný v lázni s 1,12 hm. % Sn (zleva) horní strana vzorku, spodní strana vzorku, vzorek po přebroušení .....	39
Obr. 26: Použité kotouče Calibrade H-18.....	40
Obr. 27: Taber Abraser před spuštěním testu .....	40

Obr. 28: Vzorek č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn (zleva) před testem, po 90 cyklech (začátek hodnocení), po 600 cyklech.....	41
Obr. 29: Vzorek č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn (zleva) po 1200 cyklech, 2000 cyklech, 2800 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku .....	42
Obr. 30: Graf závislosti úbytku hmotnosti na počtu cyklů vzorku č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn .....	42
Obr. 31: Graf závislosti tloušťky povlaku na počtu cyklů vzorku č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn .....	42
Obr. 32: Graf výsledné závislosti úbytku hmotnosti na počtu cyklů lázně s 0,068 hm. % Sn .....	43
Obr. 33: Porovnání grafů závislosti úbytku hmotnosti na počtu cyklů pro lázně s různým obsahem cínu .....	43
Obr. 34: Porovnání grafů závislosti tloušťky povlaku na počtu cyklů pro lázně s různým obsahem cínu .....	44

## Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání kusově nanášených žárově zinkovaných povlaků [2] .....	11
Tab. 2: Přehled železo-zinkových slitinových fází [5] .....	19
Tab. 3: Složení zinkovacích lázní .....	34
Tab. 4: Naměřená data vzorku č. 3 z lázně s 0,068 hm. % Sn.....	41

## **Seznam příloh**

Příloha A – Protokoly z měření na stolním spektrometru Q4 Tasman

Příloha B – Technický list přípravku Star 75 PN

Příloha C – Naměřená data jednotlivých vzorků

Příloha D – Fotografie z měření jednotlivých vzorků

# Příloha A – Protokoly z měření na stolním spektrometru Q4 Tasman

28.7.2016 15:54:53

## Q4 Tasman results

Vzorek	Popis vzorku							
	č. 1	Meril			Kubelková		Poznamka	
	Pb %	Mg %	Al %	Cd %	Sn %	Cu %	Sb %	Zn %
1.	0.012	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.068	0.0073	<0.010	99.89
2.	0.015	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.069	0.0072	<0.010	99.89
3.	0.014	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.065	0.0071	<0.010	99.90
4.	0.012	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.068	0.0070	<0.010	99.90
↑								
∅	<b>0.013</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.068</b>	<b>0.0072</b>	<b>&lt;0.010</b>	<b>99.90</b>
↓								
σ	0.0015				0.0018	0.00014		0.0082
v	11.54				2.647	1.944		0.0082

## Q4 Tasman results

Vzorek	č. 2	Popis vzorku						
		Meril	Kubelková	Poznamka				
	Pb	Mg	Al	Cd	Sn	Cu	Sb	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.014	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.494	0.0079	<0.010	99.47
2.	0.016	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.456	0.0078	<0.010	99.50
3.	0.016	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.509	0.0078	<0.010	99.45
4.	0.015	<0.0010	<0.0050	<0.0020	0.537	0.0080	<0.010	99.42
↑								
∅	<b>0.015</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.499</b>	<b>0.0079</b>	<b>&lt;0.010</b>	<b>99.46</b>
↓								
σ	0.0010				0.034	0.00010		0.034
υ	6.667				6.814	1.266		0.034

## Q4 Tasman results

Vzorek	č. 3	Popis vzorku						
		Meril	Kubelková	Poznamka				
	Pb	Mg	Al	Cd	Sn	Cu	Sb	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.020	<0.0010	<0.0050	<0.0020	1.104	0.0088	<0.010	98.85
2.	0.019	<0.0010	<0.0050	<0.0020	1.254	0.0090	<0.010	98.70
3.	0.017	<0.0010	<0.0050	<0.0020	1.071	0.0090	<0.010	98.88
4.	0.016	<0.0010	<0.0050	<0.0020	1.052	0.0085	<0.010	98.91
↑								
∅	<b>0.018</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>1.120</b>	<b>0.0088</b>	<b>&lt;0.010</b>	<b>98.84</b>
↓								
σ	0.0018				0.092	0.00024		0.093
υ	10.00				8.214	2.727		0.094

## Příloha B – Technický list přípravku Star 75 PN

EVERSTAR s.r.o.  
TECHNICKÝ LIST



### STAR<sup>®</sup> 75 PN – “něpěňivý” superkoncentrát - neobsahuje hydroxidy

- ❖ **Charakteristika:** Průmyslový, vodou ředitelný přípravek řady STAR, určený k čištění středně znečištěných povrchů: ocel, litina, nerez, sklo, plast. Přípravek je velmi účinný při odstraňování ropných zbytků a jiných mastnot ze zařízení, polotovarů, podlah atd. Je vhodný pro mezioperační mytí, údržbu, odmašťování, pod práškové, vodou ředitelné, syntetické a nitro barvy, čištění skla při průmyslovém zpracování atd.
- ❖ **Použití:**
  - postřik nízkotlaký a vysokotlaký
  - ultrazvuk
  - namáčecí vany
  - ruční odmašťování
  - profesionální stroje a zařízení
- ❖ **Využití v průmyslu:** strojní průmysl, automobilní průmysl, letecký průmysl, sklářský průmysl, opravárenský průmysl, kolejová vozidla, lakovny, žárové zinkovny, galvanovny, atd.
- ❖ **Způsob ředění:** od 5% do 15%  
Doporučujeme vyzkoušet vlastní způsob ředění. Doporučená tvrdost vody ( 4° N - 14° N ). Po každé operaci doporučujeme oplach vodou.
- ❖ **Teplota:** 40° - 60°C – zahřátí zvyšuje účinnost čištění a odmašťování.
- ❖ **Ochrana proti korozi:** lze použít inhibitor koroze v odmašťovací lázni nebo v oplachu.
- ❖ **pH ( 1% roztok ):** ~ 11
- ❖ **Balení:** 5 l kanystr, 10 l kanystr, 30 l kanystr, 200 l sud
- ❖ **Určení koncentrace:** titrační metoda, vodivostní metoda  
( bližší informace lze získat na technickém oddělení firmy )

Výrobek se skladuje při teplotách +5°C do +25°C.

Bludovská 18  
787 01 Šumperk  
Telefon: 583 301 070  
Fax: 583 301 089  
e-mail: [everstar@everstar.cz](mailto:everstar@everstar.cz)

IČO: 19013027  
DIČ: CZ19013027  
[www.everstar.cz](http://www.everstar.cz)





## Příloha C – Naměřená data jednotlivých vzorků

Tabulka 1: Lázeň s 0 hm. % Sn vzorek č. 1

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	137,46061	0	52,4 $\pm$ 3,2
200	137,37746	0,08315	46,7 $\pm$ 4
400	137,31758	0,14303	44 $\pm$ 3,8
600	137,27181	0,1888	39,6 $\pm$ 3,9
800	137,22188	0,23873	36,5 $\pm$ 3,3
1000	137,18264	0,27797	34,2 $\pm$ 4,1
1200	137,13597	0,32464	31,2 $\pm$ 2,6
1400	137,09407	0,36654	29,6 $\pm$ 2,8
1600	137,04488	0,41573	25,1 $\pm$ 2,3
1800	136,99355	0,46706	23,8 $\pm$ 3,2
2000	136,93919	0,52142	19 $\pm$ 2,6
2200	136,88562	0,57499	15,5 $\pm$ 2
2400	136,83422	0,62639	12,4 $\pm$ 2,8
2600	136,77945	0,68116	9,5 $\pm$ 2,4
2800	136,72696	0,73365	6,6 $\pm$ 1,6
3000	136,67439	0,78622	2,5 $\pm$ 2

Tabulka 2: Lázeň s 0 hm. % Sn vzorek č. 2

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	137,21768	0	52,3 $\pm$ 4
200	137,16894	0,04874	46,4 $\pm$ 3,2
400	137,11369	0,10399	42,2 $\pm$ 3,4
600	137,06429	0,15339	38,7 $\pm$ 3,3
800	137,01173	0,20595	35,8 $\pm$ 3,2
1000	136,96134	0,25634	33,2 $\pm$ 3
1200	136,91259	0,30509	30,7 $\pm$ 3,4
1400	136,86387	0,35381	28,2 $\pm$ 2
1600	136,81249	0,40519	24,9 $\pm$ 2,8
1800	136,76262	0,45506	21,1 $\pm$ 2,9
2000	136,71032	0,50736	18,1 $\pm$ 3,2
2200	136,65869	0,54329	13,9 $\pm$ 3,2
2400	136,60894	0,60874	11,6 $\pm$ 3,4
2600	136,56357	0,65411	8,6 $\pm$ 2,9
2800	136,51969	0,69799	4,9 $\pm$ 2,8
3000	136,47942	0,73826	1,3 $\pm$ 2,1

Tabulka 3: Lázeň s 0 hm. % Sn vzorek č. 3

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	136,36879	0	52,5 $\pm$ 6
200	136,31636	0,05243	47,3 $\pm$ 4,6
400	136,26524	0,10355	43 $\pm$ 4,2
600	136,21554	0,15325	39,9 $\pm$ 3,3
800	136,16436	0,20443	36,9 $\pm$ 3,1
1000	136,11562	0,25317	34,3 $\pm$ 3,5
1200	136,06249	0,3063	31,3 $\pm$ 3,5
1400	136,01289	0,3559	29 $\pm$ 3,2
1600	135,96122	0,40757	25,9 $\pm$ 3,4
1800	135,91025	0,45854	23,2 $\pm$ 3,7
2000	135,85696	0,51183	20,4 $\pm$ 3,2
2200	135,80171	0,56708	16,1 $\pm$ 3,3
2400	135,74467	0,62412	12,6 $\pm$ 3,4
2600	135,69343	0,67536	9,3 $\pm$ 4
2800	135,63664	0,73215	5,6 $\pm$ 2,9
3000	135,58251	0,78628	3 $\pm$ 3,7

Tabulka 4: Lázeň s 0,068 hm. % Sn vzorek č. 1

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	140,66462	0	48,1 $\pm$ 6
200	140,60814	0,05648	44,6 $\pm$ 8,6
400	140,56912	0,0955	41 $\pm$ 3,4
600	140,53471	0,12991	38 $\pm$ 2
800	140,495	0,16962	34,8 $\pm$ 2,3
1000	140,4417	0,22292	34,8 $\pm$ 2,4
1200	140,37731	0,28731	34,3 $\pm$ 3,3
1400	140,31698	0,34764	30,5 $\pm$ 4,5
1600	140,25788	0,40674	25,5 $\pm$ 3,6
1800	140,19767	0,46695	23,5 $\pm$ 3
2000	140,13343	0,53119	16,7 $\pm$ 4,4
2200	140,06803	0,59659	14,4 $\pm$ 4,2
2400	140,00026	0,66436	9,4 $\pm$ 2,5
2600	139,93781	0,72681	5,8 $\pm$ 2,9
2800	139,87156	0,79306	1,7 $\pm$ 3,5

Tabulka 5: Lázeň s 0,068 hm. % Sn vzorek č. 2

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	136,93734	0	54 $\pm$ 3,7
200	136,88154	0,0558	48,6 $\pm$ 2,8
400	136,82696	0,11038	47 $\pm$ 3,9
600	136,76413	0,17321	41,8 $\pm$ 1,7
800	136,69544	0,2419	37,5 $\pm$ 2,8
1000	136,63454	0,3028	34,5 $\pm$ 2,5
1200	136,57392	0,36342	30,5 $\pm$ 3
1400	136,51486	0,42248	26,6 $\pm$ 2,1
1600	136,45751	0,47983	23,3 $\pm$ 2,2
1800	136,40178	0,53556	19,9 $\pm$ 2,6
2000	136,34647	0,59087	17 $\pm$ 2,7
2200	136,28986	0,64748	12 $\pm$ 2,1
2400	136,23127	0,70607	9,4 $\pm$ 2,1
2600	136,16911	0,76823	4,7 $\pm$ 3,3
2800	136,11338	0,82396	1,7 $\pm$ 2,3

Tabulka 6: Lázeň s 0,499 hm. % Sn vzorek č. 1

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	145,17723	0	53,1 $\pm$ 6,3
200	145,09979	0,07744	48,8 $\pm$ 9,5
400	145,04032	0,13691	41,9 $\pm$ 6,6
600	144,98879	0,18844	38,3 $\pm$ 4,7
800	144,92641	0,25082	34,5 $\pm$ 5,2
1000	144,86532	0,31191	30,4 $\pm$ 4,9
1200	144,80315	0,37408	27,9 $\pm$ 4,9
1400	144,73854	0,43869	27,5 $\pm$ 4,5
1600	144,66607	0,51116	22,4 $\pm$ 4,1
1800	144,59791	0,57932	17,7 $\pm$ 5,2
2000	144,53262	0,64461	15,2 $\pm$ 5,6
2200	144,46838	0,70885	11,2 $\pm$ 7,4
2400	144,40518	0,77205	9,8 $\pm$ 5,8
2600	144,3324	0,84483	2,2 $\pm$ 4,1

Vzorek č. 2 byl z hodnocení vyřazen, protože vykazoval výrazně jiné výsledky než ostatní. Důvodem byly příliš opotřebené kotouče, které se vyměnily a následně se změřil náhradní vzorek tj. vzorek č. 4.

Tabulka 7: Lázeň s 0,499 hm. % Sn vzorek č. 3

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	140,87237	0	54,4 $\pm$ 6,3
200	140,79995	0,07242	49,8 $\pm$ 10,5
400	140,74479	0,12758	45,3 $\pm$ 6,1
600	140,69421	0,17816	42,8 $\pm$ 5,1
800	140,63778	0,23459	39,6 $\pm$ 4,7
1000	140,58086	0,29151	35,4 $\pm$ 7,2
1200	140,52196	0,35041	33,8 $\pm$ 3,7
1400	140,45985	0,41252	29,2 $\pm$ 4,8
1600	140,40187	0,4705	26,2 $\pm$ 5
1800	140,34647	0,5259	22,1 $\pm$ 3,6
2000	140,28437	0,588	18,6 $\pm$ 3,4
2200	140,21464	0,65773	14,7 $\pm$ 3,5
2400	140,14199	0,73038	10 $\pm$ 3,6
2600	140,07323	0,79914	6,5 $\pm$ 3,2
2800	140,00388	0,86849	2,7 $\pm$ 3,4

Tabulka 8: Lázeň s 0,499 hm. % Sn vzorek č. 4

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	145,37112	0	54,8 $\pm$ 11,9
200	145,28138	0,08974	49,6 $\pm$ 11,2
400	145,20904	0,16208	44,9 $\pm$ 12,1
600	145,14688	0,22424	39,5 $\pm$ 9,2
800	145,08798	0,28314	35,5 $\pm$ 13,2
1000	145,03375	0,33737	32,2 $\pm$ 10,9
1200	144,97936	0,39176	28,6 $\pm$ 11,9
1400	144,91981	0,45131	25,9 $\pm$ 10,7
1600	144,85918	0,51194	22,3 $\pm$ 10,6
1800	144,79763	0,57349	17,1 $\pm$ 6,7
2000	144,73647	0,63465	14,3 $\pm$ 8,9
2200	144,67608	0,69504	10,2 $\pm$ 9,5
2400	144,61389	0,75723	7,1 $\pm$ 4,6
2600	144,54948	0,82164	1,9 $\pm$ 4,4

Tabulka 9: Lázeň s 1,12 hm. % Sn vzorek č. 1

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	141,30753	0	47,9 $\pm$ 9,2
200	141,23022	0,07731	40,4 $\pm$ 8,4
400	141,17869	0,12884	36,1 $\pm$ 6,5
600	141,13364	0,17389	33,3 $\pm$ 7,1
800	141,09166	0,21587	30,1 $\pm$ 7,6
1000	141,05214	0,25539	28,3 $\pm$ 5
1200	141,01011	0,29742	26,8 $\pm$ 6,4
1400	140,95762	0,34991	23,7 $\pm$ 5,7
1600	140,89945	0,40808	20,5 $\pm$ 6,4
1800	140,83243	0,4751	17,8 $\pm$ 5,1
2000	140,76418	0,54335	14,4 $\pm$ 4,8
2200	140,69964	0,60789	11 $\pm$ 5,2
2400	140,63557	0,67196	8 $\pm$ 4,8
2600	140,56909	0,73844	3,4 $\pm$ 4,7

Tabulka 10: Lázeň s 1,12 hm. % Sn vzorek č. 2

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	143,02334	0	54,5 $\pm$ 9,8
200	142,95608	0,06726	53,5 $\pm$ 10,1
400	142,91121	0,11213	49,6 $\pm$ 9,5
600	142,85087	0,17247	45,4 $\pm$ 10,4
800	142,77247	0,25087	40,4 $\pm$ 9,2
1000	142,69969	0,32365	35,2 $\pm$ 12,9
1200	142,62631	0,39703	28,4 $\pm$ 7,2
1400	142,55737	0,46597	25,8 $\pm$ 8,2
1600	142,46667	0,55667	21,8 $\pm$ 7,2
1800	142,39524	0,6281	19 $\pm$ 8,6
2000	142,33363	0,68971	13,7 $\pm$ 7,1
2200	142,27887	0,74447	10,1 $\pm$ 7,7
2400	142,20799	0,81535	6,6 $\pm$ 5

Tabulka 11: Lázeň s 1,12 hm. % Sn vzorek č. 3

počet cyklů	hmotnost [g]	úbytek hmotnosti [g]	tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]
0	144,13204	0	53,5 $\pm$ 9,1
200	144,05739	0,07465	46,8 $\pm$ 7,4
400	143,98698	0,14506	42,5 $\pm$ 7,6
600	143,91124	0,2208	35,5 $\pm$ 9,1
800	143,83373	0,29831	30 $\pm$ 8
1000	143,75502	0,37702	26,9 $\pm$ 8,6
1200	143,6764	0,45564	24,7 $\pm$ 7,7
1400	143,60141	0,53063	19,9 $\pm$ 4,9
1600	143,52783	0,60421	15 $\pm$ 8,1
1800	143,45439	0,67765	11,1 $\pm$ 6,2
2000	143,38393	0,74811	7,7 $\pm$ 5,8
2200	143,31272	0,81932	3,3 $\pm$ 5

## Příloha D – Fotografie z měření jednotlivých vzorků



Obrázek 1: Lázeň s 0 hm. % Sn vzorek č. 1 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 3000 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 2: Lázeň s 0 hm. % Sn vzorek č. 2 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 3000 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 3: Lázeň s 0 hm. % Sn vzorek č. 3 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 3000 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku





Obrázek 4: Lázeň s 0,068 hm. % Sn vzorek č. 1 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2800 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 5: Lázeň s 0,068 hm. % Sn vzorek č. 2 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2800 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 6: Lázeň s 0,499 hm. % Sn vzorek č. 1 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2600 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku

Vzorek č. 2 byl z hodnocení vyřazen, protože vykazoval výrazně jiné výsledky než ostatní. Důvodem byly příliš opotřeбенé kotouče, které se vyměnily a následně se změřil náhradní vzorek tj. vzorek č. 4.





Obrázek 7: Lázeň s 0,499 hm. % Sn vzorek č. 3 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2800 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 8: Lázeň s 0,499 hm. % Sn vzorek č. 4 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2600 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 9: Lázeň s 1,12 hm. % Sn vzorek č. 1 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2600 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 10: Lázeň s 1,12 hm. % Sn vzorek č. 2 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2400 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku



Obrázek 11: Lázeň s 1,12 hm. % Sn vzorek č. 3 (zleva) před testem, po 1600 cyklech, po 2200 cyklech s označenými místy bez zinkového povlaku