

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Delaminace povlaků žárového zinku

AUTOR: Bc. David Čepek

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čepek** Jméno: **David** Osobní číslo: **457648**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Delaminace povlaků žárového zinku

Název diplomové práce anglicky:

Delamination of hot dip galvanized coatings

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor problematiky žárového zinkování
- Delaminace povlaku žárového zinku
- Vliv teploty chlazení na přilnavost
- Stanovení koeficientu tepelné roztažnosti slitinového povlaku zinku

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering ISBN: 978-0-87170-384-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Kudláček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Delaminace povlaků žárového zinku“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:.....

.....
Bc. David Čepěk

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D. za vedení, cenné rady a připomínky při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vlastimilovi Kuklíkovi, Ph.D. za poskytnutí materiálu pro experimentální část a za cenné rady při vypracování experimentální části.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Obor:	Výrobní inženýrství	
Název diplomové práce:	Delaminace povlaků žárového zinku	
Autor diplomové práce:	Bc. David Čepek	
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.	
Rozsah diplomové práce:	Počet stran:	57
	Počet obrázků:	43
	Počet grafů:	4
	Počet tabulek:	20

Anotace

V teoretické části diplomové práce se pojednává všeobecně o problematice koroze, koroze zinkových povlaků, problematice žárového zinkování a procesu tvorby zinkových povlaků a jejich struktuře. Dále je popsána problematika delaminace povlaků žárového zinku a vliv teploty chlazení na přilnavost zinkových povlaků.

V experimentální části byly zkoumány vzorky železo-zinkové slitiny a zjištěn její koeficient teplotní roztažnosti. Poté proběhlo porovnání vzorků se zinkovým povlakem naneseným technologií žárového zinkování s odstředěním a vliv ochlazování na vznik delaminace povlaku žárového zinku.

Klíčová slova:

Koroze, koroze zinkových povlaků, struktura povlaku žárového zinku, delaminace povlaků žárového zinku

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Field of study:	Manufacturing technology		
Master thesis:	Delamination of hot dip galvanized coatings		
Author of the master thesis:	Bc. David Čepek		
Thesis supervisor:	Ing. Jan Kudláček, Ph.D.		
Extent of bachelor thesis:	Number of pages:	57	
	Number of pictures:	43	
	Number of graphs:	4	
	Number of tables:	20	

Annotation

In the theoretical part of the master thesis, it is discussed in general about the corrosion, corrosion of zinc coating, the issue of hot dip galvanizing and the process of forming zinc coatings and their structure. Next part is about the problem of hot dip zinc coatings and the effect of cooling temperature on the adhesion of zinc coating and delamination.

In the experimental part, iron.zinc alloy samples were examined and its coefficient of thermal expansion was determined. After that, a comparison of samples with zinc coating by hot dip galvanizing with centrifugation and effect of cooling on the formation of delamination of the hot dip zinc coating.

Key words:

Corrosion, corrosion of zinc coatings, structure of hot-dip zinc coating, delamination of hot-dip zinc coatings

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Zinek a jeho korozní odolnost	11
2.1	Primární dělení koroze	11
2.2	Zinek	14
2.3	Koroze zinkových povlaků	16
2.3.1	Koroze v atmosféře	19
2.3.2	Koroze ve vodě	20
2.3.3	Koroze v půdě.....	21
3	Technologie žárového zinkování ponorem.....	22
3.1	Předúpravy povrchu pro žárové zinkování	22
3.1.1	Odmašťování.....	23
3.1.2	Moření.....	25
3.2	Žárové zinkování ponorem	28
3.2.1	Suchý proces	29
3.2.2	Mokrý proces	30
3.2.3	Kontinuální zinkování.....	30
3.2.4	Zinkování s odstředěním.....	31
3.3	Tvorba povlaku žárového zinku.....	32
3.3.1	Soustava železo - zinek.....	32
3.3.2	Nízkoteplotní zinkování.....	36
3.3.3	Vysokoteplotní zinkování	38
3.3.4	Vliv chemického složení oceli	39
4	Delaminace povlaku žárového zinku.....	40
4.1	Vliv teploty chlazení na přílnavost.....	40
4.2	Druhy delaminace povlaku žárového zinku.....	41
4.2.1	Vysoký obsah křemíku	41

4.2.2	Oblast křemíku v Sandelinově oblasti	42
4.2.3	Kontaminovaný povrch oceli	43
4.2.4	Primární delaminace	43
4.2.5	Delaminace na hranách pálených řezů	45
4.2.6	Souvislá vrstva hematitu	45
4.2.7	Puchýře v zinkových povlacích	46
5	Experimentální část	47
5.1	Příprava vzorků	47
5.1.1	Dělení vzorků na kotoučovém řezacím stroji	49
5.1.2	Frézování rovnoběžných ploch	49
5.2	Měření teplotní roztažnosti železo-zinkové slitiny	51
5.2.1	Rozměry vzorků před začátkem měření	51
5.2.2	Měření teplotní roztažnosti v žíhací peci	52
5.2.3	Rozměry vzorků při teplotě 150 °C	53
5.2.4	Rozměry vzorků při teplotě 350 °C	53
5.2.5	Rozměry vzorků při teplotě 550 °C	54
5.2.6	Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti jednotlivých vzorků	54
5.2.7	Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti slitiny FeZn ₁₃	58
5.2.8	Celkové prodloužení vzorků na konci experimentu	59
5.3	Vliv teploty chladnutí na přílnavost při vysokoteplotním zinkování	60
5.3.1	Metalografie - vzorek G	61
5.3.2	Metalografie - vzorek H	62
5.4	Diskuse výsledků experimentální části	63
6	Závěr	65
7	Citovaná literatura	67
8	Seznam obrázků	72
9	Seznam tabulek	74

10	Seznam grafů	75
----	--------------------	----

1 Úvod

V dnešní době je stále více dbáno na co nejdélší životnost výrobků z kovových materiálů. Kvůli této podmínce jsou výrobní společnosti nuceny investovat značné finanční prostředky do ochranných opatření svých produktů. Z nejdůležitějších technologií zajišťující dlouhou životnost výrobků z kovových materiálů jsou povrchové úpravy. Jednou z nejpoužívanějších a ekonomicky velmi přijatelných technologií je povrchová úprava s použitím zinku. Na světě je zinek obsažen ve velkém množství, a proto je jeho využití ve strojírenství velmi vhodné. Zinek je nedílnou součástí v mnoha konstrukcích po celém světě. Jeho nanášení na kovový povrch nabízí mnoho technologických postupů. Zinkový povlak může být nanášen na kovový substrát žárovým zinkováním ponorem, žárovým nástřikem, elektrolyticky, mechanicko-chemicky nebo sherardováním.

Počátky využití zinku jako ochrany železných kovů se datuje již do roku 1742, kdy francouzský lékař a chemik Paul Jacques Malouin objevil, že zinek dokáže velmi dobře chránit železné povrchy před korozi, když se předměty ponoří do lázně roztaveného zinku. K tomuto objevu přispěl v roce 1799 italský fyzik Alessandro Volta svým objevem katodické ochrany železa pomocí galvanického článku. Toto pojmenování odvodil od jména Luigie Galvaniho, italského lékaře, který zkoumal účinky elektrického proudu. Princip katodické ochrany potvrdil anglický chemik a fyzik Michael Faraday v roce 1829, pokusem se zinkovými a železnými hřebíky ponořenými ve slané vodě. Po několika letech testování přispěl svými poznatky francouzský chemik Stanislas Sorel, který před nanesením zinkového povlaku použil chlorid amonný jako tavidlo. Tento postup nazval galvanizací a dne 10. května 1837 podal patent na galvanickou ochranu železa proti korozi. Po roce 1840 vznikají první dílny, které průmyslově nanášejí zinek na železné předměty. [1]



Obrázek 1. Zleva Paul J. Malouin, A. Volta, L. Galvani [2; 3]

2 Zinek a jeho korozní odolnost

Zinek má schopnost velmi účinně a dlouhodobě poskytovat součástem ze železných kovů protikorozní ochranu. Způsob, kterým zinek chrání ocelové konstrukce před korozí je dán jeho fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Zinek se ve většině korozních prostředí vyznačuje nižším elektronovým potenciálem, než má železo. Pokud je mezi zinkem a železem zajištěno elektricky vodivé spojení, vzniká galvanický člunek Fe - Zn, ve kterém je zinek katodou. Přednostně dochází ke koroznímu úbytku zinku a tím železo přechází do stavu imunity a nekoroduje. Právě díky těmto vlastnostem se zinek v dnešní době využívá jako ochrana ocelových konstrukcí proti korozi. [4]

2.1 Primární dělení koroze

Dle normy ČSN EN ISO 8044 je koroze kovů definována jako fyzikálně-chemická interakce kovu a prostředí vedoucí k nevratným změnám vlastností kovu, které mohou vyvolávat významné zhoršení funkce kovu, a tím i celého systému. Proces koroze je způsobován tím, že korozní soustava prostředí a materiál přecházejí do pravděpodobnějšího stavu s menší volnou entalpií. Rychlost korozních dějů má přímou závislost na mnoha faktorech, mezi které patří klimatické podmínky, relativní vlhkost prostředí, srážky, atmosférický tlak a proudění vzduchu, teplota, znečištění ovzduší a salinita. Korozí podléhají kovy a jejich slitiny ale i organické a anorganické materiály jako jsou např. sklo, beton, plasty, guma a další. Výjimku tvoří vzácné kovy, které korozi nepodléhají. Degradace materiálu může mít různou formu, od nežádoucí změny vzhledu (ztráta barvy, lesku) až po úplné narušení celistvosti materiálu. Škody vzniklé na korodujícím prostředí se nazývají primární škody, další škody, které jsou důsledkem primární koroze jsou škody sekundární. Mezi tyto škody patří takové, které představují pro jednotlivce nebo společnost největší náklady. [5; 6]

Primární rozdělení koroze záleží na mechanismu korozních dějů, které mohou být chemické či elektrochemické.

Chemická koroze se vyskytuje v elektricky nevodivém prostředí, bez vzniku elektrochemického člunku. Chemické reakce vznikají pouze mezi materiálem a korozním prostředím. Nejčastěji dochází k oxidaci kovu v plynném prostředí s redukční nebo oxidační povahou za působení vysokých teplot a vznikají tak korozní produkty. Vzniklé korozní produkty u ocelí jsou takzvané okuje. U neželezných kovů vzniká tenká

vrstva oxidů, např. zelená patina u mědi nebo oxidační vrstva u hliníku apod., které zamezují průniku koroze do hloubky materiálu. [7]

Elektrochemická koroze zahrnuje případy koroze kovů v elektrolytu, tedy v prostředí elektricky vodivém. Dochází zde ke vzniku elektrochemického článku a korozní produkty vznikají při styku kovu s elektrolytem. Elektrolytem mohou být roztoky kyselin, zásad a solí. Korozní reakce se dělí na dvě dílčí reakce. Jedná se o reakci katodickou a anodickou. U katodické reakce dochází k redukci složek korozního prostředí spotřebováním elektronů (vybíjením iontů vodíku nebo redukcí kyslíku rozpuštěného v elektrolytu). Při anodické reakci dochází k oxidaci kovů a následné korozi materiálu. Obě reakce jsou na sebe vázány a nemohou probíhat samostatně. To znamená, že uvolněné elektrony z anodické reakce jsou spotřebovány redukční reakcí. [7]

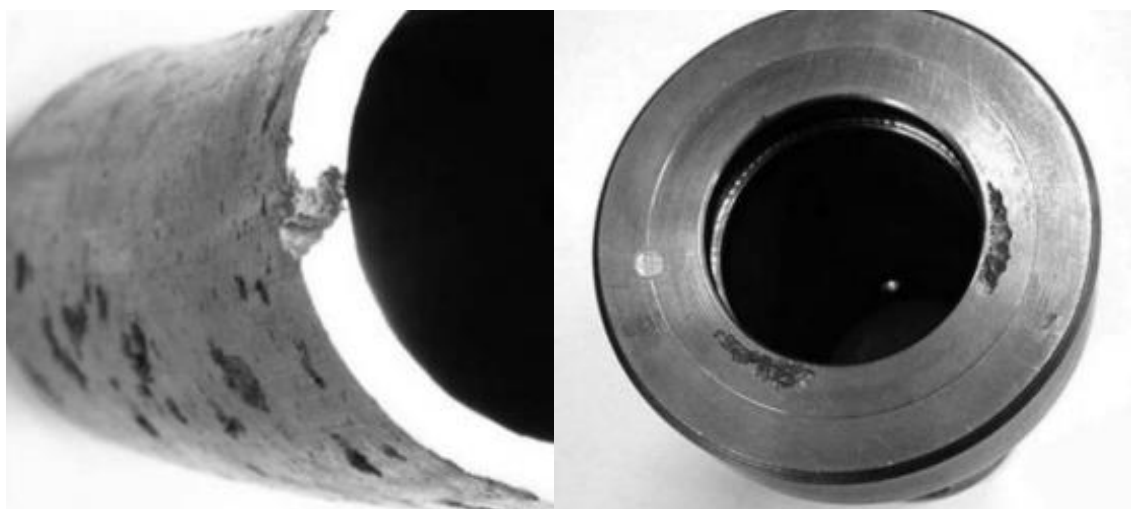
Koroze se dále dělí podle druhu napadení materiálu. Nejčastější druh napadení je rovnoměrná koroze, při které probíhá úbytek materiálu rovnoměrně po celém povrchu. Postup rovnoměrné koroze je velmi snadno kontrolovatelný a předvídatelný, díky tomu lze určit rychlost úbytku materiálu a konstruovat tak zařízení s ohledem na korozní rychlost. Vyskytují-li se v korozním systému různorodosti, a to buď v korozním prostředí nebo v materiálu, probíhá koroze nerovnoměrně. Na rozdíl od rovnoměrné koroze se výskyt napadení předpovídá hůře a k selhání výrobku dochází v kratší době. Tento druh napadení je nebezpečnější, protože nemusí být na první pohled viditelný, jelikož napadá materiál jen v určitém místě. [8]

Bodová a důlková koroze nejčastěji napadá snadno pasivovatelné materiály jako jsou například korozivzdorné oceli, železo, hliník, chrom a další. Při lokálním porušení zapasivovaného povrchu dochází k bodovému napadení, při němž vznikají různě hluboké důlky s velmi úzkým hrdlem a okolní povrch se zdá neporušený. Jedná se o velmi nebezpečný druh korozního napadení, jelikož může docházet k proděravění relativně tlustých stěn a k znehodnocení celého zařízení.

V místech, kde vznikají dutiny nebo štěrbiny vzniká takzvaná **štěrbinová koroze**. V polouzavřených místech mezi kovovým povrchem a dalším povrchem, ať už kovovým či nekovovým, ve kterých se vyskytuje malé množství elektrolytu, dochází k anodovému rozpouštění a následné korozi. Tato forma napadení vzniká především u závitových spojů, nýtovaných spojů, ve svarových pórech nebo v trhlinách materiálu. Štěrbinová koroze se týká především kovů, které vytvářejí pasivační vrstvu. [9]

Mezikrystalová koroze vzniká u vysokolegovaných austenitických korozivzdorných ocelí a niklových slitin po tepelném zpracování nebo svařování. Za vyšších teplot vznikají na hranicích zrn místa ochuzena o chrom. Když klesne obsah chromu pod 12 %, tak materiál ztrácí schopnost pasivace a začíná korodovat. Za snížený obsah chromu může precipitace karbidů s vysokým obsahem chromu a nastane stav zcitlivění. Narušená zrna ztrácí soudržnost a materiálu klesá mechanická pevnost, při čemž nemusí docházet k viditelné změně. Zcitlivění lze zpětně odstranit rozpouštěcím žiháním při teplotách okolo 1050 °C. Podobné vlastnosti má i **transkrystalická koroze**, která kromě napadení hranic zrn, napadá i vlastní zrna. [10]

Pokud dochází k odstranění jedné složky slitiny, jedná se o **selektivní korozi**. Představitelem tohoto druhu korozního napadení je odzinkování mosazí, kdy dochází ke změně původního materiálu slitiny mědi na houbovitou měď. K tomu dochází buď v celé vrstvě na povrchu nebo lokálně. Vzniklá houbovitá měď nedisponuje žádnou pevností a dochází k protržení stěny. K odzinkování jsou náchylné všechny mosazi obsahující zinek nad 15 %. Mechanismus odzinkování je založen na rozpuštění slitiny mědi a zinku a následném vyloučení mědi na povrch. Tento proces nastává pouze v případě, že se v korozním prostředí vyskytují chloridy. K zabránění selektivní koroze u mosazí se doporučuje použít červené mosazi, které obsahují méně jak 15 % zinku. [8]



Obrázek 2. Vlevo: Bodová koroze, Vpravo: Štěrbinová koroze [9]

2.2 Zinek

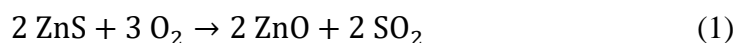
Zinek je prvek, který patří do dvanácté skupiny periodické soustavy prvků společně s kadmíem, rtuťí a koperniciem. Označuje se jako Zn a jeho latinský název je Zincum. Čistý zinek byl nejpravděpodobněji poprvé připraven ve 13. století v Indii redukcí oxidu zinečnatého dřevěným uhlím za vysokých teplot bez přístupu vzduchu. Odtud se znalost výroby přenesla do Číny, kde se v období dynastie Ming používal k výrobě mincí. V Evropě nebyla výroba zinku známa, a tak se z Číny čistý zinek dovážel až do 16. století, Zinek je amfoterní neušlechtilý kov se stříbřitě modrobílou barvou a výrazným leskem. Vlivem okolní atmosféry zinek oxiduje a tím ztrácí svůj lesk. Krystalizuje v hexagonální soustavě s nejtěsnějším uspořádáním a výraznou anizotropií. Má velmi malou tvrdost a pevnost. Za běžných teplot je zinek houževnatý, při zvýšených teplotách (100 °C) je velmi dobře tvárný, využívá se například pro tažení drátu nebo válcování plechů. Při nízkých teplotách je zinek křehký. Další vlastnosti zinku jsou znázorněny v následující tabulce č. 1. [11]

Tabulka 1. Přehled vlastností zinku [12]

Vlastnosti zinku		
Chemická značka	Zn	
Atomové číslo	30	
Atomová hmotnost	65,39	
Charakteristická skupina	Přechodné kovy	
Barevný odstín	Stříbřitě modrobílý, lesklý	
Krystalická struktura	Hexagonální, s nejtěsnějším uspořádáním	
Hustota ρ_{20}	7 140	[kg.m ⁻³]
Teplota tání t_0	419,5	[°C]
Teplota varu t_1	907	[°C]
Součinitel tepelné roztažnosti α	29.10 ⁻⁶	[K ⁻¹]
Tepelná vodivost λ	109	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Modul pružnosti v krutu G	40.10 ³	[MPa]
Modul pružnosti v tahu E	100.10 ³	[MPa]
Pevnost v tahu σ_t	120	[MPa]
Tažnost A	60	[%]
Tvrdost	72	[HB]
Měrný elektrický odpor ρ	59	[nΩ.m]

V přírodě se zinek vyskytuje pouze ve formě sloučenin ve vysokých koncentracích. Mezi hlavní sloučeniny, které se využívají k jeho výrobě jsou například minerály jako sfalerit (ZnS) a oxid zinečnatý (ZnO). Jedná se o sulfidické a oxidové rudy, ze kterých získáváme čistý zinek pomocí tepelného postupu, oxidačním pražením obohacené rudy v poschod'ových nebo fluidních pecích. Praženec, který obsahuje zinek ve formě oxidu se následně aglomeruje a destiluje nebo se při hydrometalurgických pochodech nejprve loužením převádí do formy sulfátu, z něhož je následně vylučován elektrolyticky. Tyto procesy popisují následující rovnice (1, 2, 3, 4). [13]

Nejčastější způsob výroby zinku je ze sulfidických rud, které se musí převést na oxid zinečnatý, při této reakci vzniká jako vedlejší produkt oxid siřičitý (SO₂), jež se využívá k výrobě kyseliny sírové (H₂SO₄).



Primární zinek se z oxidu dále získá přímou redukcí:

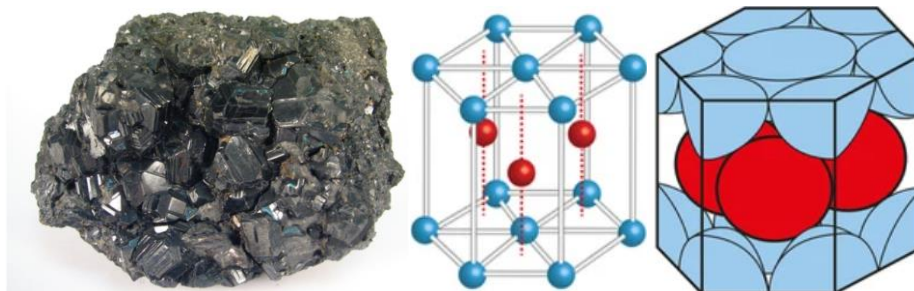


Nebo převedením oxidu na síran elektrolyticky:



Zinek a jeho využití zasahuje do spousty odvětví. Mezi průmyslové využití zinku je nejčastější použití k povrchové úpravě kovů, výrobě pozinkovaných plechů ale i k výrobě tvarově složitých odlitků. Slitiny zinku ke slévání mají výbornou slévatelnost a schopnost pojit se s ostatními kovy. Kovový zinek slouží k laboratorní přípravě vodíku a práškový zinek se používá k likvidaci rozlité rtuti. Značný podíl oxidu zinečnatého (ZnO) se spotřebovává jako plnivo pro výrobu pryží a v dentálním průmyslu je součástí dentálního cementu pro zubní náhrady. Bromid zinečnatý (ZnBr₂) slouží jako elektrolyt v zinkobromidových bateriích, dále jako laboratorní činidlo v organické chemii a vyrábí se z něj roztoky k výplachům ropných vrtů. Chroman zinečnatý (ZnCrO₄), fosforečnan zinečnatý (Zn₃(PO₄)₂) a molybden zinečnatý (ZnMoO₄) slouží jako inhibitory koroze v antikorozních přípravcích. Kromě technického využití se zinek vyskytuje v částech lidského těla (kosti, tkáně, orgány atd.) a živých organismech, kde je nezbytný

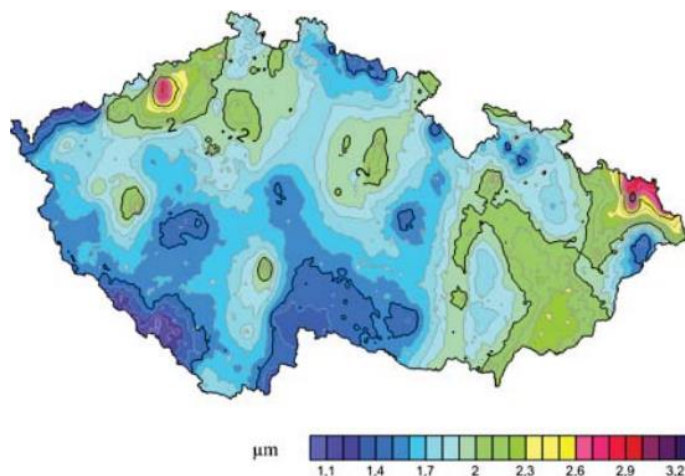
pro správné fungování imunitního systému. Zinek podporuje hojení ran, léčbu zánětů a tvorbu řady hormonů. [11]



Obrázek 3. Vlevo: Zinková ruda sfalerit (ZnS). Vpravo: Hexagonální struktura zinku [14; 15]

2.3 Koroze zinkových povlaků

Od konce 19. století korozní agresivita atmosfér v průmyslově vyspělých zemích rostla se zvyšujícím znečištěním ovzduší. Maxima dosahovala v padesátých a šedesátých letech 20. století. V letech 1985 až 2001 se koncentrace a charakter znečištění ovzduší snížil v důsledku enviromentální politiky a ekologických změn. V první řadě se výrazně snížila koncentrace oxidu siřičitého (SO_2) v ovzduší. Díky tomu došlo ke snížení korozních úbytků zinku o 61 % z průměrných hodnot $13 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ na $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Díky snížení oxidu siřičitého klesla i kyselost atmosférických srážek. Tohoto snížení se dosáhlo odsířením všech velkých a středních stacionárních spalovacích zdrojů. V dnešní době roční průměrné koncentrace oxidu siřičitého v ČR nepřekračují hodnoty $12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a na 80 % území jsou tyto hodnoty pod $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Snížením znečištěním ovzduší se výrazně snížily i korozní rychlosti zinkových povlaků, čímž se prodloužila jejich životnost. Průměrné hodnoty korozních rychlostí zinku jsou znázorněny v tabulce č. 2 a na obrázku č. 4 je znázorněn roční korozní úbytek zinku v ČR. [5; 16]



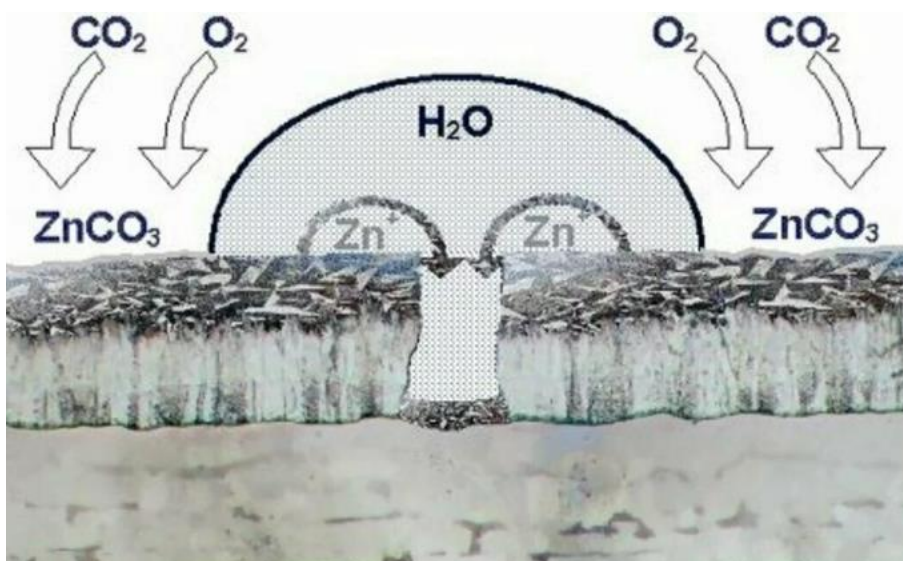
Obrázek 4. Korozní úbytek zinku v ČR [17]

Tabulka 2. Korozní rychlost zinku podle stupně korozní agresivity podle ČSN EN ISO 9223 [18]

Stupeň korozní agresivity			Rychlost koroze (r_{corr})	
			Zinek	Jednotky
C1	Velmi nízká	Dobře větrané interiéry obchodních, kancelářských a bytových prostor bez rizika kondenzace vlhkosti, suché nebo chlazené exteriéry s velmi malým znečištěním ovzduší	$r_{\text{corr}} \leq 0,7$ $r_{\text{corr}} \leq 0,1$	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}]$ $[\mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}]$
C2	Nízká	Větrané sportovní haly, výrobní haly, garáže, skladové prostory s neznečištěným ovzduším a možností krátkodobé kondenzace vlhkosti, suchá nebo chladná klimatická pásma	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 5$ $0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}]$ $[\mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}]$
C3	Střední	Prostředí průmyslových hal se středním znečištěním, potravinářské závody, prádelny, mlékárny, pivovary, mírné klimatické oblasti se středním a tropické oblasti s nízkým znečištěním ovzduší, městské prostředí, přímořské prostředí s nízkou salinitou	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$ $0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}]$ $[\mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}]$
C4	Vysoká	Prostředí s velkou četností kondenzace a velkým znečištěním, kryté plavecké bazény, mírné klimatické oblasti se středním znečištěním ovzduší, průmyslové oblasti se středně vysokým znečištěním ovzduší a přímořské ovzduší se střední salinitou	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$ $2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}]$ $[\mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}]$
C5	Velmi vysoká	Málo větrané prostředí s velmi vysokou četností kondenzace nebo velkým znečištěním z výrobních procesů a dolů, mírné klimatické oblasti s velmi vysokým znečištěním ovzduší, průmyslové oblasti s vysokým znečištěním ovzduší a přímořské ovzduší s vysokou salinitou	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$ $4,2 < r_{\text{corr}} \leq 8,4$	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}]$ $[\mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}]$
CX	Extremní	Prostory s trvalou kondenzací a velkým znečištěním z výrobních procesů, oblasti s velmi vysokým znečištěním ovzduší, prostředí rybářských lodí s přímým postřikem slanou vodou	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$ $8,4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$[\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}]$ $[\mu\text{m}\cdot\text{rok}^{-1}]$

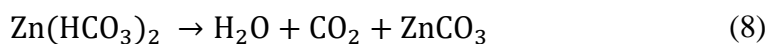
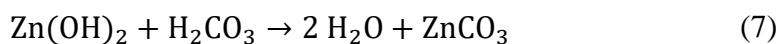
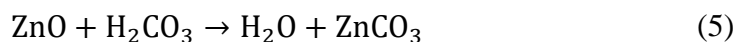
V současné době se používají zinkové povlaky především pro ocelové konstrukce. Ocel má dobré mechanické vlastnosti, ale její velkou nevýhodou je velká korozní rychlost. Právě kombinace zinkových povlaků a ocelových konstrukcí má velký význam pro zvýšení jejich životnosti. Protikorozní ochrana zinkem je velmi účinná technologie a chrání materiál dvojitým způsobem:

- Bariérovým působením – zabraňuje přístup kyslíku a vlhkosti k povrchu oceli
- Katodická ochrana – chrání povrch v místech porušení zinkového povlaku



Obrázek 5. Pasivace a katodická ochrana ocelových konstrukcí [4]

Zinek má velký sklon ke korozi, jelikož se jedná o neušlechtilý kov. Přesto je jeho korozní rychlost ve většině prostředí poměrně nízká. To je způsobeno tím, že se na povrchu zinku vytváří korozní produkty, které chrání zinek proti dalšímu korodování. Chemismus pasivace zinku za vzniku uhličitanu zinečnatého znázorňují rovnice:



Vzniklý uhličitan sodný je šedá, ve vodě nerozpustná látka, která pokrývá podklad souvislé, vysoce přilnavé a dobře chemicky i mechanicky odolné vrstvě patiny. [4; 5]

2.3.1 Koroze v atmosféře

Atmosférická koroze patří mezi nejčastější formu napadení materiálu. Jedná se o elektrochemickou korozi, u které je základním faktorem určujícím rychlost napadení ovlhčení zinkového povrchu. Okamžitě po vyjmutí výrobku ze zinkovací lázně dochází k reakci zinku se vzdušným kyslíkem a vytváří se na povrchu oxid zinečnatý. Za působení atmosférické vlhkosti a oxidu uhličitého ze vzduchu vznikají zásadité uhličitany zinku, které jsou konzistentní a mají velmi dobrou přilnavost k povrchu. Jelikož jsou vytvořené uhličitany málo rozpustné ve vodě, vytváří vynikající ochranu pozinkovaného povrchu. V ovzduší se vyskytuje ale i oxid siřičitý, jenž přetváří zásaditý uhličitán zinečnatý na lépe rozpustný siřičitan zinečnatý nebo síran zinečnatý. Zinkové vrstvy vystaveny delší dobu atmosféře získávají matnou, světle šedou barvu. Koroze zinkových povlaků je dále ovlivňována obsahem soli ve vzduchu v některých přímořských oblastech. V mořském vzduchu se navíc vyskytuje i malé množství hořečnatých solí, které mají pasivační vlastnosti, a tím koroze probíhá pomaleji, než by se očekávalo. Korozní rychlost zinku je ovlivněna více faktory, a proto není jednoduché vytvořit přesný vzorec úbytku zinkového povlaku. [5]

Při korozi zinku může vznikat tzv. **bílá rez**. Jedná se o bílý povlak, který se tvoří na pozinkovaném povrchu tam, kde zůstává dlouho stát kondenzovaná nebo dešťová voda. Dochází k tomu především ve štěrbinách mezi plochami na těsně poskládaném zboží.

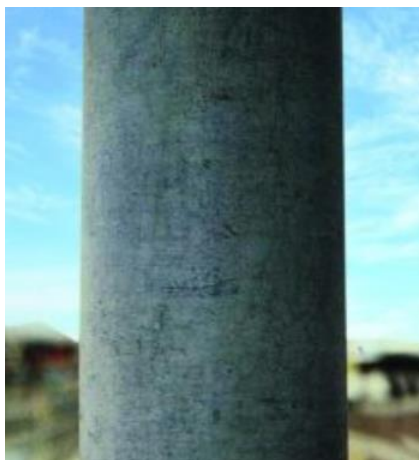


Obrázek 6. Bílá rez [19]

Tyto plochy nemají dobrý přístup ke vzduchu a bílá rez se tvoří rychleji. Napadení bílou rzí končí v momentě, kdy se zajistí volný přístup vzduchu k napadeným plochám a nemá téměř žádný vliv pro ochranu ocelí proti korozi. Působením povětrnostních podmínek

se časem bílá rez odstraní a zinkový povrch získá typický vzhled pro žárový zinek. Pokud se na povrchu stále vyskytují zbytky bílé rzi, lze ji odstranit jemným mechanickým nebo chemickým opracováním. Výjimku tvoří tenké zinkové povlaky vytvořené elektrolytickým zinkováním, kde může bílá rez způsobit zhoršení funkčních vlastností a zmenšení jejich životnosti. Napadení bílou rzí lze zabránit zvolením vhodného skladování pozinkovaných výrobků. Čerstvě pozinkované zboží se doporučuje několik dní uchovávat v zastřešeném prostředí nebo ho uchovávat tak, aby byl v určitém náklonu a byl dosažen přístup vzduchu ze všech stran povrchu. [6; 19]

Je-li zinkový povlak vystaven v korozní atmosféře bez povrchové ochrany, tak si svůj světlý a lesklý vzhled po celou dobu své životnosti nezachová. Po několika měsících na povrchu vzniká **patina zinkového povlaku** důsledkem přirozené pasivace. Na povrchu se vytváří uhličitán zinečnatý, který vznikl přeměnou oxidu zinečnatého, hydroxidu zinečnatého nebo hydrogenuhlíčitanu zinečnatého za působení vzdušného oxidu uhličitého. Uhličitán zinečnatý na povrchu tvoří šedou hmotu nerozpustnou ve vodě a svůj odstín propůjčuje i žárově pozinkovaným konstrukcím. [19]



Obrázek 7. Patina zinkového povlaku [19]

2.3.2 Koroze ve vodě

Elektrochemická koroze vznikající v kapalinách probíhá nejčastěji ve vodě, obsahující chemické látky zásaditého či kyselého charakteru, jenž ovlivňují intenzitu korozního napadení. Rychlost koroze je ovlivněna řadou činitelů vyskytujících se ve vodě. Mezi ně patří například vliv mechanických nečistot, kavitace, vliv mikroorganismů, teplota či rychlost proudění. Největší vliv na korozní rychlost má však obsah kyslíku ve vodě, pH a vodivost dané vody. Při ponoření zinkového povlaku do vody se většinou

vytvoří ochranná vrstva oxidů typická pro zinkové povlaky, avšak ta může mít díky výše zmíněným činitelům různé složení nebo se nevytvoří vůbec. Vody obsahující vysoké množství solí na bázi vápníku a hořčíku nazýváme jako tvrdé vody. Tyto vody jsou málo agresivní, jelikož tvoří s kyselinou uhličitou na povrchu zinku těžce rozpustné uhličitany a vytváří tak stabilní ochrannou vrstvu bránící korozi. U měkkých vod bez obsahu solí se ochranná vrstva nevytvoří a může docházet k bodové korozi v důsledku změny polarity mezi zinkem a ocelí. Vznikne korozní článek a ocel se chová jako obětující se elektroda. V mořské vodě, díky velkému obsahu chloridů k tomuto jevu nedochází. Dalším důležitým parametrem při průběhu koroze ve vodách je teplota. Zinkové povlaky při překročení teploty cca 55 °C mají hrubozrnnou oxidovou ochrannou vrstvu, která má malou přilnavost k zinkovému povrchu. Vzniklé korozní produkty lehce odpadávají a odhalují nový, čistý povrch zinku náchylný k dalšímu napadení. Maximální korozní rychlosti se dosahuje u teplot cca 70 °C a s rostoucí teplotou rychlost klesá, takže při 100 °C probíhá stejně rychle jako při 55 °C. [19]

2.3.3 Koroze v půdě

Korozní podmínky v půdě jsou velmi komplikované, rozdíly ve složení půdy mohou být i v těsné blízkosti značně rozdílné. Korozní agresivita půdy je ovlivněna jejím typem, homogenitou, soudržností, pH, chemickým složením půdního elektrolytu, přítomných solí, směsí organických látek a mikroorganismů. Půda má podle své struktury různé stupně propustnosti vzduchu a vlhkosti. Normálně je obsah kyslíku v půdě nižší než ve vzduchu, zatímco obsah oxidu uhličitého je výrazně vyšší. Půda obsahuje 15 – 35 % vody, jejíž obsah se mění v souvislosti se změnou meteorologických podmínek. Půdní voda je tvořena dešťovou i prosakující spodní vodou. Dále závisí na charakteru konkrétní půdy. Především na její schopnosti zadržovat vodu, sklonu k vysychání či k převlhčení a pórovitosti. Pro vznik koroze v půdě je nezbytná přítomnost půdního elektrolytu. V následující tabulce je znázorněna korozní agresivita různých typů půdy. [19]

Tabulka 3. Agresivita korozního prostředí v půdách [19]

Druh půdy	Agresivita
Vápencová, vápencový slín, morénová, pískovcový slín	Malá
Písčítá, šterkovitá	Střední
Jílovitá, rašelinitá, slatinná, bohatá na humus	Velká

3 Technologie žárového zinkování ponorem

Zinek se díky svým vlastnostem velmi dobře osvědčil v povrchových úpravách jako povlakový materiál. Vytvořený povlak chrání železné kovy před korozním napadením a zvyšuje tak životnost celého systému. Mezi hlavní výhody zinkování patří:

- Nízké vstupní náklady a nízké náklady na opravu
- Dlouhá životnost a vynikající korozní odolnost
- Kvalita povlaku je nezávislá na okolním prostředí
- Vznik kvalitního a rovnoměrného povlaku i na obtížně dostupných místech
- Dobrá odolnost zinkového povlaku proti mechanickému opotřebení
- Při vzniku malých poškození chrání zinek podkladový materiál katodicky

Mezi nevýhody zinkování se řadí:

- Zinkování vyžaduje speciální zařízení
- Rozměry konstrukcí jsou omezeny velikostí zinkovací lázně
- Barvu zinkovaného povlaku lze měnit jedině nátěrem
- Riziko deformace tenkých součástí vlivem vysoké teploty zinkovací lázně

Při použití duplexních systémů, což je pozinkovaný povrch s chemickou předúpravou a nátěrovou hmotou prodlužuje životnost konstrukcí až o desítky let. Pomocí zinkování lze upravovat široký sortiment výrobků jako jsou ocelové konstrukce, plechy, dráty, pletiva, trubky, armatury a spojovací materiál. Zinkování může probíhat ručně nebo kontinuálním způsobem, pokud se materiál pokovuje z více jak 85 % svého obsahu, pak se jedná o ponorové zinkování. [20; 21]

3.1 Předúpravy povrchu pro žárové zinkování

Aby povrchová úprava splňovala všechny požadavky, je důležité upravovaný povrch řádně vyčistit. Kvalitní příprava povrchu je nezbytným předpokladem celého technologického postupu. Čistý povrch zajistí potřebnou přilnavost a dlouhou životnost povrchových úprav. Volba předúpravy povrchu záleží na vlastnostech nečistot vyskytujících se na povrchu. Absolutně čistý povrch neexistuje a vždy se na něm vyskytují nějaké nečistoty, které se rozdělují do dvou skupin podle toho, jak se na povrch dostaly a jak na něm lpí. [20]

Nečistoty na povrchu součástí se dělí následovně:

- **Vlastní nečistoty** vznikají na povrchu elektrochemickou reakcí základního materiálu s okolním prostředím a lpí na povrchu chemickou vazbou. Jsou to korozní produkty vzniklé při výrobě nebo při teplem zpracování. Nejznámějším typem vlastních nečistot jsou okuje a rez. K odstranění vlastních nečistot se používají mechanické předúpravy (kartáčování, broušení, omílání, otryskání) nebo chemické procesy (moření).
- **Ulpělé nečistoty** jsou cizorodé látky, které se na povrch dostaly v průběhu výroby nebo vlivem okolního prostředí. Nečistoty jsou vázány na povrch pouze adhezními silami a jedná se např. o kovové nečistoty, zbytky mastných látek, emulzí, řezných kapalin, brusiv nebo leštících prostředků. K odstranění těchto nečistot se používá proces odmašťování. [8]

3.1.1 Odmašťování

Odmašťováním lze z povrchu odstranit všechny druhy ulpělých nečistot, které jsou vázány na povrchu pomocí adhezních sil (anorganické nečistoty, prach, kovové třísky), nebo fyzikální adsorpcí (mastné látky, tuky, oleje). Použitím odmašťovacích prostředků dojde k převedení nečistot do roztoku nebo emulze a zabrání tak zpětnému usazení na povrch. U žárového zinkování ocelí hraje odmašťování důležitou roli nejenom kvůli odstranění nečistot ale i kvůli smáčivosti povrchu. Pokud by se na povrchu vyskytovala mastnota, povrch není dostatečně smáčivý a tím by vznikala nepokovená místa. Procesy odmašťování dělíme do více skupin podle použitého prostředku [8]:

- Odmašťování v alkalických roztocích
- Odmašťování v organických roztocích
- Emulzní odmašťování
- Tenzidové odmašťování

Podle způsobu aplikace (styk povrchu s rozpouštědly):

- Odmašťování ponorem
- Odmašťování postřikem
- Odmašťování v parách
- Odmašťování elektrolytické
- Odmašťování ultrazvukem

3.1.1.1 Odmašťování v alkalických roztocích

Proces odmašťování pomocí alkalických vodných roztoků je velmi jednoduchý s vysokým účinkem čištění povrchu. Provádí se ponořením výrobku do odmašťovací lázně s vodným roztokem alkalického odmašťovacího prostředku. Pracovní teplota lázně musí být v rozmezí 60 – 85 °C aby se dosáhla dostatečná účinnost. Proces odmašťování je založen na koloidních chemických pochodech, tedy v emulgaci a dispergaci nečistot různého druhu. Dochází ke zmydelnění mastných nečistot a zabraňuje se jejich depozici zpět na povrch a odstraňují se i heteropolární nečistoty, které jsou ve vodě rozpustné. Alkalické roztoky obsahují převážně hydroxid sodný (louh), fosforečnany, uhličitany, křemičitany či emulgátory. Ke zvýšení kvality procesu se mohou do roztoků přidávat tenzidy. To jsou povrchově aktivní látky, které snižují pracovní teploty a urychlují tím celý proces čištění. Přidané tenzidy umožňují odmašťovat v kyselém a slabě alkalickém až skoro neutrálním prostředí. Při používání odmašťovací lázně postupně roste množství emulgovaného tuku a dochází k přesycení, lázeň přestává být účinná a je potřeba ji vyměnit. [8; 20]

3.1.1.2 Odmašťování v organických rozpouštědlech

Odmašťování pomocí organických rozpouštědel se řadí mezi nejjednodušší procesy odmašťování, které dosahuje vysoké čistící mohutnosti při poměrně jednoduchém procesu. Z důvodu vysoké hořlavosti a výbušnosti některých rozpouštědel je jejich použití ve výrobě omezené kvůli bezpečnosti. Další nevýhodou je, že se nedají použít na vlhké povrchy, nelze odstranit heteropolární nečistoty jako pot a anorganické soli a likvidace anorganických rozpouštědel je obtížná a ekonomicky náročná. Organická rozpouštědla se dělí na hořlavá a nehořlavá.

Mezi hořlavé látky pro odmašťování patří petrolej a benzin. Petrolej se používá k odstranění silných vrstev nečistot mastné povahy. Při použití petroleje zůstává povrch lehce mastný a pro úplné odmaštění je potřeba zvolit dodatečnou operaci čištění, proto se využívá jen zřídka např. při čištění velmi znečištěných povrchů, u kterých by klasické odmaštění nedokázalo povrch dostatečně vyčistit.

Rozpouštědla z řady chlorovaných uhlovodíků jako je trichlorethylen a perchlorethylen se řadí mezi nehořlavá rozpouštědla a mají vynikající rozpouštěcí schopnost tuků a olejů. Nenapadají povrch kovu a jsou poměrně stálá. Jejich nevýhodou jsou narkotizační účinky a možnost rozkladu za tepla nebo na světlo. Rozkladem vzniká chlorovodík, v některých

případech i jedovatý fosgen. Látky vzniklé rozkladem způsobují následnou korozi povrchu. Po znečištění rozpouštědel mastnými nečistotami je lze jednoduše regenerovat oddělením vody a destilací. [8]

3.1.1.3 Kyselé odmašťování

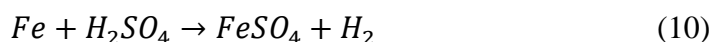
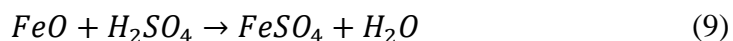
Dříve používané odmašťování v alkalických roztocích před žárovým zinkováním se v dnešní době nahrazuje za odmašťování kyselé. Tato technologie vnáší do procesu nanášení zinkových povlaků žárovým způsobem mnoho výhod:

- Zkrácení technologického postupu čištění (není nutný oplach před mořením)
- Odstranění přenosu alkálií do mořicí lázně a snížení spotřeby mořících kyselin
- Snížení množství odpadních vod a nákladů na neutralizaci
- Úspora zastavěné plochy a investičních nákladů v zinkovnách

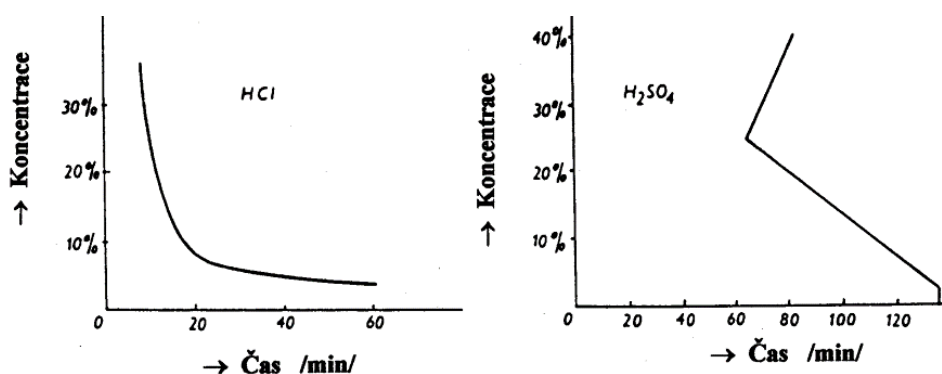
Používané přípravky pro odmašťování obsahují tenzidy a využívají účinků kyseliny fosforečné s kyselinou dusičnou, sírovou nebo chlorovodíkovou. Největší výhoda kyselých lázní spočívá v tom, že proces moření probíhá již v odmašťovací lázni. Další výhodou je, že přítomné tuky v lázni se nerozpouštějí, ale vysrážejí se ve formě sedimentu a usazují se na dně vany. Odsud je lze po odčerpání lázně lehce vybrat a původní odmašťovací roztok, jehož životnost je prakticky neomezená, se napustí zpět do lázně. Kyselé odmašťovací přípravky pracují při teplotě okolí, čímž se snižují náklady na zahřívání lázní na pracovní teplotu. Jejich nevýhodou je, že ve srovnání s alkalickými přípravky mohou dosahovat nižší účinnosti čištění. [4; 23]

3.1.2 Moření

Odstraňování korozních produktů z povrchu kovů chemickým nebo elektrochemickým způsobem se nazývá moření. Proces probíhá za přítomnosti kyselin nebo kyselých solí. Mořením se odstraňují korozní produkty (okuje) vzniklé při ohřevu ke tváření za tepla nebo tepelným zpracováním i rzi, vzniklé působením okolní atmosféry. Jedním z nejpoužívanějších přípravků pro moření je kyselina sírová (H_2SO_4), díky její nízké ceně a malé spotřebě. Kyselina sírová se dostává skrz trhliny a póry do vrstvy okují a dochází k rozpouštění oxidu železnatého (FeO) a kovového povrchu dle následujících rovnic:



Spodní vrstva okují se rozpouští a vzniklé oxidy z povrchu odpadávají za současného působení vznikajícího vodíku. Nejpodstatnější vliv na účinnost moření má koncentrace a teplota lázně. Nejvyšších rychlostí moření dosahuje kyselina sírová s koncentrací 25 %. V dnešní době se využívají mořící lázně o teplotách 40 – 70 °C a koncentrací v rozmezí 10 – 20 %. Doba moření závisí na tloušťce okují a jejich struktuře a za uvedených podmínek je obvykle 10 – 30 minut. [20]



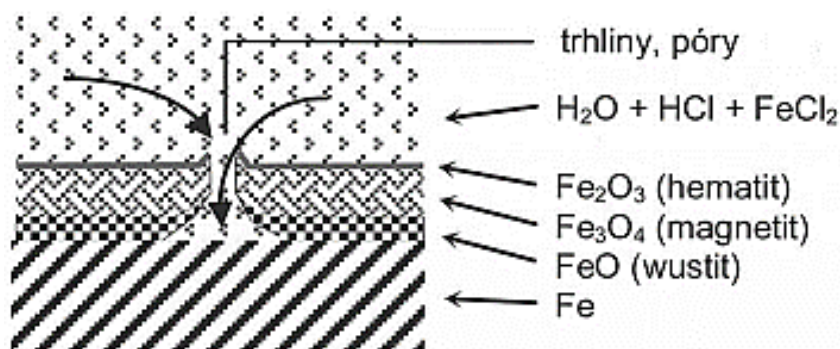
Obrázek 8. Vliv koncentrace lázní HCl a H₂SO₄ na rychlost moření [20]

U žárového zinkování se využívá k moření kyselina chlorovodíková (HCl), která rozpouští okuje převážně chemicky a jen malé množství odpadá mechanickým působením vodíku. Oproti kyselině sírové, která okuje nerozpouští a tvoří kal je spotřeba kyseliny chlorovodíkové mnohem větší. Nicméně tolik nenapadá povrch oceli a zvyšuje rychlost moření při menších koncentracích. Používá se maximálně 12% kyselina chlorovodíková a maximální hodnota by se neměla překračovat z důvodu exhalace chlorovodíku. Díky nižším koncentracím pracuje mořící lázeň účinně za teplot okolí bez nutnosti ohřevu. Pro zvýšení účinnosti procesu moření se lázeň zakládá s určitým podílem chloridu železnatého, jenž napomáhá k lepší rozpustnosti okují pokrývajících povrch zinkovaných dílů. Při používání lázně dochází k nárůstu obsahu železa a tím klesá obsah volné kyseliny chlorovodíkové. Pro dodržení optimálních časů moření je důležité obsah obou složek udržovat ve vhodném vzájemném poměru. V okujích se vyskytují tři základní vrstvy oxidů železa a jejich podíly mohou být ve vrstvě okují různé. Strukturální a chemické složení okují je znázorněno v následující tabulce. [4; 20]

Tabulka 4. Struktura vrstvy okují na oceli [4]

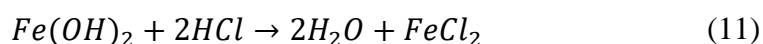
Látka	Substrát	Wustit	Magnetit	Hematit
Složení	Fe	FeO	FeO + Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Rozpustnost	Obtížná	Velmi dobrá	Obtížná	Velmi obtížná

Nejblíže k povrchu ocelového substrátu se nachází vždy wustit, pokud jsou okuje na povrchu oceli tvořeny pouze tímto oxidem, pak postačí k dosažení čistého povrchu relativně krátká doba moření. Okuje s obsahem magnetitu nebo hematitu vyžadují delší mořící časy kvůli jejich obtížné rozpustnosti a mořící roztok musí působit déle než u okujů, tvořených čistě wustitem.

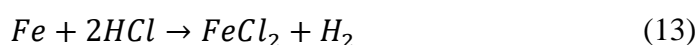


Obrázek 9. Princip moření a složení oxidů v okujích [4]

Okuje se rozpouští primárně ve vrstvě wustitu podle následujících rovnic:



V průběhu moření kyselinou chlorovodíkovou dochází k rozpouštění čistého železa, za vzniku vodíku. Rozpustnost železa v kyselině chlorovodíkové probíhá podle následující rovnice:



Při moření se vyvíjí atomární vodík, jenž je pohlcován ocelí, čímž způsobuje zhoršení přilnavosti nátěrových hmot v duplexních systémech. Duplexní systém je založen na dvojité ochraně materiálu proti korozi. Využívá vlastností zinkových povlaků společně s organickými nátěrovými hmotami. Vrstva zinku chrání ocelový substrát před oxidací, zatímco nátěrový systém brání proti vlhkosti a obecnému poškození pozinkované součásti. Např. při vypalování organické barvy nanesené práškovým lakováním dochází k jejímu slnutí, a vytvoří se nepropustná bariéra, která brání unikání vodíku. Vodík obsažený v oceli rekombinuje v důsledku zvětšování svého objemu a způsobuje vytváření bublinek a kráterků v organickém povlaku. [20]

3.2 Žárové zinkování ponorem

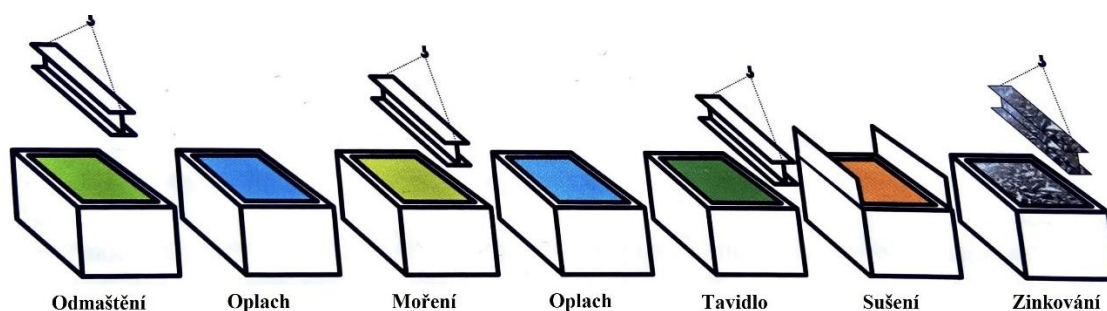
Žárové zinkování patří mezi nejrozšířenější technologie, kterými lze upravit rozmanitý sortiment výrobků. Jedná se o metalurgický proces, při kterém dochází k vytvoření slitinového povlaku žárového zinku na ocelových součástech, jejich ponořením do lázni se zinkovou taveninou. Při ponoření součásti do lázně probíhá soubor složitých difúzních pochodů, metalurgických reakcí a termodynamických přeměn. Vytvořený zinkový povlak má velmi vynikající korozní odolnost. Nejdůležitější podmínkou je, aby pokovovaná součást měla vyšší teplotu tavení než zinek. Zinkování ponorem probíhá při teplotách 440 až 470 °C. Teplota lázně musí být regulována, aby nedošlo k překročení teploty 480 °C protože dochází k vysokému rozpouštění železa, snižuje se životnost vany a v krajních případech může dojít k jejímu proděravění. Za vysokých teplot dochází i k velkým změnám geometrie zinkovaných součástí. Před zinkováním musí být materiál řádně očištěn od rzi, okují a mastnot, které by mohly mít za následek znehodnocení výsledného povlaku. Použité předúpravy před zinkováním jsou chemické odmaštění a moření. Odmaštění zaručí dokonalé smáčení povrchu ocelových konstrukcí v zinkové tavenině. [21; 22; 24]

Nedílnou součástí žárového zinkování je proces nanesení tavidla. To se dělí do dvou způsobů na suchý a mokrý způsob. Tavidlo je tvořeno vodným roztokem chloridu zinečnatého ($ZnCl_2$) a chloridu amonného (NH_4Cl), jenž jsou v lázni v poměru přibližně 3:2. Tavidlo je udržováno při teplotách asi 50 °C. Po nanesení tavidla probíhá sušení, kdy se na povrchu vytvoří ochranný film bránící možné oxidaci ocelových konstrukcí. Při ponoření dílů s tavidlem do zinkovacích lázní o teplotě okolo 450 °C se chlorid amonný rozkládá na čpavek (NH_3) a na chlorovodík (HCl). Chlorovodík rozpouští oxidy zinku a hliníku na hladině zinkové lázně a umožňuje tak přímý kontakt kovově čistého povrchu oceli s roztaveným zinkem. Přítomný chlorid zinečnatý má za úkol snížit povrchové napětí zinku, aktivovat povrch a vyvolat metalurgickou reakci, která probíhá mezi železem a zinkem za vzniku slitinového železo-zinkového povlaku v zinkovací lázni. Železo obsažené v lázni má nepříznivý vliv na produkci tvrdého zinku. Jedná se o odpadní produkt ze zinkování, který se tvoří na úkor čistého zinku. Hmotnost tvrdého zinku se pohybuje v rozmezí 0,2 – 1,5 % z hmotnosti vytvořeného zinkového povlaku. Tavidlo má kyselou reakci a jeho pH je okolo 4,5 a to vede k problému, že při delší době ponoru v lázni dochází k rozpouštění železa v tavidle. Nelze ani vyloučit přenos chloridu železnatého z mořicí lázně do lázně s tavidlem. Tento problém vzniká při nedodržení

správných konstrukčních řešení zinkovaných součástí vyznačující se kapsami, zákoutími nebo nevhodně zvolenými nebo chybějícími drenážemi. Obsah železa je nutno sledovat a udržovat ho na nízkých hodnotách. Pro regeneraci tavidla se využívá převádění dvojmocného železa z chloridu železnatého na trojmocné použitím peroxidu vodíku (H_2O_2). Snížením pH na 2 dojde k hydrolyze za vzniku nerozpustného hydroxidu železitého ($Fe(OH)_3$), který je možný zachytit v kalosisu. Poté se musí pH opět zvýšit na požadovanou hodnotu přidáním čpavkové vody (NH_4OH) nebo oxidu zinečnatého (ZnO). [4]

3.2.1 Suchý proces

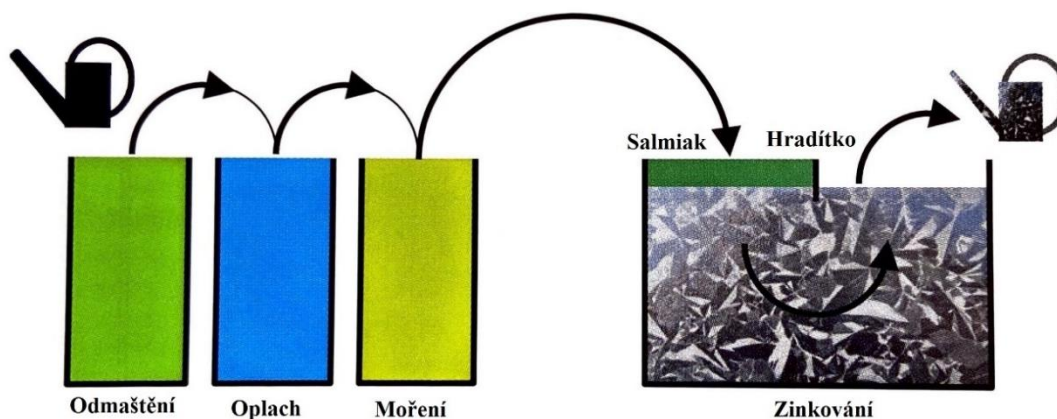
První metodou žárového zinkování je suchý způsob. Proces zinkování spočívá v tom, že po odmaštění, moření a oplachu se celá vsázka ponoří do lázně s tavidlem, poté se suší a po usušení je vsázka ponořena do zinkovací lázně. V zinkovnách využívající suchý proces je manipulace se součástmi určených k pozinkování plně mechanizovaná. Podmínkou je velikost dílů, které nesmí přesáhnout pracovní rozměry van a nosnost manipulačních jednotek v zinkovně. Výhodou suchého procesu je vysoká produktivita při dostatečně vysokém stupni automatizace. Linky pro žárové zinkování mohou mít liniový průběh, uspořádání do písmene U nebo jejich kombinaci. Díly se zavěšují na závěsy a chemicky se upravují. Z důvodu časové náročnosti u moření disponují zinkovny více lázněmi určeným pro chemické předúpravy. Po vyjmutí vsázky ze zinkovací lázně se hotové díly suší buď na vzduchu nebo se pro urychlení procesu používají ochlazovací vodní lázně. Finální operací zinkování je kontrola, která může odhalit případné defekty. [5; 25]



Obrázek 10. Technologický postup žárového zinkování pro suchý proces [4]

3.2.2 Mokrý proces

Na rozdíl od suchého způsobu je zinkování mokrým způsobem méně produktivní, avšak u některých složitých dílů, kdy je nutná ruční manipulace z důvodu jejich geometrie, nelze jiná technologie pokovení použít. U mokrého zinkování neprobíhá nanesení tavidla a jeho vysušení před ponořením do zinkovací lázně. Hladina zinkovací lázně je rozdělena na dvě části pomocí přepážky (hradítka). Tavidlo se tak na ocelové konstrukce nanáší těsně před ponořením do zinkovací lázně. Součást se po odmaštění a moření okamžitě ponoří přes tavidlo přímo do zinkovací lázně. Pokovovaný předmět projde skrz zinkovací lázeň pod hradítkem a vyndává se z části neobsahující tavidlo. Než se součást ze zinkovací lázně vyndá, je potřeba z volné hladiny setřít zbytky nečistot. Nečistoty vznikající v zinkovací lázni jsou především oxidy zinku a popel ze spáleného tavidla. Po vyndání součásti probíhá podobně jako u suchého způsobu sušení ve vodě nebo na vzduchu. Poté následuje kontrola a případně oprava nepokovených míst. Jak bylo výše zmíněno, mokrý proces nedosahuje vysoké produktivity, proto není v dnešní době tolik využíván. Kvality povlaku u mokrého způsobu se dosahuje stejné jako u suchého. Jediným rozdílem obou technologií je způsob nanášení tavidla. [5]



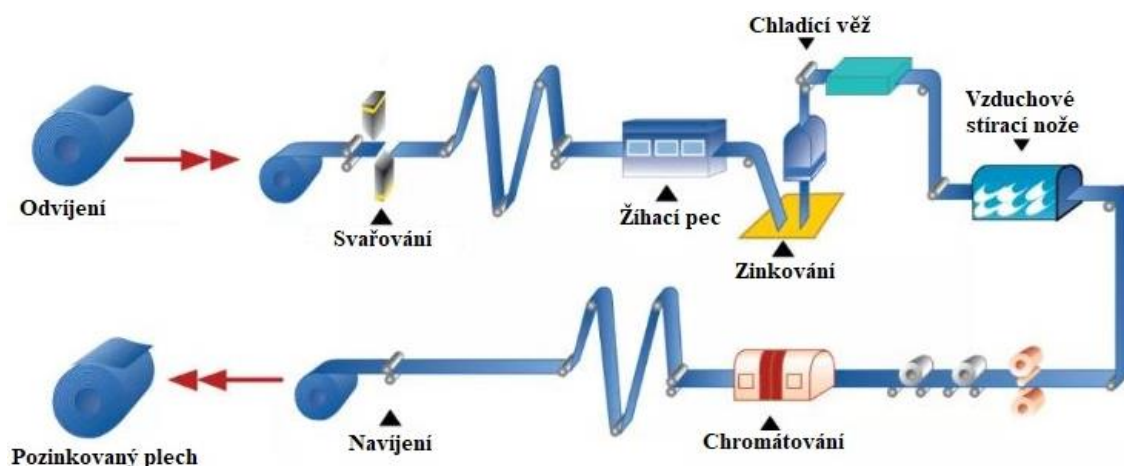
Obrázek 11. Schéma sledu operací u mokrého způsobu zinkování [4]

3.2.3 Kontinuální zinkování

Pro velkosériově vyráběné produkty se využívá technologie kontinuálního zinkování. Tímto způsobem se například chrání velmi tenké ocelové plechy před korozí v automobilovém průmyslu. Proces probíhá v automatických linkách, dosahujících vysoké produktivity a je ekonomicky přijatelný. Jejich výhodou je možnost přesného

nastavení výrobních parametrů. Díky tomu lze sledovat základní parametry povlaku jako je jeho vzhled, struktura a tloušťka. [26]

Nejpoužívanější metodou kontinuálního zinkování je Sendzimirova metoda. Vstupní veličinou je vyválcovaný plech za studena, s čistým povrchem, který je svařován do nekonečného pásu. Plech postupuje do odmašťovací a mořící lázně. Poté je normalizačně žíhán v peci při teplotách 950 °C v redukční atmosféře, díky které je povrch zbaven oxidů. Kovově čistý pás postupuje v ochranné atmosféře směrem do zinkovací lázně a je veden tak, aby z ní vystupoval ve svislém směru. Pozinkovaný plech opouští zinkovací lázeň po několika sekundách přes pneumatické stírací nože, zajišťující požadovanou tloušťku zinkového povlaku. Tloušťka povlaku pozinkovaného pásu se pohybuje v rozmezí 30 až 35 μm . Řízení tloušťky povlaku a nastavení stíracích nožů se provádí tloušťkoměry a různými počítačovými systémy. Pozinkovaný plech dále prochází ochlazovací částí, kde je provedena ochrana proti bílé rzi. Poté dochází k rovnání plechu a navíjení zpět do svitků. Pro zvýšení korozní odolnosti při přepravě svitků je možné použít chemickou úpravu povrchu např. chromátování. [5; 27]



Obrázek 12. Kontinuální proces zinkování s následným použitím chromátování [28]

3.2.4 Zinkování s odstředěním

Velmi malé díly jako matice, podložky, šrouby, hřebíky nebo kování se žárově zinkují ve speciálních koších umístěných v odstředivém zařízení. Jako první je provedena předúprava povrchu v plastových kontejnerech odolávající chemikáliím, poté nanesení tavidla a vysušené díly jsou následně přesypány do cylindrických zinkovacích košů. Díly se v koších ponoří do zinkovací lázně a po pokovení jsou rychle přesunuty do odstředivého zařízení, kde vlivem rotace dochází k odstranění přebytečného zinku

z povrchu pozinkovaných dílů. Odstředivé zařízení dosahuje otáček cca $800 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. U moderních rotačních jednotek je odstředění prováděno přímo nad zinkovací lázní. Odstředěním vznikne rovnoměrný a hladký povrch s tloušťkou 35 až 45 μm . Díky velmi tenké vrstvě zinkového povlaku, dosahující vysoké mechanické a korozní odolnosti se zinkování s odstředěním používá především na šroubové spoje. Závity jsou před zinkováním zhotoveny v mezních úchylných, zohledňující tloušťky vytvořených povlaků zinku. Odstředivé zinkování se provádí buď jako nízko teplotní, s teplotami do 480 °C nebo jako vysoko teplotní, kde se teploty pohybují okolo 550 °C. Po zinkování musí být provedeno chlazení celé vsázky v ochlazovacích lázních. [4; 5]

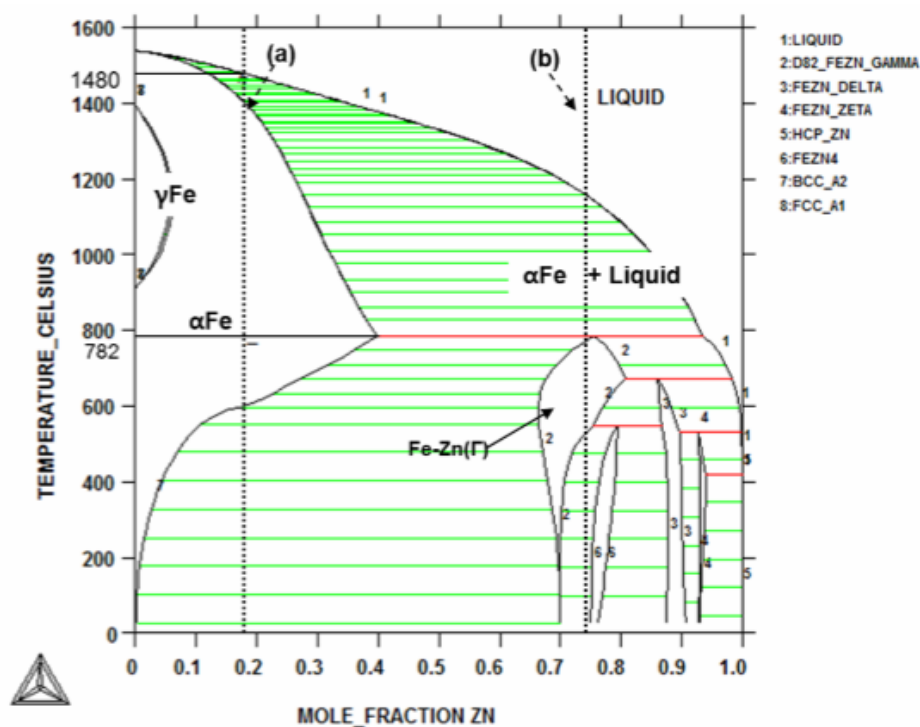
3.3 Tvorba povlaku žárového zinku

Žárové zinkování může probíhat při různých teplotách. U kusového zinkování proces probíhá při teplotách 450 až 460 °C a při zinkování drobných dílů teploty dosahují až 560 °C (vysokoteplotní zinkování s odstředěním). Pokud zinkování probíhá nad teplotami 470 °C je nutné použít vany z keramických materiálů. Pro nižší teploty se běžně používají vany z čistého železa s feritickou strukturou, které snižují rychlost reakcí mezi zinkem a stěnami lázně. Při vložení ocelového substrátu do zinkovací lázně vznikají na povrchu oceli intermetalické povlaky vlivem metalurgické reakce mezi substrátem a roztaveným zinkem. U žárového zinkování ponorem se vytváří na zinkovaných součástech slitinový železo-zinkový povlak. Za vznikem povlaku stojí celkem složitý proces vzájemné difúze atomů obou kovů, při čemž vznikají elementární intermetalické vazby a fázové přeměny. Děje neprobíhají pouze v povrchové vrstvě zinkovaného kovu, ale i na rozhraní mezi substrátem a roztaveným kovem a také v těsné blízkosti zinkové taveniny obklopující zinkovanou součást. Když je součást ponořena v lázni roztaveného zinku, dochází k reakci mezi oběma kovy. Zinek se váže na železo a vytvoří se intermetalická železo-zinková slitinová fáze. [25; 29]

3.3.1 Soustava železo - zinek

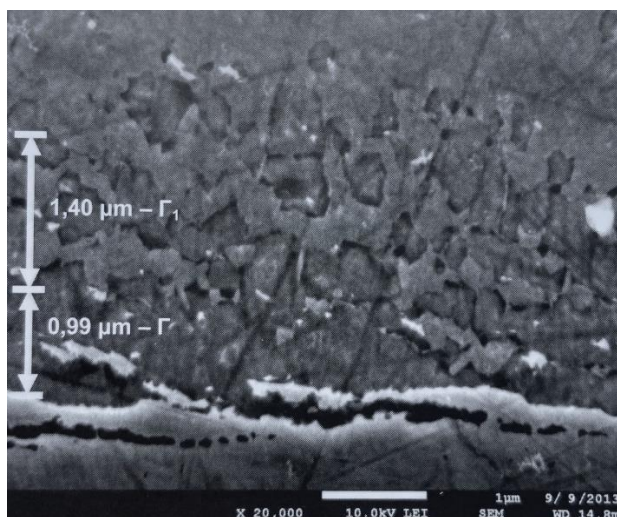
V dnešní době se nejčastěji pro žárové zinkování ponorem používají feritické nebo feriticko-perlitické konstrukční oceli. Zinek i železo patří do skupiny přechodných prvků. V binární soustavě železo-zinek dochází k částečné rozpustnosti jedné složky a k úplné nerozpustnosti složky druhé. Zatímco ferit spolu se zinkem tvoří tuhý substituční primární roztok α , který dosahuje při teplotě peritektické přeměny (782 °C) obsahovat až 41 % zinku a maximální obsah železa v tuhém zinku je naopak maximálně okolo 0,03 %.

V soustavě železo-zinek se vyskytují čtyři přeměny. Tři přeměny peritektické a jedna peritektoidní. Pro soustavu je charakteristický značný rozdíl teplot tání obou složek. Slitinový povlak vzniká nad teplotou tání zinku (419 °C), ale pod teplotou tání železa (1538 °C). Pokud je zinkování prováděno závěsovým způsobem při teplotě kolem 450 °C nelze dosáhnout rovnovážných podmínek pro peritektoidní přeměnu ani žádnou z peritektických přeměn. Podmínky pro peritektickou přeměnu (pevná a tekutá fáze se za rovnovážných podmínek přemění na jednu novou, pevnou fázi), případně pro peritektoidní přeměnu (dvě pevné fáze se za rovnovážných podmínek přemění na jednu novou, pevnou fázi), mohou nastat pouze při vysokoteplotním zinkování. U nízkoteplotního zinkování se železo se zinkem může vzájemně vázat na intermetalické slitiny pouze pomocí difúze. Během procesu žárového zinkování dochází k mnoha chemickým reakcím, které vedou k růstu různých fází nebo intermetalických sloučenin povlaku. Charakteristika vzniklého povlaku závisí na vzniku a přítomnosti slitinových fází. Dále závisí na chemickém složení oceli, lázně, době ponoru, rychlosti ochlazování a drsnosti substrátu. Zinkový povlak se skládá z řady vrstev, lišící se od sebe chemickým složením, krystalickou strukturou i mechanickými vlastnostmi. Počínaje povrchem oceli je každá vrstva slitinou železa a zinku a čím dál od povrchu se vrstva nachází, tím se snižuje i obsah železa ve vrstvě. Slitinové fáze se označují Γ , Γ_1 , δ a ζ . [4; 29]



Obrázek 13. Binární diagram Fe-Zn [30]

Nejblíže k povrchu oceli vznikají fáze Γ , Γ_1 . Rozdíl mezi Γ a Γ_1 je ve velikosti mřížkové konstanty (Γ_1 je dvojnásobkem mřížkové konstanty fáze Γ). Při ponoření oceli do zinkovací lázně a po dostatečném prohřátí se na jejím povrchu tvoří dvě povlakové vrstvy. Blíže k substrátu vzniká slitinová fáze δ a na ní se vytvoří fáze ζ . Při teplotě okolo 450 °C, kterou má obvykle zinkovací lázeň, se zvyšuje rozpustnost zinku ve feritu. V závislosti na struktuře a chemickém složení oceli se v povrchové vrstvě vytváří nasycený tuhý roztok zinku v železe α . Fáze Γ a Γ_1 , které vznikly přímou syntézou v důsledku difúze, jsou při kusovém zinkování často neznatelné. Pokud došlo k dostatečnému nasycení feritu zinkem a po vypořádkování ze zinkovací lázně probíhá pomalé ochlazování, mohou se vytvořit podmínky pro segregaci Γ -fáze z přesyceného tuhého roztoku zinku v železe α . Vytvořená sloučenina je $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$, jenž může vzniknout při vhodném poměru valenčních elektronů k počtu atomů. Vzniklá fáze Γ má vynikající přilnavost k substrátu a krystalizuje stejně jako ferit (železo α) v kubické krystalové soustavě s prostorově středěnou mřížkou. [31; 32; 33]

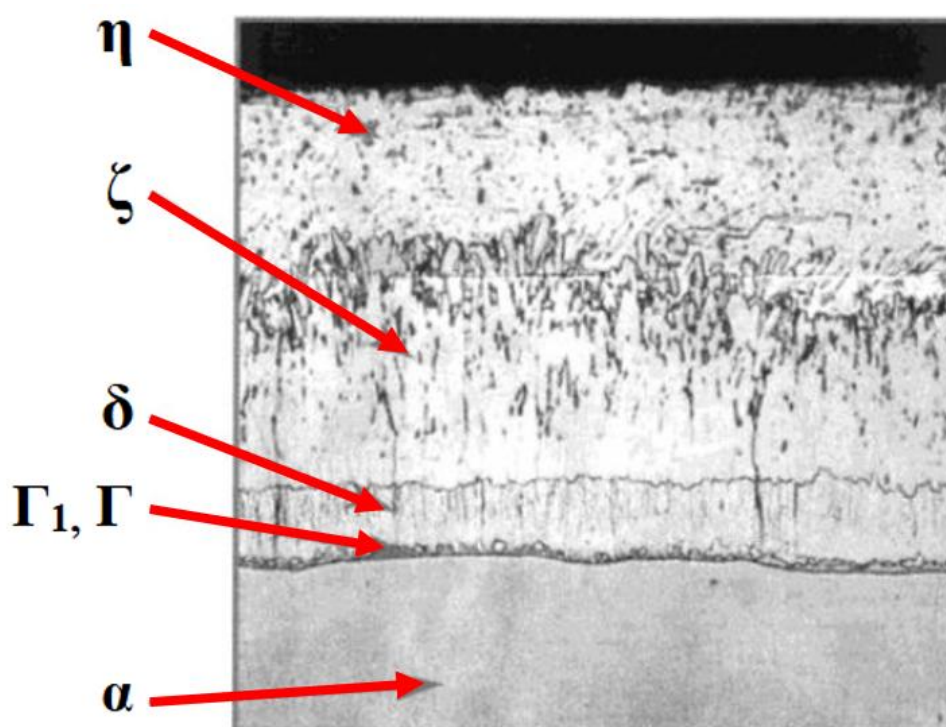


Obrázek 14. Přítomnost fází Γ a Γ_1 v povlaku lze prokázat pouze s velmi přesnými analytickými metodami [4]

Ve fázi δ se může železo se zinkem vzájemně vázat v různých poměrech, ale obecně platí, že blíže k substrátu je obsah železa vyšší. Železo se za vyšších teplotách rozpouští ve větších koncentracích ve slitině než při teplotách prostředí. Při použití pomalého ochlazování se část vrstvy fáze δ nasycená železem přemění na fázi Γ_1 . Slitinová fáze δ je charakteristická svým těsným šesterečným uspořádáním krystalů ve formě vzájemně na sebe přiléhajících hranolů. Ty tvoří konzistentní vrstvu s příznivými mechanickými vlastnostmi. Povlaky s převládající fází δ jsou odolné proti otěru nebo porušení při nešetrné manipulaci. [29; 31]

Další slitinovou vrstvou v povlaku žárového zinku je fáze ζ . Tato fáze krystalizuje v jednoklonné krystalové soustavě a její chemické složení je FeZn_{13} . ζ fáze má oproti ostatním železo-zinkovým slitinovým fázím velmi vysokou homogenitu při pokojové teplotě a železo u ní kolísá ve velmi úzkém rozmezí. Struktura fáze ζ se liší s chemickým složením oceli viz kapitoly 3.3.4 [32]

Poslední vrstvou nejdál od povrchu oceli se nachází fáze η , ta je tvořena čistě zinkem s maximálním obsahem železa 0,03 %. Základní skladba povlaku je znázorněna na obr. č. 15 a vlastnosti jednotlivých slitinových fází je znázorněno v následující tabulce č. 5. [32]



Obrázek 15. Struktura zinkového povlaku na oceli [34]

Tabulka 5. Přehled železo-zinkových slitinových fází [4; 32]

Fáze	Složení	Obsah Fe	Kr. struktura	Mech. vlastnosti	Mikrotvrдость
η	Zn	-	Hexagonální (nejtěsnější)	Houževnatá	52
ζ	FeZn_{13}	5,8 - 6,2	Jednoklonná	Tvrdá křehká	208
δ	FeZn_{10}	7 - 11	Hexagonální (kolumnární)	Konzistentní	358
Γ_1	$\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$	18 - 21	Kubická PS	Silně adhezivní	505
Γ	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	19 - 31	Kubická PS	Silně adhezivní	326
α	Fe	59 - 100	Kubická PS	Feritická ocel	104

Pozn. Mikrotvrдость uvedena v HV, PS = prostorově středěná

3.3.1.1 Vliv křemíku při tvorbě zinkového povlaku

Do ocelí se v průběhu výroby přidává kyslík, který má vliv na snížení obsahu nežádoucích prvků. S poklesem teploty rozpustnost kyslíku v oceli klesá. K zabránění vázání volného kyslíku s uhlíkem, při čemž vznikají exogenní bubliny oxidu uhelnatého, které zhoršují vlastnosti oceli se musí před odlitím do ingotů deoxidovat. Právě pro desoxidaci se využívají prvky mající ke kyslíku vyšší afinitu, než má železo. Mezi tyto prvky patří mangan, hliník nebo křemík. Mezi nejúčinnější dezoxidační prvky patří především křemík. Přítomnost křemíku v oceli má nežádoucí účinky na jakost naneseného zinkového povlaku. [35]

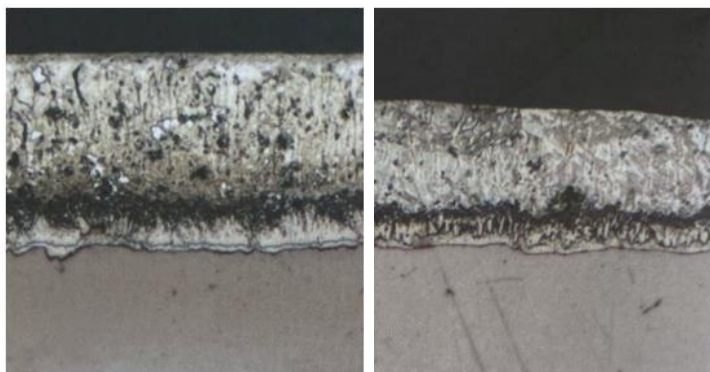
3.3.2 Nízkoteplotní zinkování

Při nízkoteplotním zinkování křemíkem neuklidněných ocelí narůstá fáze δ v tlusté konzistentní vrstvě, oddělující substrát od zinkové taveniny. Díky tomu výrazně zpomaluje difúzi atomů obou kovů. Fáze ζ u ocelí neuklidněných křemíkem postupem času v lázni výrazně neroste a vznik vrstvy se zpomaluje. Vzniklé krystaly jsou jemné a v blízkosti fáze δ k sobě těsně přiléhají a tvoří jehlice směrem k povrchu. Naopak je tomu u ocelí uklidněných křemíkem, kde se slitinová fáze δ v povlaku tolik nerozvíjí a vzniká tenká a nesouvislá vrstva. Difúze může bez problému probíhat a slitinová fáze ζ v povlaku s časem roste s lineární závislostí.

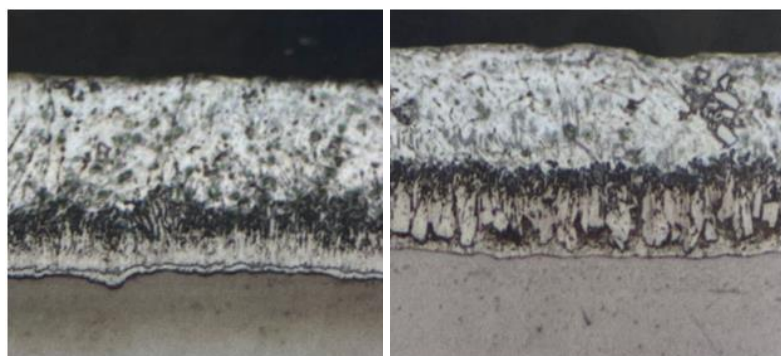
Na následující straně je porovnání vzniku zinkového povlaku na vzorcích oceli:

- a) Neuklidněné křemíkem
- b) uklidněné křemíkem.

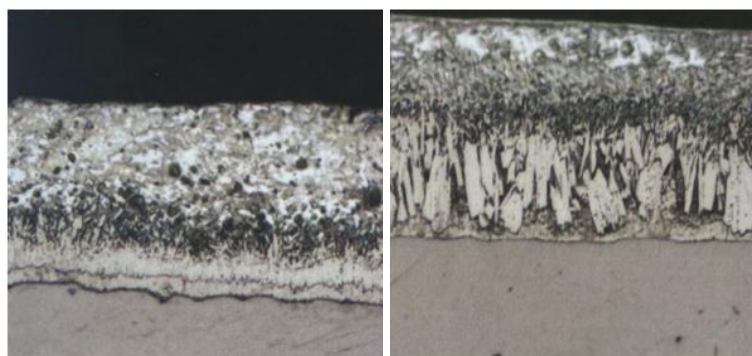
Na vzorku a) dochází k postupnému nárustu vrstvy fáze δ až do takové tloušťky, aby zastavila difúzi železa a zpomalila tak tvorbu další slitinové fáze. Vzorek b) nedosahuje takové tloušťky fáze δ a ani rozvolněné krystaly fáze ζ nebrání difúzi železa a povlak postupem času roste do větší tloušťky. [4]



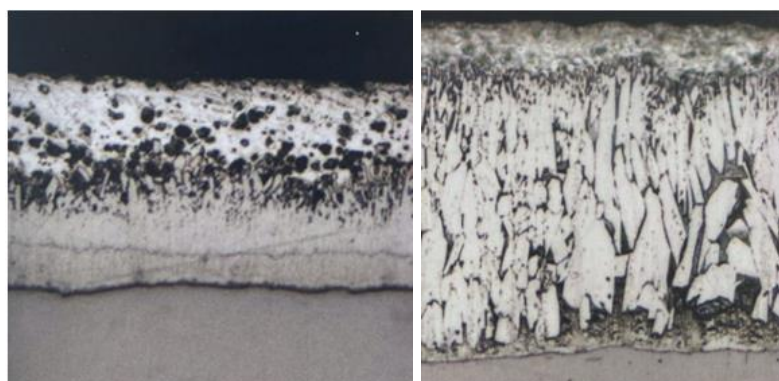
Obrázek 16. Povlak po době ponoru 30 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4]



Obrázek 17. Povlak po době ponoru 60 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4]



Obrázek 18. Povlak po době ponoru 120 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4]

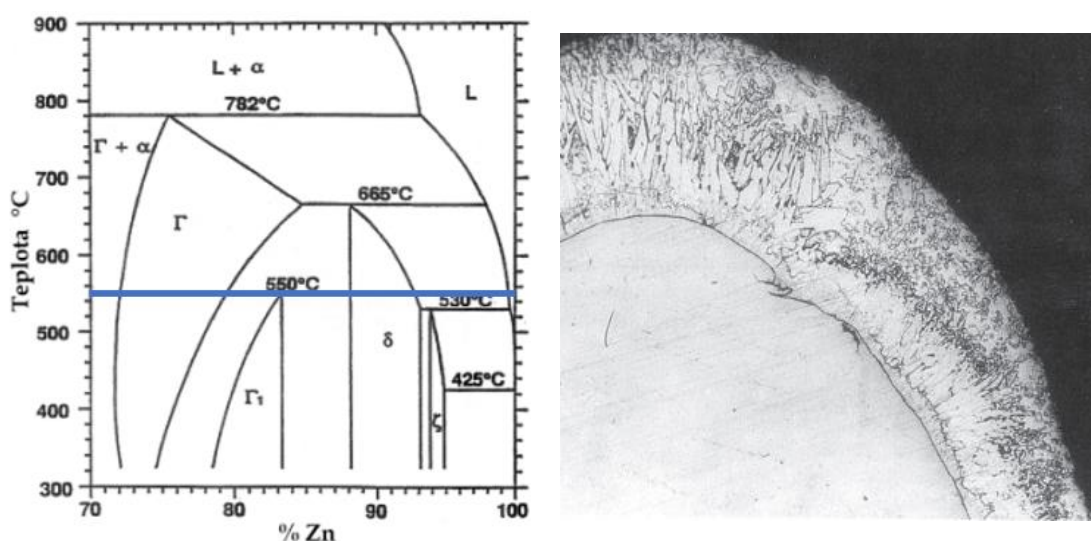


Obrázek 19. Povlak po době ponoru 300 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4]

Struktura i tloušťka vytvořeného povlaku je závislá na více faktorech ovlivňující průběh metalurgické reakce. Důležitým faktorem je tloušťka stěny zinkovaného materiálu. U tenčích substrátů vzniká tenčí zinkový povlak než na tlustějších substrátech. Dalším důležitým faktorem je chemické složení zinkované oceli, struktura a kvalita povrchu po mechanickém a tepelném zpracování, obsah cizorodých látek, a především obsah křemíku ovlivňující průběh tvorby zinkového povlaku. [4]

3.3.3 Vysokoteplotní zinkování

Proces zinkování probíhá při teplotách vyšších než 530 °C. Vysokoteplotní zinkování probíhá nad teplotou 550 °C stabilní fáze ζ , která nemůže při těchto podmínkách vzniknout. Technologie spojená s vysokoteplotním zinkováním využívá k nanesení povrchu odstředění a chlazení ve vodě. (viz kap. 2.4.5). Odstředění je důležité pro odstranění přebytečného zinku, a tím zabránění peritektické fázové přeměně, při které by ze směsi krystalů fáze δ a zinkové taveniny mohly vzniknout při pomalém ochlazení nežádoucí směs krystalů fáze ζ a fáze η . Při vysokých teplotách u zinkování se rozkládá železo, reagující se zinkem za vzniku slitinové fáze δ . Z důvodu krátkých pracovních časů nedochází k dostatečné saturaci feritu zinkem, aby vznikl přesycený primární roztok α a nevzniká ani fáze Γ . Kvůli rychlému ochlazení ve vodě nevzniká ani fáze Γ_1 , protože fáze δ nestačí segregovat. Ve vytvořeném povlaku zinku je nejbliž k substrátu fáze δ , tvořena jemnými krystaly, které jsou prostoupeny čistým zinkem. Zinkový povlak je rovnoměrný a kopíruje obrysy pozinkované součásti. [4; 36]



Obrázek 20. Vlevo: oblast vysokoteplotního zinkování (modře)
Vpravo: zinkový povlak po zinkování s odstředěním [5; 32]

3.3.4 Vliv chemického složení oceli

Celkovou kvalitu povlaku žárového zinku ovlivňují i prvky obsažené v oceli. Jedná se o prvky příměsové ale i nežádoucí nečistoty. Dokonce i cizí nečistoty nacházející se přímo na povrchu ovlivňují výsledný povlak, jelikož na nich může při tuhnutí docházet k růstu krystalů fáze ζ . Mezi nejvýznamnější prvky ovlivňující zinkový povlak patří síra (S), mangan (Mn) a hliník (Al).

Síra (S) se například přidává do automatových ocelí za účelem zlepšení obrobitelnosti. Síra způsobuje nadměrné rozpouštění oceli v zinkové tavenině. Při obsahu síry vyšším než 0,15 % dochází ke změnám geometrie pozinkovaných součástí a pokud se zinkují součásti se závitem, tak tím ztrácejí svoji funkčnost.

Mangan (Mn) má na výsledný povlak přívětivý vliv. Pokud ocel obsahuje více než 1,25 % manganu, dochází k těsnějšímu uspořádání jednoklonných krystalů slitinové fáze ζ . Pokud se jedná o ocel uklidněnou křemíkem s takovým obsahem manganu, dosahuje velmi dobrých mechanických vlastností.

Hliník (Al) má při výrobě ocelí podobné vlastnosti jako křemík. Oba prvky se přidávají do uklidněných ocelí jako dezoxidační činidlo. Možný přebytek hliníku v ocelích se může vázat ve slitinových fázích železa s hliníkem, kde tvoří sloučeniny jako FeAl_2 , FeAl_3 nebo Fe_2Al_5 . Pokud hliník v oceli zůstává jako volný, vstupuje do reakce přednostně a vzniká tenká, hustá a nesouvislá vrstva železo-hliníkové slitinové fáze bránící difúzi železa. Výsledný železo-zinkový povlak je charakteristický velkou nerovnoměrností. [4]

4 Delaminace povlaku žárového zinku

Hlavní funkcí povlaku žárového zinku je ochrana ocelových konstrukcí proti korozi. Při posuzování kvality povlaku žárového zinku je důležitým aspektem jeho přilnavost k základnímu materiálu. Norma ČSN EN ISO 1461 se zabývá fyzikálními vlastnostmi naneseného povlaku, a to především jeho tloušťkou a funkcí pokovené plochy. Konkrétní podmínky přilnavosti povlaku však norma nespécifikuje a záleží pouze na domluvě mezi objednavatelem a zhotovitelem povrchové úpravy. Pro žárové povlaky zinku se předpokládá, že mají dostatečnou přilnavost k substrátu, aby dokázaly odolat vnějším účinkům. Ve zvláštních případech může nedostatečná přilnavost povlaku způsobovat závažné problémy pro danou aplikaci. [4]

4.1 Vliv teploty chladnutí na přilnavost

Teplota chladnutí má poměrně velký vliv na výslednou kvalitu vytvořených zinkových povlaků. Většina případů změny povlaku jsou pouze estetické a jsou výsledkem spolupůsobení více faktorů. Některé estetické problémy jako je strakatý vzhled, matný a lesklý povrch na stejné součásti nebo holá místa. Tyto anomálie však nesnižují korozní odolnost zinkového povlaku. Ve zvláštních případech mohou vznikat skryté trhliny, které vedou k odlupování povlaku zinku v důsledku teploty chladnutí. [37; 38]

Odlupování zinkového povlaku nastává, když se při procesu zinkování vytváří velmi silné povlaky. Ty vytvářejí vysoké napětí na rozhraní oceli a vzniklého povlaku, což má za následek odlupování vrstvy zinku, oddělení vrstev od ocelového substrátu a znehodnocení celé součásti. U masivních dílů, které chladnou na vzduchu velmi dlouho, přestane proces difúze zinku na povrchu až poklesem teploty celé součásti pod 200 °C. Na určitých místech byl zinek zcela spotřebován vytvořením intermetalických fází Fe-Zn a jinde ho část zbyla. Povrch působí dojmem, jako by byl něčím politý. Odlupování zinkového povlaku lze zamezit snížením zinkovacích časů a co nejrychlejším ochlazením ve vodě, aby se zastavila difúze zinku. Pokud je oblast napadená odlupováním malá, může být provedena oprava. Když by se zinkový povlak odlupoval na větší ploše zinkované součásti, musí být součást vyřazena a znovu pozinkována. [39; 40]

4.2 Druhy delaminace povlaku žárového zinku

V praxi může dojít k různým druhům delaminace. Nepřilnavost žárových povlaků se od sebe odlišují svým charakterem a příčinou vzniku delaminace. Pro vznik delaminace nemusí působit žádné mechanické namáhání součásti. Ve většině případů záleží na metalurgických jevech přítomných při nanášení zinkových povlaků. Faktory ovlivňující vznik delaminace jsou např. chemické složení oceli, chladicí cyklus nebo mechanické namáhání pozinkovaných povlaků. [41]

4.2.1 Vysoký obsah křemíku

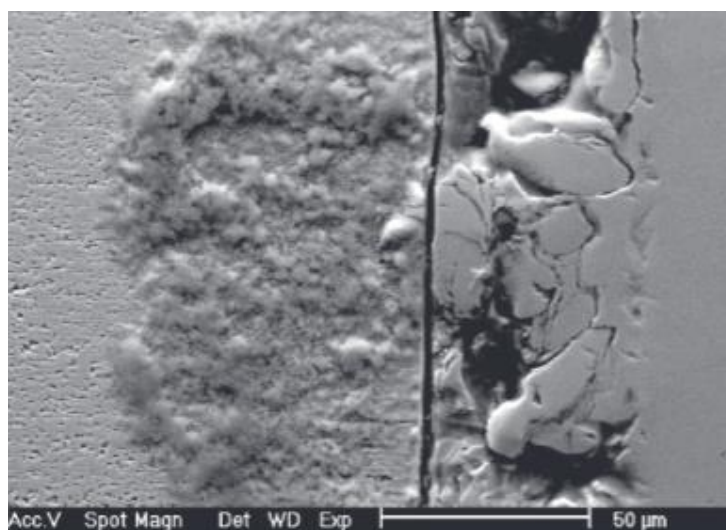
Oceli ukliďněné křemíkem mají zvýšenou reaktivitu železa se zinkem. Součásti s tlustostěnnou konstrukcí a obsahem křemíku nad 0,28 % dosahují poměrně tlustých zinkových povlaků. Vytvořený povlak zinku může v extrémních případech dosahovat tloušťky až 1 mm. Struktura povlaku obsahuje dominantní podíl slitinové fáze ζ , tvořena z jednoklonných krystalů s vysokým stupněm neuspořádanosti. Mezi jednotlivými krystaly slitinové fáze ζ se může vyskytovat výrazná nespojitost a vazba povlaku s ocelovým substrátem nevzniká v celé ploše, ale pouze bodově. Rozdílné hodnoty součinitelů tepelné roztažnosti povlaku zinku a oceli při ochlazování stojí za vznikem tangenciálního pnutí, způsobující delaminaci povlaku. Pokud by byla použita tlustostěnná součást s velmi reaktivním substrátem, povlaky mohou dorůst až do extrémní tloušťky několika milimetrů. Při metalurgické reakci dochází k objemovým změnám, způsobující bortění povlaku zinku při jeho vzniku. V tomto případě dochází k odhalování substrátu a opakované tvorbě velmi tlustého povlaku. Takto vytvořený povlak vytváří nesouvislou krustu a pozinkované součásti nesplňují svou funkci a jsou prakticky nepoužitelné. Zamezit delaminaci způsobenou vysokým obsahem křemíku lze použitím vhodné oceli pro žárové zinkování.[4; 42]



Obrázek 21. Fe-Zn krusta na tlustostěnných konstrukcích s vysokým obsahem křemíku [4]

4.2.2 Oblast křemíku v Sandelinově oblasti

Sandelinovy oceli obsahují fosfor a křemík a nazývají se podle Roberta W. Sandelina, který se této problematice věnoval. Právě obsažený křemík v rozmezí od 0,03 až 0,12 % je pro žárové zinkování nepříznivý. Největší problém nastává u zinkování tenkých plechů tažených za studena. Reakce mezi ocelí a zinkem je velmi rychlá a vytváří se tlustý a nepravidelný povlak. Křemík je v oceli substitučně rozptýlený v pravidelné mřížce oceli a dochází při žárovém zinkování k nadměrnému uvolňování atomů železa, které poté ve zvýšené míře difundují do zinkové taveniny obklopující stěny zinkované součásti. Atomy železa v poměru 1:13 se váží se zinkem, při čemž vznikají jemné krystaly tvrdého zinku fáze ζ . Vzniklá vrstva je velmi tlustá s viskózní kašovitou substancí a malou přilnavostí na povrchu. Za snížení přilnavosti vytvořeného povlaku stojí řediny, které vznikají díky převládající difúzi atomů železa na rozhraní ocelového substrátu a železo-zinkové slitiny. Nastává zde tzv. Kirkendallův jev, při kterém dochází k tomu, že tok atomů železa ze substrátu je vyvážen tokem vakancí do oceli. Řediny, někdy nazývané jako Kirkendallové dutiny, mohou dosahovat takových rozměrů, že mají za následek narušení povrchové vrstvy. Porušená vrstva oceli se rozpadá a ztrácí kontakt s naneseným železo-zinkovým povlakem. Faktory stojící za vznikem delaminace povlaku v tomto případě je tangenciální pnutí mezi povlakem a substrátem při ochlazování ocelové součásti. [27; 42]



Obrázek 22. Řediny v povrchové struktuře oceli vzniklé difúzí [42]

4.2.3 Kontaminovaný povrch oceli

Jestliže povrch oceli není dostatečně vyčištěn, může obsahovat látky, která způsobují nedostatečnou smáčivost substrátu v lázni roztaveného zinku. Pokud není povrch smáčivý, nedochází k metalurgické reakci mezi železem a zinkem a nanesený zinkový povlak neobsahuje slitinové železo-zinkové fáze a má velmi malou korozní odolnost. Delaminace zinkového povlaku se v tomto případě projeví až při mechanickém namáhání ocelové konstrukce. [42]



Obrázek 23. Delaminace povlaku tvořeného čistým zinkem [43]

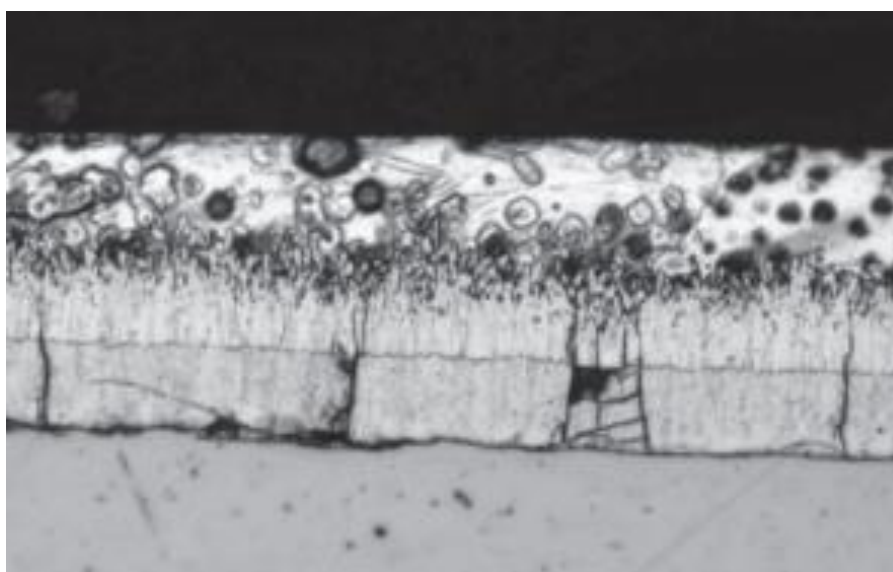
4.2.4 Primární delaminace

Když je materiál umístěn v zinkovací lázni, vzniká na povrchu slitinový povlak. Vlivem teplot zinkovacího procesu dochází k prohřátí celé součásti, a tím k jejímu prohřátí. S rostoucí teplotou se ocelová součást rozpíná, což může napomáhat ke vzniku trhlin ve slitinovém povlaku. Vzniklé trhliny jsou dvojího charakteru. Pokud dojde ke vzniku trhliny s radiální orientací (obr. 20), její přítomnost tolik neovlivňuje celkovou přilnavost povrchu a nesnižuje ani korozní odolnost povlaku. V běžném prostředí, kdy dochází k ovlhčení, vzniká princip obětované anody a železo přechází do stavu imunity. Kdyby vlhkost pronikla až k substrátu, stále má povlak dobré protikorozní účinky, jelikož se trhlina plní produkty vytvořenými zinečnatými ionty. V tomto případě má zinkový povlak takzvanou samohojivou schopnost. Vzniklé smykové pnutí mezi slitinovým povlakem a ocelovým substrátem vede ke tvorbě tangenciálních trhlin, které způsobují odloučení vytvořeného povlaku od substrátu a možný vznik dutin.

Když zinková tavenina vnikne do trhliny, okamžitě reaguje se substrátem za vzniku nových vrstev povlaku. Vzniklá vrstva se vzájemným posuvem vrchního povlaku vůči substrátu může drobit a plní dutiny nesouvislou hmotou. K primární delaminaci jsou náchylné hlavně konzistentní povlaky s velmi jemnou strukturou, které se vytvářejí na oceli s nízkým obsahem křemíku. Fáze ζ a δ obsahuje těsně přiléhající krystaly v obou vrstvách slitinového povlaku a tvoří silnou bariéru, bránící v unikání vodíku vznikajícím na rozhraní mezi povlakem a substrátem. Hromadící molekulární vodík vytváří tlak a spolu s tangenciálním pnutím podporuje delaminaci povlaku. Vzniklý povlak je díky delaminaci drsný, avšak jeho přilnavost a protikorozní odolnost není výrazně snížena. [42]



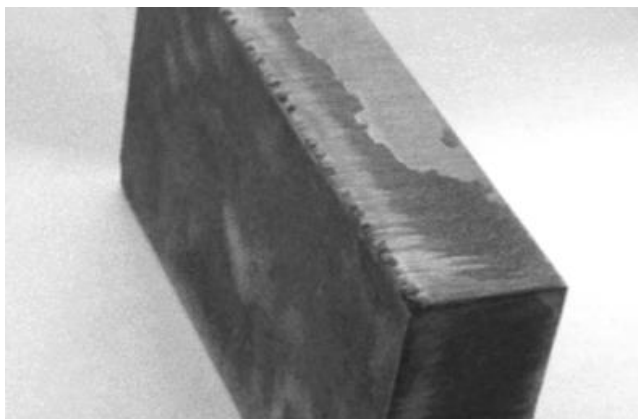
Obrázek 24. Drsný povrch zinkového povlaku vlivem primární delaminace [4]



Obrázek 25. Radiální trhliny v zinkovém povlaku [4]

4.2.5 Delaminace na hranách pálených řezů

Pro dělení pozinkovaných ocelových součástí se využívá řezání kyslíkem. Nezbytnou podmínkou pro řezání plamenem je, aby zápalná teplota základního materiálu a současně teplota tavení vznikajících oxidů byla nižší než teplota tání základního materiálu. V průběhu procesu řezání dochází k ohřátí oceli na zápalnou teplotu, která dosahuje až 1 100 °C. V místě řezu dochází ke skokové změně vlastností jak ocelového substrátu, tak i zinkového povlaku. Nejvíce zasaženým místem z hlediska přilnavosti povlaku v důsledku řezání kyslíko-acetylenovým hořákem jsou hrany s přechodem přírodní plochy válcovaného materiálu na plochu vzniklou spalováním oceli. Obzvláště na hraně, která přiléhá přímo k hořáku vzniká natavení substrátu a plocha řezu je pokryta oxidy. Na ploše páleného řezu reaguje zinek jinak než na plochách přírodních. Vzniklý povlak se na obou plochách liší strukturou i přilnavostí. Za působení teplotního napětí vznikají trhliny (delaminace), které snižují přilnavost zinkového povlaku na hranách pálených řezů. Ke snížení rizika vzniku delaminace by hrany měly být sraženy a opracovány. [44]

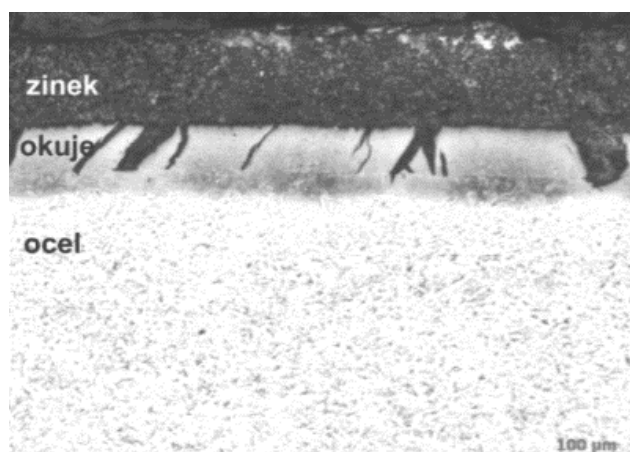


Obrázek 26. Hrana páleného řezu [42]

4.2.6 Souvislá vrstva hematitu

Výroba ocelových polotovarů je spojena se vznikem okujů na jejich povrchu. Okuje jsou tvořeny oxidy železa. Jedná se o oxid železitý (hematit), oxid železnatý (wustit) nebo jejich kombinace oxid železnato-železitý (magnetit). Provozy na výrobu ocelových polotovarů v dnešní době disponují zařízeními na odstranění okujů jako je vodní paprsek nebo moření. I přes tyto předúpravy nemusí dojít k úplnému odstranění a zaokujené polotovary dále putují do zinkoven. Zařízení ke zjištění hematitu na povrchu součástí zinkovny

nemají a pro dosažení kovově čistého povrchu záleží na základě zkušeností. Zboží je umístěno do mořicí lázně obvykle na 1 až 3 hodiny, ve výjimečných případech to může být až 8 hodin. Spodní vrstva okují je tvořena lehce rozpustným wustitem v mořicí lázni. Ten je pokrytý obtížněji rozpustným magnetitem nebo velmi těžce rozpustným hematitem. Pokud je vrstva hematitu souvislá, je potřeba dlouhých mořicích časů, a i to někdy nedokáže hematit úplně rozpustit. Tavidlo se uchytilo na vrstvu hematitu a vznikne smáčivý povrch, který zajistí přilnavost zinku na povrch okují v zinkovací lázni. Vrstva hematitu však brání metalurgické reakci mezi železem a zinkem, jelikož má železo vyšší afinitu ke kyslíku, se kterým je v oxidech vázán, a při teplotě zinkování nedojde k jeho uvolnění, aby mohl reagovat se zinkem. Ve vzniklém zinkovém povlaku se vyskytuje pouze jednosložková fáze η a neobsahuje žádné železo-zinkové slitinové fáze. Zinek uchycený na substrátu nemá potřebnou přilnavost a při narušení dále delaminuje. Problém není na první pohled vidět, ale je možné ho zjistit z výsledků měření tloušťek povlaků, kdy zjištěné hodnoty nesplňují podmínky z normy. [4; 42]



Obrázek 27. Vrstva zinku na zaokujené oceli [42]

4.2.7 Puchýře v zinkových povlacích

Přítomnost puchýřů nastává u povlaků nanesených na tenké podklady s nerovnoměrně rozptýleným křemíkem při vynořování ocelové součásti ze zinkovací lázně. Hlavní příčinou vzniku puchýřů je vodíková křehkost. Vodík vzniklý při moření zvětšuje svůj objem a krystaly fáze ζ brání jeho úniku. Puchýře vznikají nad vrstvami vytvořených slitinových fází a jsou překryty viskózní hmotou. Tato kašovitá hmota tuhne a za přítomnosti vodíku se tvoří dutiny čokovitého tvaru. Povrch součásti je hrubý a může být náchylný k poškození při sweepování. I přes obsahující puchýře povlak vykazuje velmi dobré protikorozní účinky. [45]

5 Experimentální část

Cílem experimentální části diplomové práce bylo zjistit koeficient teplotní roztažnosti dodaného materiálu. Zkoumaný materiál byl železo-zinková slitina FeZn_{13} , tvořena primárně ζ fází. Průběh experimentální části probíhal následovně:

1. Z dodaného materiálu vytvořit vzorky pro měření
2. Na vytvořených vzorcích zbrousit dvě protilehlé paralelní plochy
3. Změřit počáteční velikost vzorků při teplotě okolí
4. Změřit vzorky při teplotách 150 °C, 350 °C a 550 °C v žíhací peci
5. Z naměřených hodnot vypočítat koeficient teplotní roztažnosti
6. Zjistit koeficient teplotní roztažnosti dodané železo-zinkové slitiny FeZn_{13}

Dalším krokem v experimentální části bylo porovnat dva vzorky s povlakem žárového zinku vytvořeným technologií vysokoteplotního zinkování s odstředěním, kdy jeden vzorek byl pomalu ochlazován v termoizolačním boxu a druhý prudce ochlazen ve vodě.

5.1 Příprava vzorků

Pro experiment byla použita železo-zinková slitina FeZn_{13} . Z poskytnutých dvou kusů slitiny byly vytvořeny vzorky, na kterých se měřila teplotní roztažnost při daných teplotách, ze kterých se poté vypočítal koeficient teplotní roztažnosti daného materiálu. Použitá slitina FeZn_{13} je tvrdá, ale velmi křehká a je postihována krystalovou odlučností. Z tohoto důvodu nebylo možné vytvořit vzorky klasickým způsobem jako je např. dělení pomocí pásové pily, ale bylo zvoleno dělení na metalografickém řezacím zařízení.



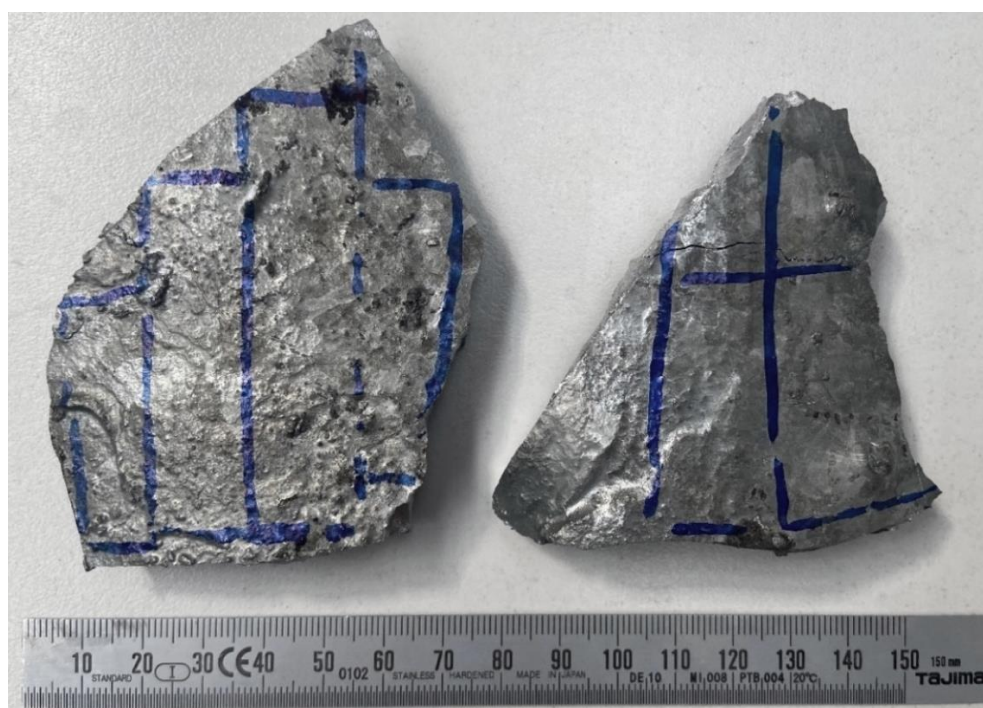
Obrázek 28. Železo-zinková slitina FeZn_{13}

Železo-zinková slitina FeZn_{13} zastupuje ve vytvořeném povlaku žárového zinku intermetalickou fází ζ . Tato fáze obsahuje přibližně 5,8 - 6,2 % železa a je tvořena dlouhými monoklinickými krystaly, které dosahují délky až několik desítek mikrometrů a jsou orientovány kolmo na povrch. Při teplotě 530 °C se slitinová fáze ζ peritekticky rozkládá na kapalný zinek a fázi δ . Podrobnější vlastnosti jsou znázorněny v tabulce č. 6.

Tabulka 6. Vlastnosti železo-zinkové slitiny FeZn_{13}

Vlastnosti FeZn_{13}				
Fáze	Krystalová struktura	Mikrotvrdost	Charakteristika	Teplota tavení
ζ	Monoklinická	208 HV	Tvrdá, křehká	530 °C

Na následujícím snímku je znázorněno rozvržení pro výrobu co největšího počtu vzorků pro experiment. Celkem bylo vytvořeno 6 vzorků, u kterých bylo provedeno měření teplotní roztažnosti při teplotách 150 °C, 350 °C a 550 °C.



Obrázek 29. Rozvržení pro výrobu vzorků

5.1.1 Dělení vzorků na kotoučovém řezacím stroji

Pro přípravu vzorků bylo použito řezací zařízení od firmy Struers Labotom-3, které zaručilo bezpečné dělení vzorků bez narušení soudružnosti železo-zinkové slitiny. Toto řezací zařízení se využívá v laboratořích k přípravě vzorků pro metalografii. Zařízení disponuje 3,0 kW motorem a řeznou kapacitou až do průměru 90 mm. Řezací stůl je vyroben z nerezové oceli s integrovanými T-drážkami pro svěrák k upevnění vzorků. V průběhu dělení je přímo do místa řezu přiváděna chladicí kapalina, díky které je docíleno vynikajícího chlazení v oblasti řezu. Díky jemnému reznému kotouči a kontinuálnímu chlazení jsou výsledné řezy dokonale čisté. Labotom-3 lze využít na všechny druhy materiálu, které lze řezat. Ovládaní stroje je velmi jednoduché, nachází se zde tlačítko start, stop a tlačítko pro zapnutí a vypnutí přísunu chladicí kapaliny. Dělení vzorků probíhá manuálně pomocí páky na pravé straně řezacího zařízení. Proces dělení byl poměrně zdlouhavý, ale bylo docíleno velmi čistých a kvalitních řezů, potřebných pro následné měření pomocí mikrometru.



Obrázek 30. Vlevo: zařízení Labotom-3, vpravo: uchycení vzorku ve svěráku [46]

5.1.2 Frézování rovnoběžných ploch

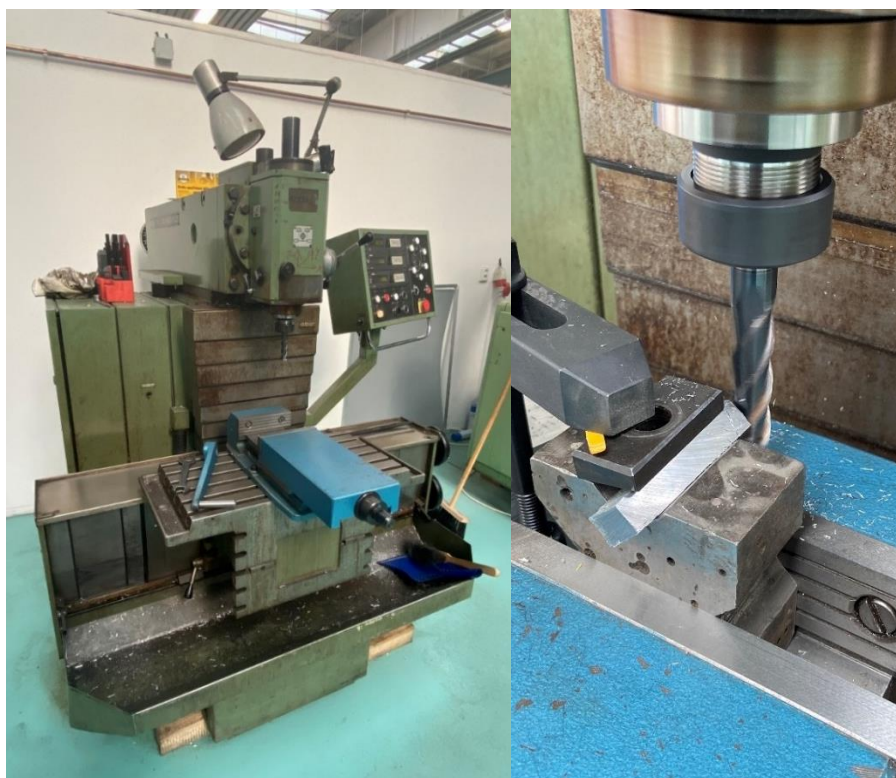
Vzorky z železo-zinkové slitiny byly před měřením opracovány tak, aby se na každém vzorku vytvořily dvě protilehlé paralelní plochy se vzájemnou vzdáleností do rozsahu mikrometru. Rovnoběžných ploch se dosáhlo pomocí frézování na frézce FNGJ 20 od firmy TOS Čelákovice. Použitá fréza pro opracování ploch byla zvolena Dormer Pramet S933 s průměrem 16 mm. Otáčky při frézování byly $800 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Obrobek v průběhu frézování neměnil svojí geometrii, čímž se docílilo dokonalé

rovnoběžnosti. Z důvodu křehkosti materiálu byly zvoleny velmi malé úběry materiálu, aby nedošlo k porušení vzorků při frézování a pro dokonale hladký povrch plochy byl poslední úběr materiálu proveden sousledným frézováním. Technické parametry frézky jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka 7. Technické parametry frézky

Technické parametry TOS FNGJ 20	
Otáčky vřetena	50 – 2500 ot·min ⁻¹
Upínací plocha stolu	300 x 600 mm
Max. hmotnost obrobku	300 kg
Celkový příkon	2,2 kW
Hmotnost stroje	1350 kg
Podélný pohyb stolu X	450 mm
Vertikální pohyb stolu Y	300 mm
Křížový pohyb stolu Z	350 mm

Na následujících snímcích je zobrazena použitá frézka TOS FNGJ 20 a upevnění vzorku z železo-zinkové slitiny před frézováním paralelních ploch.

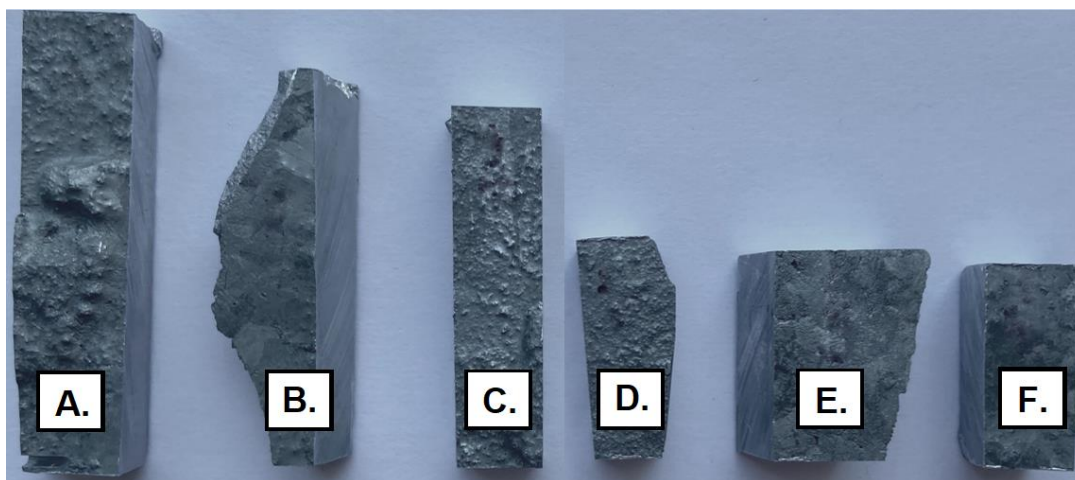


Obrázek 31. Vlevo: frézka TOS FNGJ 20, Vpravo: průběh obrábění rovnoběžných ploch

5.2 Měření teplotní roztažnosti železo-zinkové slitiny

Vytvořené vzorky pro experiment byly označeny písmeny A. až F. a jejich finální podoba je znázorněna na obrázku č. 32. Experiment poté probíhal následovně:

1. Mikrometrem změřit délky vzorků při pokojové teplotě
2. Vzorky v žíhací peci ohřát na teplotu 150 °C a změřit mikrometrem jejich délky
3. Vzorky v žíhací peci ohřát na teplotu 350 °C a změřit mikrometrem jejich délky
4. Vzorky v žíhací peci ohřát na teplotu 550 °C a změřit mikrometrem jejich délky
5. Z naměřených hodnot vypočítat součinitel teplotní roztažnosti slitiny FeZn₁₃



Obrázek 32. Vytvořené vzorky pro měření teplotní roztažnosti

5.2.1 Rozměry vzorků před začátkem měření

Před samotným začátkem měření teplotní roztažnosti bylo potřeba zjistit počáteční délky (l_0) připravených vzorků a zaznamenat teplotu okolního prostředí, která byla $t_0 = 24,6$ °C. Pomocí mikrometrů od firmy Mahr s rozsahy 25 - 50 mm a 50 - 75 mm byly naměřeny výchozí hodnoty. Výsledky měření pro jednotlivé vzorky jsou znázorněny v následující tabulce.

Tabulka 8. Počáteční délky l_0 připravených vzorků

	A.	B.	C.	D.	E.	F.
t_0 [°C]	24,6					
l_0 [mm]	67,561	58,653	53,985	34,657	32,981	31,781

Na následujícím obrázku je ukázka měření vzdálenosti vzorku A. na mikrometru s rozsahem 50 – 75 mm při teplotě okolí $t_0 = 24,6 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obrázek 33. Ukázka měření vzorku A. pomocí mikrometru

5.2.2 Měření teplotní roztažnosti v žíhací peci

Po změření počátečních délek byly vzorky umístěny do žíhací pece, kde proběhlo měření délek jednotlivých vzorků při určité teplotě. Aby se zabránilo ochlazení vzorků vlivem okolní teploty, vzorky zůstaly v průběhu měření v peci a měření délek probíhalo použitím svářečských rukavic. Při dosažení požadované teploty na ovládacím panelu pece se zkontrolovala teplota vzorků laserovým teploměrem a pokud vzorky nebyly dostatečně prohřáté, zůstaly uvnitř pece, dokud nebyla dosažena požadovaná teplota pro měření. Teploty pro měření délek vzorků byly zvoleny 150 $^\circ\text{C}$, 350 $^\circ\text{C}$ a konečná teplota 550 $^\circ\text{C}$.



Obrázek 34. Žíhací pec

5.2.3 Rozměry vzorků při teplotě 150 °C

První měření prováděné v žíhací peci proběhlo při teplotě 150 °C. Na obrázku č. 35 je snímek z ovládacího panelu žíhací pece a před měřením vzorků se zapsala jejich přesná teplota. Poté probíhalo samotné měření délek a výsledky jsou znázorněny v tabulce č. 9.



Obrázek 35. Teplota z ovládacího panelu žíhací pece (150 °C)

Tabulka 9. Výsledky měření při 150 °C

	A.	B.	C.	D.	E.	F.
$t_{\text{skut.}} [^{\circ}\text{C}]$	151,1	150,8	150,3	149,9	149,9	149,8
$l_{150} [\text{mm}]$	67,779	58,843	54,152	34,748	33,061	31,860

5.2.4 Rozměry vzorků při teplotě 350 °C

Další měření délek vzorků probíhalo při teplotě 350 °C. Na obrázku č. 36 je snímek z ovládacího panelu žíhací pece a v tabulce č. 10 jsou uvedeny příslušné teploty před měřením délky jednotlivých vzorků.



Obrázek 36. Teplota z ovládacího panelu žíhací pece (350 °C)

Tabulka 10. Výsledky měření při 350 °C

	A.	B.	C.	D.	E.	F.
$t_{\text{skut.}} [^{\circ}\text{C}]$	351,8	351,4	350,8	350,1	349,8	349,7
$l_{350} [\text{mm}]$	68,142	59,152	54,428	34,898	33,202	31,993

5.2.5 Rozměry vzorků při teplotě 550 °C

Poslední měření bylo provedeno při teplotě 550 °C. Na obrázku č. 37 je teplota z ovládacího panelu žíhací pece a v tabulce č. 11 jsou uvedeny teploty před měřením a výsledky měření délek jednotlivých vzorků.



Obrázek 37. Teplota z ovládacího panelu žíhací pece (550 °C)

Tabulka 11. Výsledky měření při 350 °C

	A.	B.	C.	D.	E.	F.
$t_{\text{skut.}} [^{\circ}\text{C}]$	550,9	550,6	550,3	549,9	549,8	549,8
$l_{550} [\text{mm}]$	68,522	59,472	54,718	35,068	33,348	32,132

5.2.6 Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti jednotlivých vzorků

Dalším krokem v experimentální části bylo zjistit koeficient teplotní roztažnosti α z naměřených délek vzorků železo-zinkové slitiny FeZn_{13} . Jednotkou koeficientu teplotní roztažnosti je K^{-1} a tato veličina udává informaci o teplotní stálosti materiálu. Obecně platí, že čím vyšší je hodnota koeficientu teplotní roztažnosti, tím více se délka tělesa při změně teploty změní. Hledaný koeficient teplotní roztažnosti pro slitinu FeZn_{13} je aritmetickým průměrem ze všech vypočtených koeficientů při daných teplotách.

Vzorec pro výpočet koeficientu teplotní roztažnosti materiálu α se získá z výrazu:

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T) \rightarrow \alpha = \frac{(l - l_0)}{l_0\Delta T} \quad (1)$$

Kde l ... aktuální délka vzorku [mm]
 l_0 ... délka vzorku při teplotě okolí [mm]
 ΔT ... je rozdíl teplot ($t - t_0$) [$^{\circ}\text{C}$]

5.2.6.1 Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti při 150 °C

Vzorový příklad výpočtu koeficientu teplotní roztažnosti α pro vzorek A. při 150 °C:

Počáteční rozměry vzorku byly 67,561 mm při teplotě 24,6 °C a při ohřevu na teplotu 150 °C se vzorek prodloužil na délku 67,799 mm. Po dosazení hodnot do vzorce pro výpočet teplotní roztažnosti se získá výsledná hodnota koeficientu α .

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T) \rightarrow \alpha = \frac{(l - l_0)}{l_0\Delta T} = \frac{(67,799 - 67,561)}{67,561 \cdot (151,1 - 24,6)} K^{-1} \Rightarrow$$

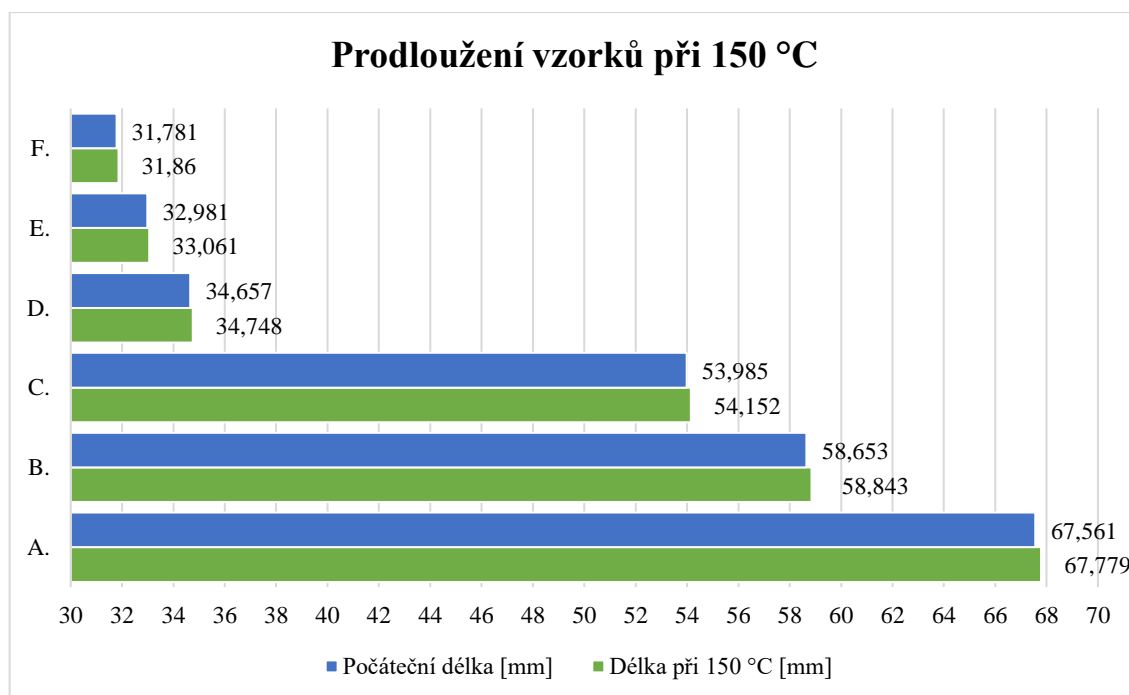
$$\alpha_{A.(150^\circ C)} = 25,5076 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Výsledné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti α při teplotě 150 °C pro jednotlivé vzorky železo-zinkové slitiny FeZn₁₃ jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 12. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti při 150 °C

	t_0 [°C]	t_{150} [°C]	l_0 [mm]	l_{150} [mm]	α [K ⁻¹]
A.	24,6	151,1	67,561	67,779	$25,5076 \cdot 10^{-6}$
B.		150,8	58,653	58,843	$25,6687 \cdot 10^{-6}$
C.		150,3	53,985	54,152	$24,6098 \cdot 10^{-6}$
D.		149,9	34,657	34,748	$20,9556 \cdot 10^{-6}$
E.		149,9	32,981	33,061	$19,3587 \cdot 10^{-6}$
F.		149,8	31,781	31,860	$19,8543 \cdot 10^{-6}$

Graf 1. Prodloužení vzorků při 150 °C



5.2.6.2 Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti při 350 °C

Vzorový příklad výpočtu koeficientu teplotní roztažnosti α pro vzorek A. při 350 °C:

Počáteční rozměry vzorku byly 67,561 mm při teplotě 24,6 °C a při ohřevu na teplotu 350 °C se vzorek prodloužil na délku 68,142 mm. Po dosazení hodnot do vzorce pro výpočet teplotní roztažnosti se získá výsledná hodnota koeficientu α .

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T) \rightarrow \alpha = \frac{(l - l_0)}{l_0\Delta T} = \frac{(68,142 - 67,561)}{67,561 \cdot (351,8 - 24,6)} K^{-1} \Rightarrow$$

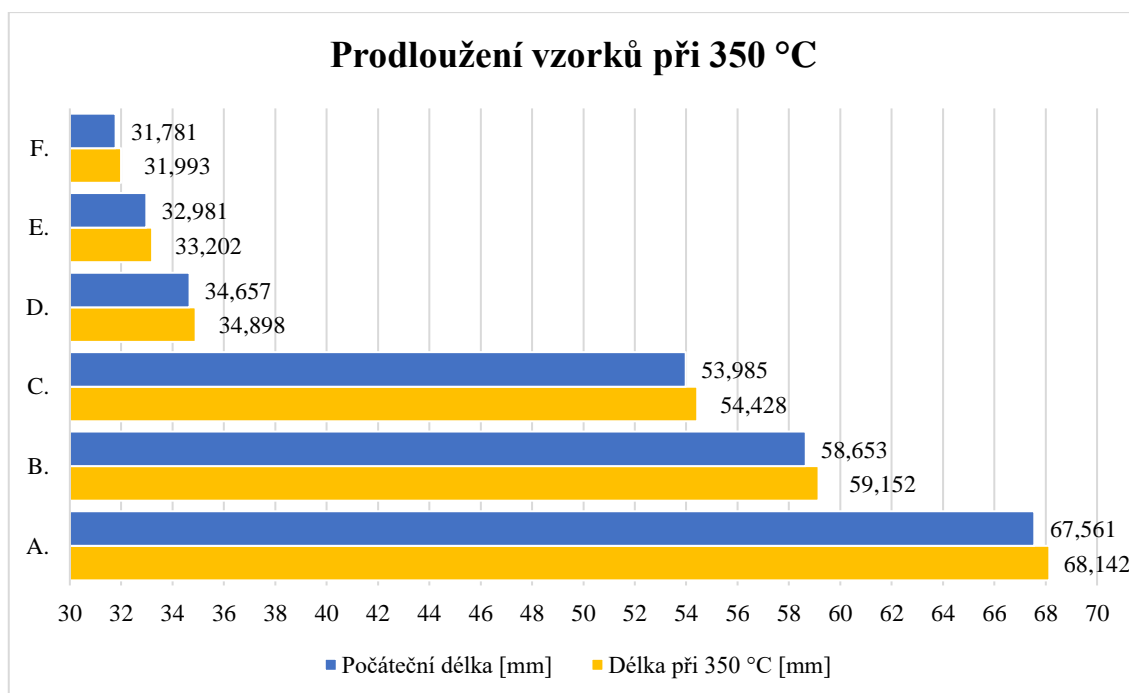
$$\alpha_{A.(350^\circ C)} = 26,2825 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Výsledné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti α při teplotě 350 °C pro jednotlivé vzorky železo-zinkové slitiny FeZn₁₃ jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 13. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti při 350 °C

	t_0 [°C]	t_{350} [°C]	l_0 [mm]	l_{350} [mm]	α [K ⁻¹]
A.	24,6	351,8	67,561	68,142	$26,2825 \cdot 10^{-6}$
B.		351,4	58,653	59,152	$26,0332 \cdot 10^{-6}$
C.		350,8	53,985	54,428	$25,5156 \cdot 10^{-6}$
D.		350,1	34,657	34,898	$21,3636 \cdot 10^{-6}$
E.		349,8	32,981	33,202	$20,6053 \cdot 10^{-6}$
F.		349,7	31,781	31,993	$20,5188 \cdot 10^{-6}$

Graf 2. Prodloužení vzorků při 350 °C



5.2.6.3 Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti při 550 °C

Vzorový příklad výpočtu koeficientu teplotní roztažnosti α pro vzorek A. při 550 °C:

Počáteční rozměry vzorku byly 67,561 mm při teplotě 24,6 °C a při ohřevu na teplotu 550 °C se vzorek prodloužil na délku 68,142 mm. Po dosazení hodnot do vzorce pro výpočet teplotní roztažnosti se získá výsledná hodnota koeficientu α .

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T) \rightarrow \alpha = \frac{(l - l_0)}{l_0\Delta T} = \frac{(68,522 - 67,561)}{67,561 \cdot (550,9 - 24,6)} K^{-1} \Rightarrow$$

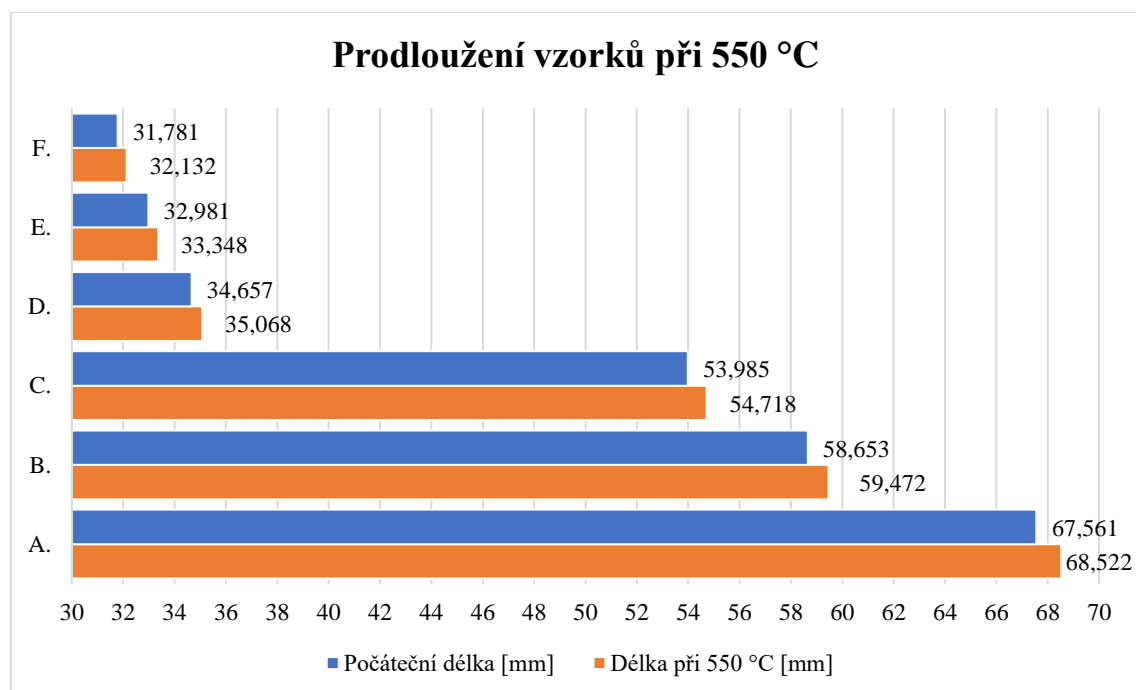
$$\alpha_{A.(550^\circ C)} = 27,0268 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Výsledné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti α při teplotě 550 °C pro jednotlivé vzorky železo-zinkové slitiny FeZn₁₃ jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 14. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti při 550 °C

	t_0 [°C]	t_{550} [°C]	l_0 [mm]	l_{550} [mm]	α [K ⁻¹]
A.	24,6	550,9	67,561	68,522	$27,0268 \cdot 10^{-6}$
B.		550,6	58,653	59,472	$26,5465 \cdot 10^{-6}$
C.		550,3	53,985	54,718	$25,8228 \cdot 10^{-6}$
D.		549,9	34,657	35,068	$22,6156 \cdot 10^{-6}$
E.		549,8	32,981	33,348	$21,1874 \cdot 10^{-6}$
F.		549,8	31,781	32,132	$21,0288 \cdot 10^{-6}$

Graf 3. Prodloužení vzorků při 550 °C



5.2.7 Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti slitiny FeZn₁₃

V průběhu experimentu vždy začínalo měření vzdálenosti v žíhací peci vzorkem A. až F. Při měření se musely otevřít dveře pece a jednotlivé vzorky postupně proměřit. I když měření probíhalo v co nejkratším časovém intervalu, aby se zamezilo ochlazení vzorů, tak i přes to vznikla u vzorků E, D a F chyba měření. Tato chyba nastala nejpravděpodobněji v důsledku poklesu teploty vzorků při otevření žíhací pece a možným ohřátím mikrometru, který nemusel ukazovat přesné výsledky. Teplotní roztažnost čistého zinku je $29 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Teplotní roztažnost železo-zinkové slitiny FeZn₁₃ s obsahem železa okolo 6 % by se měla pohybovat okolo $26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Podobných výsledků bylo dosaženo u vzorků A,B a C, které se měřily jako první.

V následující tabulce jsou uvedeny vypočítané hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti pro vzorky A, B a C při teplotách 150 °C, 350 °C a 550 °C.

Tabulka 15. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti pro vzorky A, B a C

Vzorek	Teplota [°C]	Koeficient teplotní roztažnosti α [K^{-1}]
A.	150	$25,5076 \cdot 10^{-6}$
B.		$25,6687 \cdot 10^{-6}$
C.		$24,6098 \cdot 10^{-6}$
A.	350	$26,2825 \cdot 10^{-6}$
B.		$26,0332 \cdot 10^{-6}$
C.		$25,5156 \cdot 10^{-6}$
A.	550	$27,0268 \cdot 10^{-6}$
B.		$26,5465 \cdot 10^{-6}$
C.		$25,8228 \cdot 10^{-6}$
Součet α		$233,0135 \cdot 10^{-6}$

Hledaná teplotní roztažnost železo-zinkové FeZn₁₃ je aritmetickým průměrem ze všech naměřených hodnot α . Po sečtení hodnot koeficientů teplotní roztažnosti α pro vzorky A, B a C a vydělením výsledku počtem proběhlých měření získáme hledanou teplotní roztažnost železo-zinkové slitiny FeZn₁₃. Tento výsledek je ale pouze orientační, jelikož se výsledná teplotní roztažnost α počítala pouze ze tří vzorků, místo z plánovaných šesti.

$$\alpha_{FeZn_{13}} = \frac{233,0135 \cdot 10^{-6}}{9} \text{ K}^{-1} = 25,8904 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky teplotní roztažnosti pro vzorky C, D a E, které obsahují chybu měření z důvodu poklesu teploty a ohřátí mikrometru.

Tabulka 16. Koeficienty teplotní roztažnosti vzorků s chybou měření

Vzorek	Teplota [°C]	Koeficient teplotní roztažnosti α [K ⁻¹]
C.	150	$20,9556 \cdot 10^{-6}$
D.		$19,3587 \cdot 10^{-6}$
E.		$19,8543 \cdot 10^{-6}$
C.	350	$21,3636 \cdot 10^{-6}$
D.		$20,6053 \cdot 10^{-6}$
E.		$20,5188 \cdot 10^{-6}$
C.	550	$22,6156 \cdot 10^{-6}$
D.		$21,1874 \cdot 10^{-6}$
E.		$21,0288 \cdot 10^{-6}$

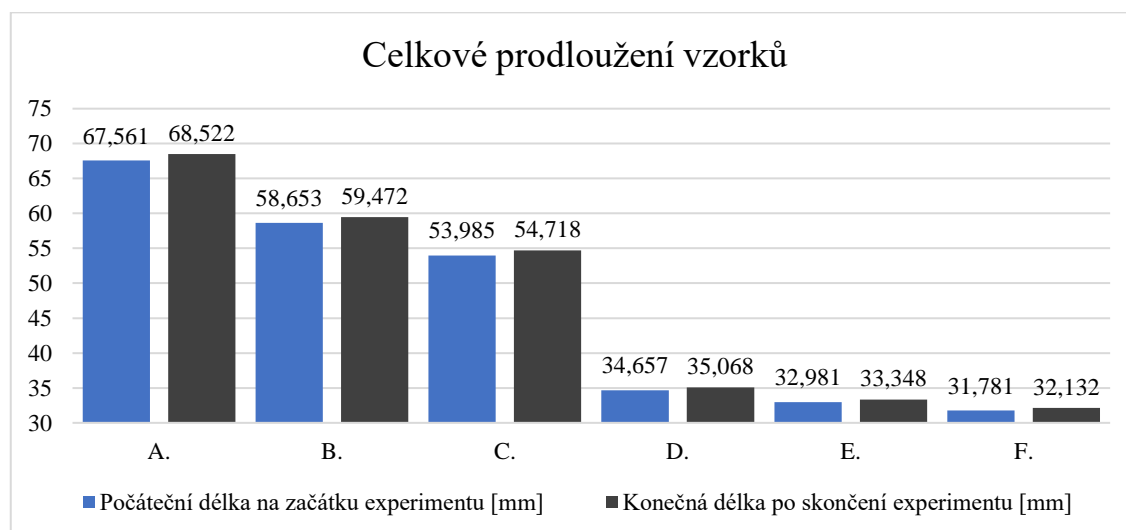
5.2.8 Celkové prodloužení vzorků na konci experimentu

Největších hodnot dosahoval vzorek A, jehož prodloužení činí 0,961 mm, nejmenší prodloužení bylo u vzorku F s 0,351 mm. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty počátečních a konečných délek jednotlivých vzorků železo-zinkové slitiny FeZn₁₃.

Tabulka 17. Prodloužení vzorků železo-zinkové slitiny FeZn₁₃

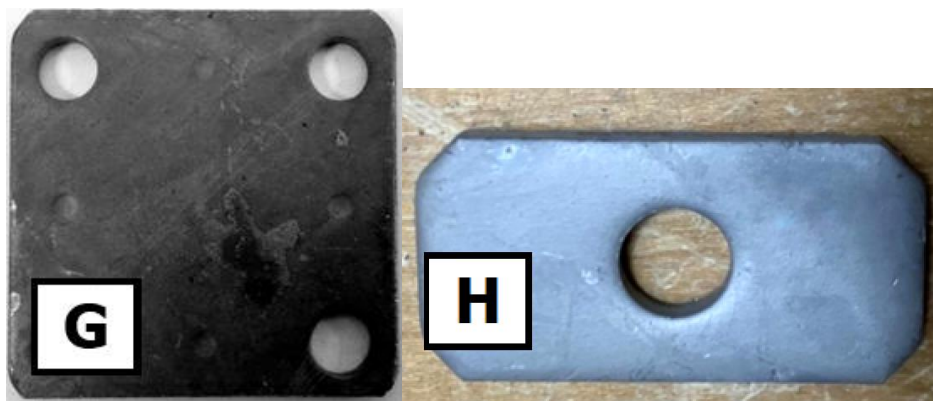
	Počáteční délka l_0 [mm]	Konečná délka l_{550} [mm]	Prodloužení vzorku [mm]
A.	67,561	68,522	0,961
B.	58,653	59,472	0,819
C.	53,985	54,718	0,733
D.	34,657	35,068	0,411
E.	32,981	33,348	0,367
F.	31,781	32,132	0,351

Graf 4. Celkové prodloužení vzorků železo-zinkové slitiny FeZn₁₃



5.3 Vliv teploty chlazení na přilnavost při vysokoteplotním zinkování

Dalším krokem v experimentální části bylo porovnat dva vzorky vytvořené vysokoteplotním zinkováním s odstředěním viz obr. č. 38, kdy vzorek G byl prudce ochlazen ve vodě a vzorek H byl pozvolně ochlazován v termoizolačním boxu.



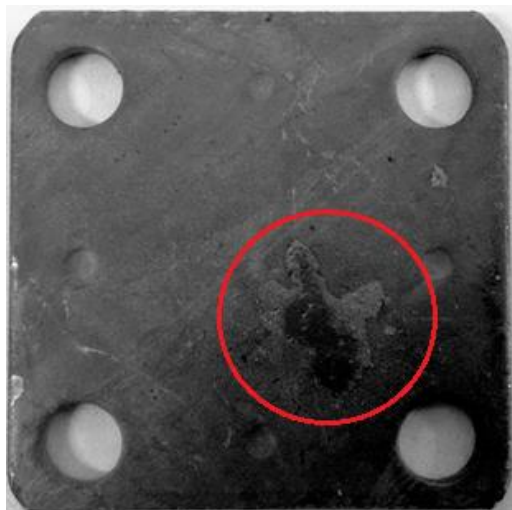
Obrázek 38. Vlevo: vzorek G ochlazen ve vodě, vpravo: vzorek H ochlazován pozvolně

Vytvořený povlak žárového zinku chrání ocelové součásti a konstrukce proti korozi jedinečným způsobem. Občas se ale vyskytnou některé jevy, díky kterým je užitná hodnota povlaků poměrně snížena. Mezi tyto jevy patří především snížená přilnavost žárového povlaku zinku nebo jeho spontánní delaminace. Jelikož je tvorba povlaků žárového zinku termický proces, snížení přilnavosti a delaminaci povlaků způsobují nejčastěji rozdílné koeficienty tepelné roztažnosti ocelového substrátu a vytvořeného zinkového povlaku. Výsledná struktura a tloušťka povlaku žárového zinku záleží na vlastnostech zinkované oceli a podmínkách zinkování. Kvůli těmto faktorům se vytvořené povlaky vyznačují značnou rozmanitostí.

Významný vliv na mechanické vlastnosti povlaku žárového zinku má podíl fáze ζ . Vytvořené povlaky s dominantní fází ζ jsou tlusté, křehké a jsou náchylné k tvoření trhlin. Trhliny vzniklé v povlaku bývají radiální nebo tangenciální. Radiální trhliny vznikají rozdílnou smrštitivostí povlaku vůči ocelovému substrátu. Tyto trhliny nesnižují odolnost proti korozi, jelikož obnažená ocel se nachází v galvanickém článku se zinkem a přechází tak do stavu imunity, čímž vzniká katodická ochrana materiálu. Hlavním problémem radiálních trhlin je, že jsou velmi často doprovázeny trhlinami tangenciálními nebo jejich kombinací. Vzniklé trhliny v povlaku snižují jeho přilnavost k ocelovému podkladu a mohou vést až k spontánní delaminaci povlaku žárového zinku.

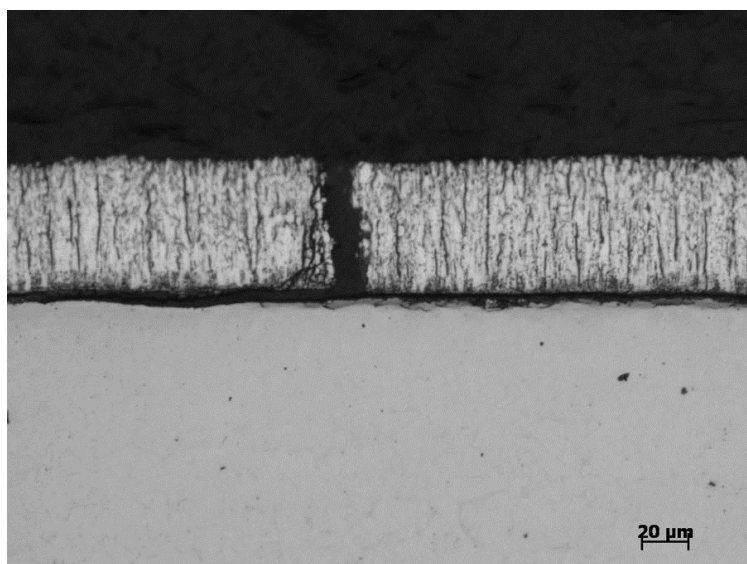
5.3.1 Metalografie - vzorek G

Při pohledu na makrosnímek plochého vzorku G, který byl ochlazen ve vodě, je v pravém spodním rohu patrná rozsáhlá spontánní delaminace povlaku žárového zinku.



Obrázek 39. Makrosnímek vzorku G

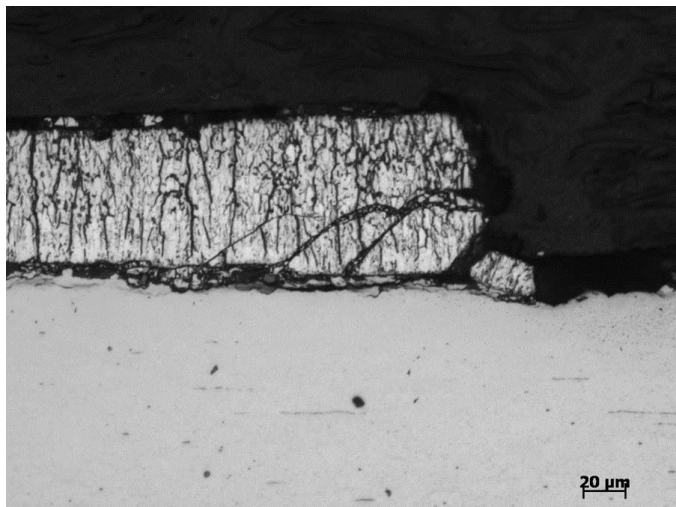
Na metalografickém výbrusu je znázorněna radiální trhlinka v povlaku a velmi patrná diskontinuita mezi povlakem a substrátem, která má za následek odlupování povlaku žárového zinku. Kvůli výrazně snížené přilnavosti povlaku se snižuje korozní odolnost a může dojít k znehodnocení pozinkované součásti.



Obrázek 40. Detail radiální trhliny a diskontinuity povlaku

Na obrázku č. 41 je znázorněn detail místa se spontánní delaminací u stejné součásti. Vyskytují se zde četné radiální trhliny v povlaku, několik kombinovaných radiálně

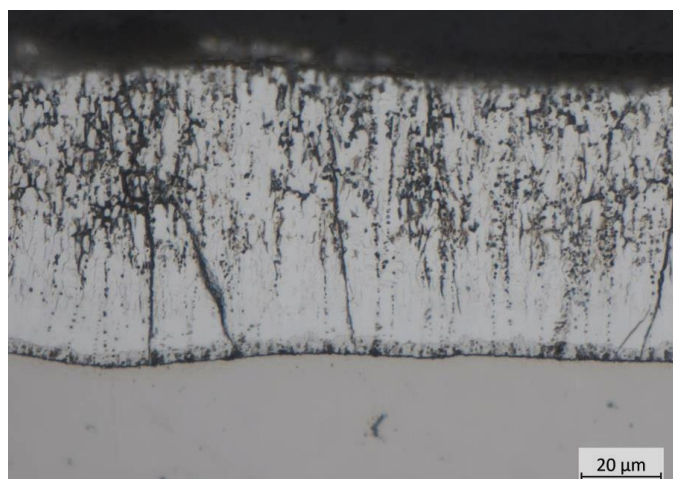
tangenciálních trhlin a velmi dobře viditelná odlučnost zinkového povlaku od substrátu v místě fázového rozhraní.



Obrázek 41. Kombinace radiálně tangenciálních trhlin v povlaku

5.3.2 Metalografie - vzorek H

Při pozvolném ochlazování v termoizolačním boxu metalografie prokázala velmi dobrou strukturu i přilnavost vytvořeného železo-zinkového povlaku, bez žádných trhlin.



Obrázek 42. Struktura povlaku vzorku H

5.4 Diskuse výsledků experimentální části

V této kapitole jsou shrnuty veškeré výsledky, které byly v experimentu naměřeny a vypočteny.

V tabulce č. 18 jsou počáteční délky vzorků před začátkem měření při teplotě okolí 24,6 °C a konečné délky vzorků na konci experimentu při teplotě 550 °C.

Tabulka 18. Délky vzorků před začátkem experimentu

	A.	B.	C.	D.	E.	F.
t_0 [°C]	24,6					
l_0 [mm]	67,561	58,653	53,985	34,657	32,891	31,781
l_{550} [°C]	68,522	59,472	54,718	35,068	33,348	32,132

Z tabulky je patrné, že největších hodnot prodloužení vykazoval vzorek A, který se prodloužil o 0,961 mm. Vzorek B se prodloužil o 0,819 mm a vzorek C o 0,733 mm. Vzorky D, E a F jsou oproti vzorkům A, B a C kratší, čímž i jejich celkové prodloužení bylo menší. Vzorek D se prodloužil o 0,411 mm, u vzorku E celkové prodloužení činilo 0,367 mm a nejmenší prodloužení dosahoval vzorek F s 0,351 mm.

V tabulce č. 19 jsou jednotlivé délky vzorků při teplotách 150 °C, 350 °C a 550 °C a jejich vypočtené koeficienty teplotní roztažnosti α .

Tabulka 19. Výsledky měření a výpočtů v experimentu

	A.	B.	C.	D.	E.	F.
t_{150} [°C]	150					
$t_{skut.}$ [°C]	151,1	150,8	150,3	149,9	149,9	149,8
l_{150} [mm]	67,779	58,843	54,152	34,748	33,061	31,860
α_{150} [K ⁻¹]	25,5076	25,6687	24,6098	20,9556	19,3587	19,8543
t_{350} [°C]	350					
$t_{skut.}$ [°C]	351,8	351,4	350,8	350,1	349,8	349,7
l_{350} [mm]	68,142	59,152	54,428	34,898	33,202	31,993
α_{350} [K ⁻¹]	26,2825	26,0332	25,5156	21,3636	20,6053	20,5188
t_{550} [°C]	550					
$t_{skut.}$ [°C]	550,9	550,6	550,3	549,9	549,8	549,8
l_{550} [mm]	68,522	59,472	54,718	35,068	33,348	32,132
α_{550} [K ⁻¹]	27,0268	26,5465	25,8228	22,6156	21,1874	21,0288

Pozn. α jsou uvedeny v 10⁻⁶ (např. 25,5076 · 10⁻⁶)

Jedním z úkolů v experimentální části bylo zjistit přibližný koeficient teplotní roztažnosti železo-zinkové slitiny FeZn_{13} , jehož hodnota se vypočítá z aritmetického průměru všech koeficientu při daných teplotách. Z důvodu chyby v měření u vzorků D, E a F byl výsledek teplotní roztažnosti dané slitiny vypočten pouze z hodnot vzorků A, B, C a je pouze orientační.

Tabulka 20. Hodnoty pro výpočet orientačního koeficientu teplotní roztažnosti FeZn_{13}

	A	B	C
$\alpha_{150} [\text{K}^{-1}]$	$25,5076 \cdot 10^{-6}$	$25,6687 \cdot 10^{-6}$	$24,6098 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{350} [\text{K}^{-1}]$	$26,2825 \cdot 10^{-6}$	$26,0332 \cdot 10^{-6}$	$25,5156 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{550} [\text{K}^{-1}]$	$27,0278 \cdot 10^{-6}$	$26,5465 \cdot 10^{-6}$	$25,8228 \cdot 10^{-6}$

Aritmetický průměr hodnot z tabulky č. 20 pro zjištění koeficientu teplotní roztažnosti:

$$\alpha_{\text{FeZn}_{13}} = \frac{233,0135 \cdot 10^{-6}}{9} \text{K}^{-1} = 25,8904 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

Pro přesnější výsledek by bylo potřeba naměřit více vzorků a zabránit vlivu chladnutí vzorků v průběhu měření z důvodu otevření žíhací pece.

Dalším úkolem bylo porovnat dva vzorky s povlakem žárového zinku naneseným vysokoteplotním žárovým zinkováním s odstředěním. Z metalografie daných dvou vzorků lze konstatovat, že způsob ochlazování součástí po zinkování má velký vliv na finální strukturu a jakost vytvořeného povlaku žárového zinku. Na vzorku G, který byl rychle ochlazen ve vodě je již na první pohled vidět rozsáhlá spontánní delaminace povlaku. Na snímcích z metalografie se projevíly radiální i tangenciální trhliny a dobře viditelná diskontinuita mezi povlakem žárového zinku a ocelovým substrátem. Naopak pozvolně ochlazovaný vzorek H má neporušenou povrchovou vrstvu bez žádných defektů a metalografie prokázala velmi dobrou strukturu povlaku žárového zinku i jeho přilnavost k ocelovému substrátu.

6 Závěr

Teoretická část diplomové práce pojednává a problematice koroze, koroze zinkových povlaků a v jakých prostředích probíhá. Dále jsou popsány technologie odmašťování a moření, které slouží jako předúprava povrchu před žárovým zinkováním. Kapitola o žárovém zinkování představuje používané technologie žárového zinkování ponorem a proces vzniku povlaku žárového zinku na ocelovém substrátu. Při žárovém zinkování probíhá metalurgická reakce mezi železem a zinkem spontánně v době prodloužení vsázky v tekutém kovu, při které dochází k tvorbě slitinového povlaku. V povlaku žárového zinku se vyskytuje několik fází s rozdílným chemickým složením, krystalovou strukturou i mechanickými vlastnostmi. Nejbliž k povrchu vznikají fáze Γ a Γ_1 , na nichž se tvoří fáze δ , ze které roste fáze ζ . Nejdál od oceli je fáze η , která je tvořena čistým zinkem. Průběh tvorby těchto fází závisí na celé řadě vlivů, mezi které patří např. tloušťka ocelové konstrukce nebo chemické složení zinkované oceli, především její obsah křemíku. Právě obsažený křemík má na výsledné vlastnosti povlaku nepříznivý vliv. Povlaky jsou tlusté, křehké a velmi náchylné k mechanickému poškození, jelikož v nich dominuje fáze ζ . Problémy s nedostatečnou přilnavostí povlaků žárového zinku nastávají v okamžiku, kdy na pozinkovanou součást začnou působit vnější účinky. V kapitole o delaminaci povlaků žárového zinku byly popsány možné příčiny, které stojí za sníženou přilnavost povlaků.

Cílem experimentální části diplomové práce bylo připravit vzorky železo-zinkové slitiny FeZn_{13} pro měření teplotní roztažnosti. Z důvodu krystalové odlučnosti zkoumané slitiny bylo zvoleno dělení s využitím metalografického řezacího zařízení Labotom-3, které zajistilo bezpečné dělení vzorků bez narušení soudržnosti materiálu. Pro experiment bylo vytvořeno šest vzorků, které byly následně opracovány tak, aby na nich vznikly protilehlé paralelní plochy se vzájemnou vzdáleností do rozsahu mikrometru. Pro vytvoření rovnoběžných ploch bylo použito frézování na frézce TOS FNGJ 20 od firmy TOS Čelákovice. Vytvořené vzorky se označily písmeny A až F. Vzorky se následně umístily do žíhací pece, kde se měřila jejich teplotní roztažnost při teplotách 150 °C, 350 °C a 550 °C. Z naměřených hodnot délek vzorků při daných teplotách se počítal koeficient teplotní roztažnosti α . Výsledný koeficient tepelné roztažnosti železo-zinkové slitiny FeZn_{13} je v experimentální části spíše orientační, jelikož u vzorků D, E a F vznikla chyba měření v důsledku poklesu teploty vzorku nebo ohřátím mikrometru. Tyto hodnoty nejsou ve výpočtu koeficientu použity.

Teplotní roztažnost čistého zinku je $\alpha = 29 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, takže výsledný koeficient teplotní roztažnosti použité slitiny, která obsahuje okolo 6 % železa, by se měl pohybovat okolo $\alpha = 26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Z výsledků měření vzorků A, B a C, u kterých měření proběhlo v pořádku, lze konstatovat, že se koeficient teplotní roztažnosti slitiny FeZn_{13} přibližuje této hodnotě. Koeficient teplotní roztažnosti pro vzorky A, B a C vyšel $\alpha = 25,8904 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Dalším krokem v experimentální části bylo porovnat snímky z metalografie vzorků s povlakem žárového zinku naneseným technologií žárového zinkování s odstředěním. Dva porovnávané vzorky G a H se lišily způsobem ochlazování po zinkování. Vzorek G byl ihned po vyndání ze zinkovací lázně prudce ochlazen ve vodě a druhý vzorek H byl ochlazován pozvolně v termoizolačním boxu. Vzorek G vykazoval na první pohled vadu zinkového povlaku. Z metalografického výbrusu byla zjištěna přítomnost radiálních i tangenciálních trhlin a patrná diskontinuita mezi ocelovým substrátem a povlakem žárového zinku. Přítomnost radiálních trhlin nesnižuje korozní odolnost součásti, jelikož zde vzniká princip obětované anody, železo přechází do stavu imunity a nekoroduje. Vyskytující se tangenciální trhliny, vzniklé smykovým pnutím z důvodu rozdílných teplotních roztažností ocelového substrátu a zinkového povlaku snižují přilnavost a vedou až k delaminaci povlaku. Vzorek H ochlazován pozvolně vykazoval na metalografickém výbrusu dobrou strukturu bez trhlin a vynikající přilnavost povlaku žárového zinku k ocelovému substrátu.

Na závěr lze říci, že problematice týkající se delaminace, je třeba věnovat dostatečnou pozornost a najít způsob, jak zabránit jejímu vzniku v průběhu výroby. Delaminace povlaků může nastat kvůli nedostatečně čistému povrchu oceli, rozdílnou teplotní roztažností ocelového substrátu a zinkového povlaku při chladnutí nebo při působení vnějších jevů. V praxi se většina případů lokální delaminace povlaku za celou dobu jeho životnosti neprojeví, neboť i takto postižený povlak je schopen ošetřenou součást dlouhodobě chránit proti korozi. Pokud se ale delaminace projeví již na funkční součásti, která se používá, např. na ocelových konstrukcích sloupů vysokého napětí nebo na mostních konstrukcích, je její oprava finančně nákladná, jelikož se delaminace může projevit na špatně přístupných místech.

7 Citovaná literatura

- [1] Historie galvanotechniky. *První plzeňská galvanovna s.r.o.* [online]. Plzeň. Dostupné z: <http://1p.galvanovna.cz/historie-galvanotechniky/>
- [2] Paul-Jacques Malouin. In: *Prabook* [online]. Dostupné z: <https://prabook.com/web/paul-jacques.malouin/3757598>
- [3] Introduction. In: KUKLÍK, Vlastimil a Jan KUDLÁČEK. *Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures* [online]. Butterworth-Heinemann, 2016. ISBN 9780081007532. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081007532000197>
- [4] KUKLÍK, Vlastimil a Jan KUDLÁČEK. *Žárové zinkování*. Havlíčkův Brod: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2014. ISBN 987-80-905298-2-3.
- [5] *Příručka žárového zinkování*. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2011.
- [6] *ZINKPOWER: Škodlivost bílé rzi* [online]. Asociace českých a slovenských zinkoven [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.zinkpower.com/cs/kodlivost-bile-rzi.html#gref>.
- [7] BENEŠ, Petr a Luboš KREJČÍK. Koroze a konzervace. *MM spektrum* [online]. 2014. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/koroze-a-konzervace>
- [8] KREIBICH, Viktor a Karel HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Praha: Editační středisko ČVUT, 1991.
- [9] NOVÁK, Pavel. *Druhy koroze kovů*. Praha: Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT, 2005.
- [10] NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů*. Praha: Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Fakulta chemické technologie.
- [11] *Chemické prvky: Periodická tabulka prvků - Zinek* [online]. Praha: Přírodovědecká fakulta UK. Dostupné také z: <https://www.chemickeprvky.cz/prvek/zn/>
- [12] ROSS, Robert B. Zinc Zn. In: *Metallic Materials Specification Handbook* [online]. 1992, s. 614-615. ISBN 978-0-412-36940-7. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-3482-2_56
- [13] *Periodická tabulka prvků: Zinek* [online]. Dostupné také z: <https://www.tabulka.cz/prvky/ukaz.asp?id=30>

- [14] JIRÁSEK, J. Sfalerit - ZnS. In: *Rudní suroviny* [online]. 2006. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/rudy/sfalerit.html>
- [15] Hexagonal unit cell. In: *Shutterstock* [online]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-illustration/hexagonal-unit-cell-crystal-lattice-347363213>
- [16] *Mapa atmosferických korozních rychlostí zinku na území České republiky*. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven.
- [17] KREISLOVÁ, K., H. GEIPLOVÁ, I. SKOŘEPOVÁ, J. SKOŘEPA a D. MAJTÁS. *Nové mapy korozní agresivity České republiky* [online]. In: . Praha: SVÚOM, 2015 [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://www.sciendo.com/article/10.1515/kom-2015-0019>
- [18] ČSN EN ISO 9223. *Koroze kovů a slitin - Korozní agresivita atmosfér - Klasifikace, stanovení a odhad*. 2012.
- [19] *Corrosion of zinc coatings* [online]. Danderydsvägen: Nordic Galvanizers. Dostupné také z: <https://nordicgalvanizers.com/corrosion-of-zinc-coatings/>
- [20] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2009. ISBN 978-80-7043-668-1.
- [21] *Žárové zinkování: Odborné informace k tématu*. WIEGEL Verwaltung GmbH & Co, 2013.
- [22] SHIBLI, S.M.A., B.N. MEENA a R. REMYA. A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process. In: *Surface and Coatings Technology* [online]. Kerala, India: Department of Chemistry, University of Kerala, Kariavattom Campus, 2014, s. 210-215. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897214011980>
- [23] SZELAG, Petr a Michael BARTL. *Odmašťování v kyselém odmašťovací lázni a netoxické inhibitory moření*. *KONSTRUKCE: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 2011. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/odmastovani-v-kysele-odmastovaci-lazni-a-netoxicke-inhibitory-moreni/>

- [24] GAGNÉ, Martin, Frank E GOODWIN a Martin van LEEUWEN. *Conference: 9th International Symposium on Steel Bridges: Zinc coatings for sustainable steel bridges* [online]. Praha, 2018. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/342751453_Zinc_coatings_for_sustainable_steel_bridges
- [25] MARDERA, A.R. The metallurgy of zinc-coated steel. In: *Progress in Materials Science* [online]. 2000, s. 191-271. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079642598000061>
- [26] ALIBEIGI, S., R. KAVITHA, R.J. MEGUERIAN a J.R. MCDERMID. Reactive wetting of high Mn steels during continuous hot-dip galvanizing. In: *Acta Materialia* [online]. 2011, s. 3537-3549. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645411001212>
- [27] COTTEL, M, James A. SPRAGUE a Fred A. SMIDT, JR. *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering* [online]. 1994. ISBN 978-0-87170-384-2. Dostupné také z: https://docs.google.com/file/d/0B3Mrzn2Z7-tSUjRkTE9OcWhoM1E/edit?resourcekey=0-w2x_oPx6yG6Yna1gWMz7HA
- [28] Kontinuální zinkování s chromátováním. In: *Henan Jianhui Steel CO., LTD* [online]. Dostupné z: <http://m.jianhuissteel.com/gi-gl-steel/galvanized-steel-coil/0-14mm-0-6mm-hot-dipped-galvanized-steel-coil.html>
- [29] SU, Xuping, Nai.Yong TANG a Jim M. TOGURI. Thermodynamic evaluation of the Fe–Zn system. In: *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2001, s. 129-136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838801012737>
- [30] JI, Chang-Wook, Ilguk JO, Hyunju LEE, Il-Dong CHOI, Yang DO KIM a Yeong-Do PARK. Effects of surface coating on weld growth of resistance spot-welded hot-stamped boron steels. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/276092158_Effects_of_surface_coating_on_weld_growth_of_resistance_spot-welded_hot-stamped_boron_steels

- [31] CULCASI, J.D., P.R. SERÉ, C.I. ELSNER a A.R. DI SARLI. Control of the growth of zinc–iron phases in the hot-dip galvanizing process. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1999, 21-23. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/248235205_Control_of_the_growth_of_zinc-iron_phases_in_the_hot-dip_galvanizing_process
- [32] HORÁK, K., ČERNÝ, M., FILÍPEK, J., FAJMAN M.: Heat and mechanical resistance of zinc coating. *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun.*, 2010, LVIII, No. 4, pp. 49–56
- [33] OKAMOTO, Norihiko L., Masahiro INOMOTO, Hiroshi TAKEBAYASHI a Haruyuki INUI. Crystal structure refinement of the Γ - and Γ_1 -phase compounds in the Fe-Zn system and orientation relationships among α -Fe, Γ and Γ_1 phases in the coating layer of galvanized steel. In: *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2018, s. 52-63. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092583881733582X>
- [34] YEOMANS, Stephen R. *Galvanized Reinforcement in Bridge and Coastal Construction* [online]. 2019, 1591-1597. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/338335628_Galvanized_Reinforcement_in_Bridge_and_Coastal_Construction
- [35] POKORNÝ, Petr, Michaela KOSTELECKÁ, Nikola PRODANOVIC a Miroslav SÝKORA. Effect of calcium hydroxyzincate on bond strength of hot-dip galvanized plain bars with normal strength concrete. In: *Cement and Concrete Composites* [online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946522001330>
- [36] VERMA, A.R.B a W.J. VAN OOIJ. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 1. General description of coatings formed at 560 °C. In: *Surface and Coatings Technology* [online]. s. 132-142. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897296029416>
- [37] SCHULZ, W.D. *Frequent defects on hot-dip galvanized goods – causes and possibilities of prevention* [online]. 2013. Dostupné z: <https://sciendoc.com/pdf/10.2478/kom-2013-0010>
- [38] DURAN III, Bernardo A. *Flaking of Galvanized Coating* [online]. In: . American Galvanizers Association, 2011. Dostupné z: <https://galvanizeit.org/knowledgebase/article/flaking-of-galvanized-coating>

- [39] DURAN III, Bernardo A. *Most Common Appearance Concerns on HDG Steel* [online]. In: . American Galvanizers Association, 2013. Dostupné z: <https://galvanizeit.org/knowledgebase/article/most-common-appearance-concerns-on-hdg-steel>
- [40] Vzhled povlaků vytvořených žárovým pozinkováním ponorem. *MM spektrum: Nové trendy povrchových úprav* [online]. 2002. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vzhled-povlaku-vytvorenych-zarovym-pozinkovanim-ponorem>
- [41] *Tech Tips: What causes Delamination Of Galvanized Coatings*. 2013. Dostupné také z: <https://az276019.vo.msecnd.net/valmontstaging/docs/librariesprovider89/default-document-library/tech-tips-7---delamination.pdf>
- [42] KUKLÍK, Vlastimil. *Selected examples of hot dip galvanized coating delamination* [online]. 2013, 55-67. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305720080_Selected_examples_of_hot_dip_galvanized_coating_delamination
- [43] DURAN III, Bernardo A. *Peeling of Galvanized Coating* [online]. In: . American Galvanizers Association, 2011. Dostupné z: <https://galvanizeit.org/knowledgebase/article/peeling-of-galvanized-coating>
- [44] KUKLÍK, Vlastimil. Povlaky žárového zinku na pálených plochách. *Povrcháři* [online]. 2012, 2-7. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/201204_povrchari.pdf
- [45] PANOSSIAN, Z. a J.V. FERRARI. *Case Studies of Blistering Problems in Zinc-plated Steel and Zinc-plated Die-cast Zinc Alloy Parts* [online]. Dostupné z: <https://www.nmfr.org/pdf/psf2004/090448.pdf>
- [46] Kotoučové řezací zařízení Labotom-3. In: *Spectrographic* [online]. Dostupné z: <https://spectrographic.co.uk/products/refurbished-struers-labotom-3>

8 Seznam obrázků

Obrázek 1. Zleva Paul J. Malouin, A. Volta, L. Galvani [2; 3].....	10
Obrázek 2. Vlevo: Bodová koroze, Vpravo: Štěrbínová koroze [9].....	13
Obrázek 3. Vlevo: Zinková ruda sfalerit (ZnS). Vpravo: Hexagonální struktura zinku [14; 15].....	16
Obrázek 4. Korozní úbytek zinku v ČR [17].....	16
Obrázek 5. Pasivace a katodická ochrana ocelových konstrukcí [4].....	18
Obrázek 6. Bílá rez [19].....	19
Obrázek 7. Patina zinkového povlaku [19].....	20
Obrázek 8. Vliv koncentrace lázní HCl a H ₂ SO ₄ na rychlost moření [20].....	26
Obrázek 9. Princip moření a složení oxidů v okujích [4].....	27
Obrázek 10. Technologický postup žárového zinkování pro suchý proces [4].....	29
Obrázek 11. Schéma sledu operací u mokrého způsobu zinkování [4].....	30
Obrázek 12. Kontinuální proces zinkování s následným použitím chromátování [28]..	31
Obrázek 13. Binární diagram Fe-Zn [30].....	33
Obrázek 14. Přítomnost fází Γ a Γ_1 v povlaku lze prokázat pouze s velmi přesnými analytickými metodami [4].....	34
Obrázek 15. Struktura zinkového povlaku na oceli [34].....	35
Obrázek 16. Povlak po době ponoru 30 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4].....	37
Obrázek 17. Povlak po době ponoru 60 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4].....	37
Obrázek 18. Povlak po době ponoru 120 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4].....	37
Obrázek 19. Povlak po době ponoru 300 s, vlevo: a) ocel S235 (Si 0,012 %), vpravo: b) ocel S355 (Si 0,196 %) [4].....	37
Obrázek 20. Vlevo: oblast vysokoteplotního zinkování (modře).....	38
Obrázek 21. Fe-Zn krusta na tlustostěnných konstrukcích s vysokým obsahem křemíku [4].....	41
Obrázek 22. Řediny v povrchové struktuře oceli vzniklé difúzí [42].....	42
Obrázek 23. Delaminace povlaku tvořeného čistým zinkem [43].....	43
Obrázek 24. Drsný povrch zinkového povlaku vlivem primární delaminace [4].....	44
Obrázek 25. Radiální trhliny v zinkovém povlaku [4].....	44

Obrázek 26. Hrana páleného řezu [42]	45
Obrázek 27. Vrstva zinku na zaokujené oceli [42]	46
Obrázek 28. Železo-zinková slitina FeZn13	47
Obrázek 29. Rozvržení pro výrobu vzorků	48
Obrázek 30. Vlevo: zařízení Labotom-3, vpravo: uchycení vzorku ve svěráku [46]	49
Obrázek 31. Vlevo: frézka TOS FNGJ 20, Vpravo: průběh obrábění rovnoběžných ploch	50
Obrázek 32. Vytvořené vzorky pro měření teplotní roztažnosti	51
Obrázek 33. Ukázka měření vzorku A. pomocí mikrometru	52
Obrázek 34. Žíhací pec	52
Obrázek 35. Teplota z ovládacího panelu žíhací pece (150 °C)	53
Obrázek 36. Teplota z ovládacího panelu žíhací pece (350 °C)	53
Obrázek 37. Teplota z ovládacího panelu žíhací pece (550 °C)	54
Obrázek 39. Vlevo: vzorek G ochlazen ve vodě, vpravo: vzorek H ochlazován pozvolně	60
Obrázek 40. Makrosnímek vzorku G	61
Obrázek 41. Detail radiální trhliny a diskontinuity povlaku	61
Obrázek 42. Kombinace radiálně tangenciálních trhlin v povlaku	62
Obrázek 43. Struktura povlaku vzorku H	62

9 Seznam tabulek

Tabulka 1. Přehled vlastností zinku [12]	14
Tabulka 2. Korozní rychlost zinku podle stupně korozní agresivity podle ČSN EN ISO 9223 [18].....	17
Tabulka 3. Agresivita korozního prostředí v půdách [19]	21
Tabulka 4. Struktura vrstvy okují na oceli [4]	26
Tabulka 5. Přehled železo-zinkových slitinových fází [4; 32]	35
Tabulka 6. Vlastnosti železo-zinkové slitiny FeZn ₁₃	48
Tabulka 7. Technické parametry frézky	50
Tabulka 8. Počáteční délky l ₀ připravených vzorků	51
Tabulka 9. Výsledky měření při 150 °C	53
Tabulka 10. Výsledky měření při 350 °C	53
Tabulka 11. Výsledky měření při 350 °C	54
Tabulka 12. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti při 150 °C.....	55
Tabulka 13. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti při 350 °C.....	56
Tabulka 14. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti při 550 °C.....	57
Tabulka 15. Výsledné koeficienty teplotní roztažnosti pro vzorky A, B a C.....	58
Tabulka 16. Koeficienty teplotní roztažnosti vzorků s chybou měření	59
Tabulka 17. Prodloužení vzorků železo-zinkové slitiny FeZn ₁₃	59
Tabulka 18. Délky vzorků před začátkem experimentu	63
Tabulka 19. Výsledky měření a výpočtů v experimentu	63
Tabulka 20. Hodnoty pro výpočet orientačního koeficientu teplotní roztažnosti FeZn ₁₃	64

10 Seznam grafů

Graf 1. Prodloužení vzorků při 150 °C	55
Graf 2. Prodloužení vzorků při 350 °C	56
Graf 3. Prodloužení vzorků při 550 °C	57
Graf 4. Celkové prodloužení vzorků železo-zinkové slitiny FeZn ₁₃	59