



## **Bakalářská práce**

# **Stanovení vlivu deformace na korozní odolnost plechů s povlakem ZnMg**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Petr Jánský**

*Vedoucí práce:*

Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Stanovení vlivu deformace na korozní odolnost plechů s povlakem ZnMg

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Petr Jánský</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S19000045
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

### Zásady pro vypracování:

1. Ochranné povlaky používané pro hlubokotažné plechy v automobilovém průmyslu.
2. Základní principy technologie tažení, základní principy fotogrammetrie.
3. Pro zvolený materiál s ochranným povlakem ZnMg provést experimentální zjištění vlivu deformace na korozní odolnost.
4. Vyhodnocení.
5. Závěr.

*Rozsah grafických prací:* tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 30 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] DAVIES, Geoffrey. *Materials for Automobile Bodies*. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [2] TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes – machines – tools*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.
- [3] ASM HANDBOOK. Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [4] HOSFORD, W.F., CADDEL, R. *Metal Forming (Mechanics and Metallurgy)*. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007. s. 312. ISBN 978-0-521-88151-0.
- [5] TSCHAETSCH, H. *Metal Forming Practise (Processes Machines Tools)*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.
- [6] LUHMANN, T. et al. *Close Range Photogrammetry (principles, techniques and applications)*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-1870325-50-9.
- [7] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.
- [8] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich chování při svařování*. Ostrava. Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology, 2016.  
Kapitola 2.14.: Úvod do koroze. s. 242 – 255.  
Kapitola 2.23.6: Korozní zkoušky. s. 385 – 389.

*Vedoucí práce:* Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 27. února 2023

*Předpokládaný termín odevzdání:* 27. srpna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## **Název práce**

Stanovení vlivu deformace na korozní odolnost plechů s povlakem ZnMg.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá určením vlivu deformace na korozní odolnost plechu se zinkohořčíkovým povlakem ZnMg. Ten poskytuje výbornou protikorozní ochranu, ale vlivem tvrdosti tohoto povlaku dochází při procesech tváření k tvorbě trhlin. Povlak byl v práci srovnáván se zinkovým povlakem s NIT úpravou povrchu. V práci jsou popsány způsoby deformace vzorků, jejich urychlené korozní zkoušení a vyhodnocení korozní odolnosti za pomoci chemických analýz pořízených na elektronovém mikroskopu Tescan Mira 3.

## **Klíčová slova**

Protikorozní ochrana, povlak ZnMg, povlak NIT, urychlené korozní zkoušení, mikroskopické pozorování

## **Title**

Determination of the effect of deformation on the corrosion resistance of ZnMg coated sheets

## **Annotation**

This bachelor's thesis deals with the determination of the effect of deformation on the corrosion resistance of sheet metal with ZnMg coating. This coating provides excellent anti-corrosion protection, but due to the hardness of this coating, cracks are formed during the forming process. In this work, the coating was compared to the zinc coating with NIT surface treatment. The work describes methods of deformation of samples, their accelerated corrosion testing and evaluation of corrosion resistance with the help of chemical analyzes taken on a Tescan Mira 3 electron microscope.

## **Keywords**

Corrosion protection, ZnMg coating, NIT coating, accelerated corrosion testing, microscopic observation

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval především Ing. Martinu Švecovi, Ph.D. a doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za jejich připomínky, cenné rady, čas a ochotu, které mi velice pomohly při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat také Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za pomoc při realizaci experimentu. Také bych chtěl poděkovat své přítelkyni a rodině za jejich podporu nejen při studiu.

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teoretická část.....	11
2.1	Koroze.....	11
2.1.1	Rozdělení koroze.....	12
2.1.2	Způsoby protikorozní ochrany.....	14
2.2	Povlaky hlubokotažných plechů používané v automobilovém průmyslu .	16
2.2.1	Kovové povlaky .....	16
2.2.2	Anorganické povlaky .....	21
2.2.3	Organické povlaky .....	22
2.3	Základní principy technologie tažení.....	24
2.3.1	Nástroje .....	24
2.3.2	Napěťové stavy při procesech tažení .....	25
2.3.3	Technologické parametry tažení .....	26
2.4	Základní principy fotogrammetrie .....	27
2.4.1	Princip měření .....	28
2.4.2	Postup záznamu a vyhodnocení fotogrammetrických dat.....	30
3	Experimentální část .....	32
3.1	Použité metody .....	32
3.2	Příprava vzorků.....	35
3.3	Deformace vzorků jednoosým tahem .....	37
3.3.1	Deformace vzorků jednoosým tahem na určené hodnoty .....	39
3.4	Deformace vzorků víceosým tahem.....	39
3.4.1	Určení velikostí výšek tažení .....	41
3.4.2	Deformace vzorků víceosým tahem na určené hodnoty .....	42
3.5	Urychlené korozní zkoušení vzorků .....	43

3.6	Příprava vzorků k mikroskopickému pozorování .....	44
3.7	Mikroskopické pozorování vzorků .....	46
3.7.1	Snímky vzorků v nekorodovaném stavu .....	46
3.7.2	Snímky povlaků po 3 týdnech v solné komoře .....	51
3.7.3	Snímky vzorků po 6 týdnech v solné komoře .....	59
4	Diskuze výsledků .....	67
5	Závěr.....	69
6	Seznam použité literatury .....	70



## Seznam použitých zkratk a symbolů:

Označení	Význam	Jednotka
$A_{80}$	Celková tažnost	[%]
$A_g$	Homogenní tažnost	[%]
C	Hlavní vzdálenost	[mm]
EG	Electro galvanized	
$F_{krit}$	Kritická velikost tažné síly	[N]
FLC	Forming limit curve	
FLD	Forming limit diagram	
h	Vzdálenost objektu od objektivu	[mm]
H	Určená výška tažení	[mm]
HDG	Hot dip galvanized	
KTL	Katodforézní lakování	
m	Měřítka obrazu	
MKP	Metoda konečných prvků	
NIT	New Inorganic Treatment	
o	Obvod tažníku	[mm]
$O'$	Střed perspektivy	
P	Sledovaný bod	
$P'$	Obraz bodu	
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[mm]
$t_0$	Počáteční tloušťka materiálu	[mm]
X	Vzdálenost objektu v rovnoběžném směru od roviny obrazu	[mm]
$X'$	Vzdálenost objektu v rovině obrazu	[mm]
ZM	Zinkohořčíkový povlak	
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	[%]
$\sigma$	Napětí	[MPa]
$\varphi_1$	Hlavní deformace	
$\varphi_2$	Vedlejší deformace	
$\varphi_3$	Skutečné přetvoření	

# 1 Úvod

Jedním z největších faktorů ovlivňující životnost ocelových materiálů je koroze, ke které v přírodě běžně dochází vlivem atmosférických a dalších vlivů. Ta má za následek změnu jejich mechanických, vizuálních a chemických vlastností, což u některých výrobků z těchto materiálů může představovat obrovský problém. Jedním z těchto výrobků jsou karosářské díly automobilů vyráběné z hlubokotažných plechů, které do značné míry ovlivňují jejich prodejnost. Za účelem zvýšení korozní odolnosti těchto dílů, se na povrchy hlubokotažných plechů aplikují kovové povlaky na bázi zinku.

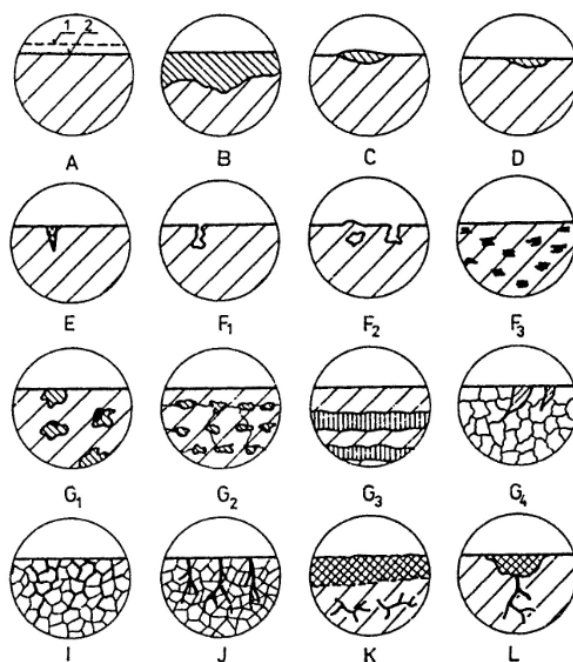
K zajištění co nejlepší protikorozní ochrany, které tyto povlaky poskytují, dochází k jejich neustálým inovacím. Jednou z těchto inovací je slitinový zinkohořčíkový povlak ZnMg, komerčně známý také jako ZM. Ten by chtěla do své výroby zařadit firma ŠKODA AUTO a.s. (dále jen „ŠKODA“), která je zadavatelem této bakalářské práce. ZM povlak oproti klasickému zinkovému povlaku poskytuje základnímu materiálu vyšší antikorozi ochranu. Nevýhodou tohoto povlaku je však křehkost vytvořené vrstvy, která má za následek tvorbu trhlin při procesech tváření. Vystává tak otázka, zdali tvorba těchto trhlin má vliv na korozní odolnost tohoto povlaku. Cílem této bakalářské práce je zodpovězení této otázky.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Koroze

Korozi lze definovat jako samovolně probíhající nevratný děj postupného narušování a znehodnocování materiálu chemickými nebo elektrochemickými vlivy prostředí, kdy se materiál rozkládá na podobné sloučeniny, ze kterých byl vyroben. Tímto jevem nejsou napadány pouze kovy a jejich slitiny, ale také plasty, keramické, sklovité, silikátové a jiné materiály. Na Obr. 1 lze vidět některé druhy korozního napadení. Korozi lze dělit dle následujících kritérií: [1,2]

- Dle charakteru korozních dějů: **chemická, elektrochemická**
- Dle prostředí: **korozie v atmosféře, ve vodě, v plynech, v půdě**



Obr. 1 Vybrané druhy korozního napadení [3]

A -rovnoměrné napadení (1- původní povrch, 2- povrch po napadení), B- nerovnoměrné napadení, C- skvrnité napadení, D- důlkové napadení, E- bodové napadení, F- podpovrchové napadení, G- selektivní napadení, I- mezikrystalové napadení, J- transkrystalové napadení, K- extrakční napadení, L- korozní trhliny

## 2.1.1 Rozdělení koroze

### Chemická koroze

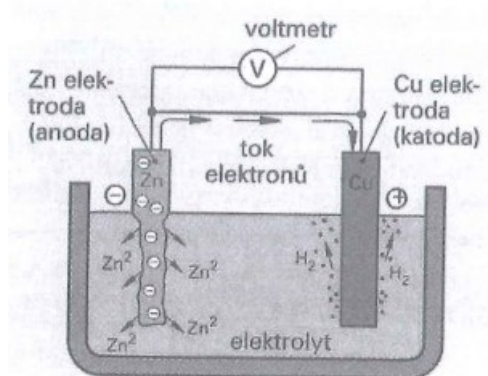
Chemická koroze probíhá za zvýšených teplot nejčastěji v plynném prostředí. Mechanismem tohoto druhu koroze je chemická reakce mezi materiálem a plynem. Typickým příkladem chemické koroze je oxidace, kdy se na povrchu materiálu vytvoří vrstva korozních produktů (oxidů). Příkladem může být oxidace uhlíkové oceli za vysokých teplot, která má za následek tvorbu okují. [2]

### Elektrochemická koroze

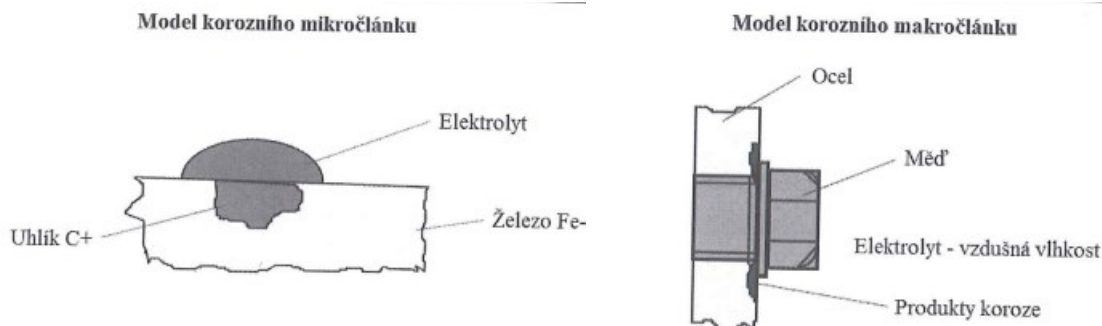
K elektrochemické korozi dochází v elektrolytech, tedy v kapalných roztocích kyselin, zásad a solí rozpustných ve vodě. Mechanismem této koroze je přenos elektrického náboje vlivem galvanického článku. Každá korozní reakce může být rozdělena na dvě na sobě závislé reakce: anodickou a katodickou. Schématické znázornění těchto reakcí je uvedeno na Obr. 2.

Anodická reakce probíhá na anodě a dochází při ní k oxidaci, respektive korozi kovu, kdy kationty přechází do roztoku, čímž anoda získává zápornější potenciál. Při katodické reakci dochází k přechodu přebytečných elektronů z anody na katodu, kde jsou v roztoku redukovány některé složky korozního prostředí (vybíjení iontů vodíku nebo redukce kyslíku). Obě tyto reakce probíhají současně a jsou na sebe vázány, kdy množství vzniklých elektronů na anodě je shodné s množstvím spotřebovaných elektronů na katodě.

Na základě elektrochemické koroze fungují korozní makročlánky (spojení dvou různých kovů) a mikročlánky (nehomogenní struktura materiálu) viz Obr. 3. [2, 3]



Obr. 2 Schéma anodické a katodické reakce [2]



Obr. 3 Schéma korozního mikročlánku a makročlánku [2]

Průběh elektrochemických reakcí ovlivňuje elektrodový potenciál, který charakterizuje elektrochemickou ušlechtilost kovů, tedy jejich snahu uvolňovat elektrony a přecházet do iontového stavu. Z korozního hlediska je významné seřazení kovů do řady podle jejich elektrochemické ušlechtilosti ( Tab. 1 ), kde nulu představuje potenciál vodíkové elektrody. Nejmenší korozní odolnost mají kovy s největším záporným potenciálem, naopak největší korozní odolnost mají kovy s největším kladným potenciálem. [2, 3]

Tab. 1 Standardní elektrodové potenciály vybraných kovů [3]

kov	potenciál / V /	kov	potenciál /V/
Sodík	- 2,71	Cín	- 0,14
Hořčík	- 1,55	Olovo	- 0,12
Hliník	- 1,33	Vodík	0,00
Zinek	- 0,76	Antimon	+ 0,20
Chrom	- 0,56	Měď	+ 0,34
Železo	- 0,44	Stříbro	+ 0,80
Kadmium	- 0,40	Rtuť	+ 0,86
Kobalt	- 0,29	Zlato	+ 1,36
Nikl	- 0,23		

### Koroze v atmosféře

Jedná se o nejrozšířenější druh koroze. Vzniká vlivem elektrochemických procesů v tenké vrstvě ( $5 \div 150 \mu\text{m}$ ) elektrolytu, která kondenzuje ze vzdušné vlhkosti na povrchu materiálu. Rychlost atmosférické koroze je závislá na přítomnosti kyslíku, stupni ovlhčení povrchu a na přítomnosti plynných nebo rozpustných nečistot. [2, 3]

### **Koroze ve vodě**

Jedná se o elektrochemickou korozi, která probíhá ve vodě s rozpuštěnými chemickými látkami kyselého i zásaditého vlivu. Významný vliv na rychlost koroze má také typ vody (sladká, poloslaná, slaná), obsah kyslíku v ní a její teplota. Dalším faktorem také může být přítomnost rostlin a živočichů. [2, 3]

### **Koroze v plynech**

Vzniká působením plynného prostředí na kovový materiál za vzniku chemických sloučenin. Probíhá za vysokých teplot a tlaků, a jedná se o chemickou korozi vyvolanou plyny oxidačního (kyslík, vodní pára) i redukčního (vodík) charakteru. [2, 3]

### **Koroze v půdě**

Jedná se o zvláštní případ koroze, protože půda je tvořená plynnou, pevnou i kapalnou fází. Základní význam má kapalná fáze, kterou tvoří vodný roztok s různým množstvím rozpuštěných plynů. Množství je závislé na druhu půdy. Dále mohou být kovové materiály napadány bludnými proudy a mikrobiální korozi (působení mikroorganismů). [2, 3]

## **2.1.2 Způsoby protikorozní ochrany**

Za účelem zvýšení životnosti výrobků se uplatňují způsoby protikorozní ochrany, které korozi zabrání úplně, případně ji zpomalí na přijatelnou hodnotu. V této kapitole jsou popsány některé způsoby protikorozní ochrany. [2]

### **Úprava korozního prostředí**

Úpravu korozního prostředí lze provést dvěma způsoby. Tím prvním je odstranění složek, které způsobují korozi. Příkladem může být použití vysoušedel, vyhřívání či větrání za účelem snížení relativní vlhkosti vzduchu. V případě parních zařízení je snaha o odstranění kyslíku a oxidu uhličitého z vody použitím fyzikálních nebo chemických metod.

Tím druhým způsobem je použití inhibitorů koroze. Jedná se o látky, které reakcí s korozním prostředím na povrchu materiálu vytvoří tenký film, který v daném prostředí zpomalí průběh koroze. [2, 3]

## **Elektrochemická ochrana**

Tento způsob ochrany je založen na záměrné změně elektroodového potenciálu kovu a složení korozního prostředí na rozhraní kov-elektrolyt. Toho se dosahuje průchodem stejnosměrného proudu chráněným povrchem. Tento způsob ochrany je možné dělit na katodickou a anodickou ochranu kovu. [2, 3]

### **- Katodická ochrana**

Katodické ochrany lze dosáhnout dvěma způsoby. Tím prvním je ochrana obětovnou anodou, která je vodivě spojena s chráněným povrchem. Tím dochází k její přednostní korozi a ochraně kovového povrchu. Jako anody se používají materiály o nižším elektroodovém potenciálu, než který má chráněný materiál. Pro ocel se používají anody vyráběné ze zinku, hliníku nebo manganu. Podmínkou použití této metody je, aby koroze anody neprobíhala příliš rychle a aby nedocházelo k její pasivaci.

Druhým způsobem je ochrana vnějším zdrojem proudu, který se používá pro ochranu ocelových objektů uložených v půdě (potrubí, ropovody). Ty jsou připojeny k vnějšímu zdroji stejnosměrného proudu jako katody. Aby nedocházelo k rychlému znehodnocení anody, používají se relativně málo rozpustné vodivé materiály. Těmi bývají grafit, titan, nebo korozivzdorné oceli. [2, 3]

### **- Anodická ochrana**

Tento způsob ochrany je použitelný pouze pro materiály, které průchodem proudu snadno vytváří pasivní vrstvu. Ta se v průběhu koroze obnovuje, a zpomaluje tak průběh koroze na přijatelnou hodnotu. Chráněné materiály se zapojují k vnějšímu zdroji proudu jako anoda. Tímto způsobem jsou chráněny nádrže z korozivzdorných a uhlíkových ocelí určené pro skladování kyselin. [2, 3]

## **Tvorba ochranných povlaků**

Jedná se o nejrozšířenější způsob ochrany kovových materiálů. Ta spočívá v tvorbě povlaku na kovovém povrchu, který tvoří bariéru mezi kovem a korozním prostředím. Ochranné vlastnosti takto vytvořeného povlaku závisí na jeho odolnosti v korozním prostředí, pórovitosti a přilnavosti k podkladu. V kapitole 2.2 jsou blíže popsány vybrané druhy povlaků. [2]

## **2.2 Pvlaky hlubokotažných plechů používané v automobilovém průmyslu**

V automobilovém průmyslu jsou hlubokotažné plechy hojně využívány k výrobě karosériových dílů, které musejí splňovat celou řadu požadavků. Kromě požadavků na základní mechanické vlastnosti musejí tyto díly plnit i další velmi důležité funkce. V první řadě se jedná o vysokou korozní odolnost, která ve velké míře ovlivňuje životnost karoserie. Musejí se dát bezproblémově zpracovávat, ať už různými metodami tváření nebo technologiemi spojování jako je svařování a lepení. A v neposlední řadě se tyto díly musejí dát perfektně lakovat, jelikož jsou nositeli designu automobilu a ve velké míře rozhodují o jeho prodejnosti. Z těchto důvodů se na hlubokotažné plechy aplikují pvlaky, které tyto požadavky pomáhají plnit. [4, 5]

### **2.2.1 Kovové pvlaky**

V automobilovém průmyslu se velice často používá kovový povlak na bázi zinku za účelem zvýšení korozní odolnosti. Pokovený materiál chrání tím, že tvoří elektrochemický článek zinek – ocel, a při porušení povlaku tak poskytuje oceli katodickou ochranu. Díky skutečnosti, že zinek má nižší elektrodový potenciál než železo, dochází k přednostní oxidaci zinkového povlaku, čímž chrání ocelový základ před korozí. Zinkové pvlaky se v praxi vyrábějí dvěma technologiemi, a to: [4]

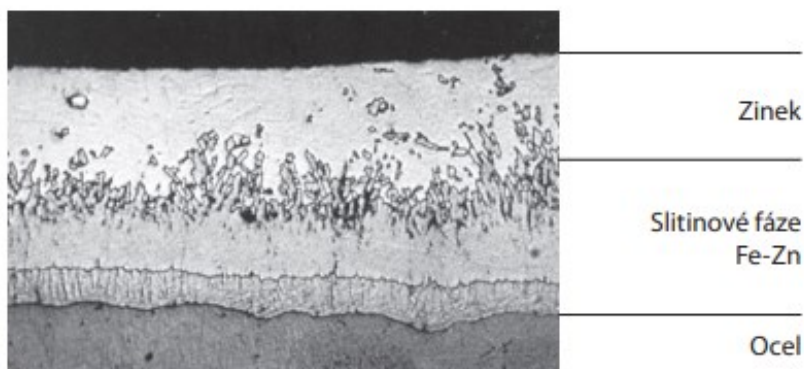
- **Žárovým zinkováním (HDG)**
- **Elektrolytickým zinkováním (EG)**

#### **Pvlaky tvořené žárovým zinkováním (HDG)**

Zinkový povlak vyráběný žárovým zinkováním je velmi rozšířený pro jeho jednoduchou a relativně levnou výrobu s možností automatizace. Výroba zinkového povlaku touto metodou začíná mechanickým odstraněním nečistot (rzi, okují), odmaštěním a mořením polotovaru za účelem zajištění čistoty povrchu. Následně je na materiál nanášeno tavidlo, které brání tvorbě oxidů a rozpouští oxidy na povrchu oceli a zinku, čímž dojde k přímému kontaktu obou kovů. Po těchto operacích následuje ponoření polotovaru do lázně s roztaveným zinkem o teplotě 440-470 °C. V lázni reaguje zinek s ocelí a na povrchu polotovaru vzniká



slitina Fe-Zn. Takto vzniká povlak tvořený z několika vrstev slitinových Fe-Zn fází, kdy obsah železa klesá se vzdáleností od ocelového základu viz Obr. 4. [1, 5]

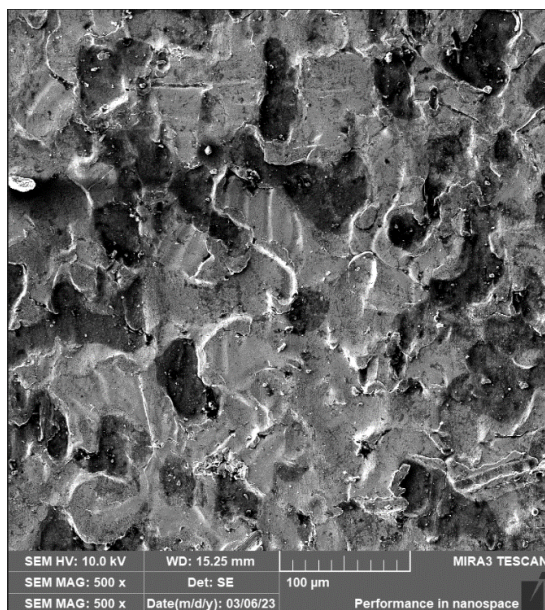


Obr. 4 Řez povlaku tvořeným HDG metodou [1]

Přidáním legujících prvků do lázně s roztaveným zinkem je možné dosáhnout zlepšení některých vlastností výsledného povlaku.

#### - Povlak NIT

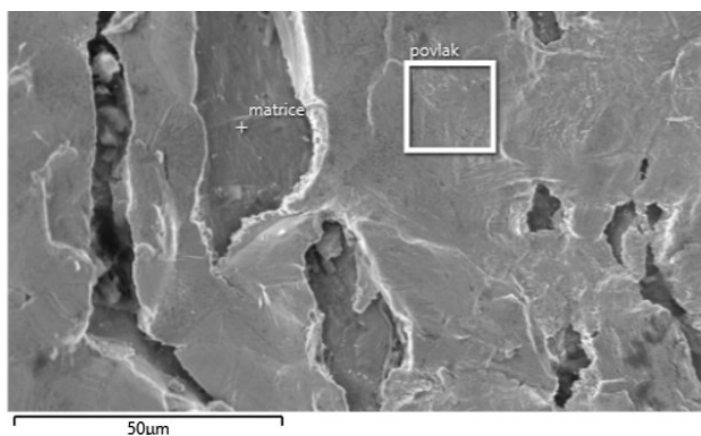
Za účelem snížení tření při hlubokém tažení karoseriových dílů se povrch polotovaru upravuje jemným drezírováním nebo tryskáním. Díky této úpravě je povrch polotovaru schopen pojmout větší množství maziva a zlepšit tak třecí podmínky. Další alternativou povrchové úpravy je aplikace povlaku s obchodním označením NIT (New Inorganic Treatment). Do zinkovací vany se přidává malé množství síranu zinečnatého ( $ZnSO_4$ ), známého také jako bílá skalice. Ta ze svých roztoků krystalizuje jako heptahydrát. Je to bezbarvá krystalická látka, která na vzduchu zvětrává. Přidáním této látky do zinkovací vany dojde k tvorbě tenké vrstvy na povrchu zinkového povlaku, která lépe absorbuje aplikované mazivo viz Obr. 5. [4, 5]



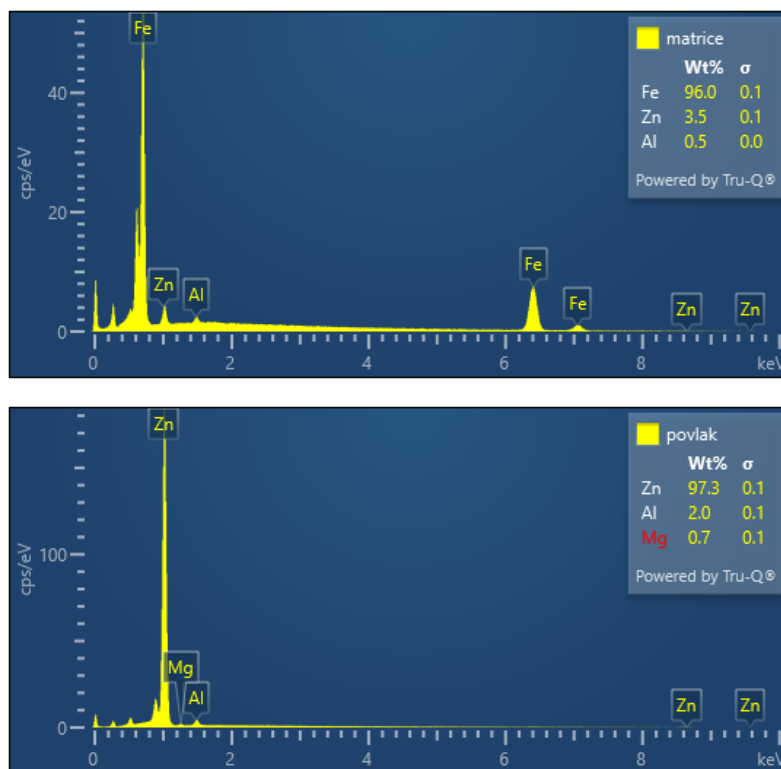
Obr. 5 Žárový zinkový povlak s NIT úpravou povrchu

#### - Povlak ZM

Korozní odolnost zinkového povlaku je možné zlepšit příměsí hořčíku. Ten výrazně zlepšuje korozní odolnost materiálu při působení jak atmosférického, tak i solného prostředí. Vzniklý povlak je tvořený slitinou Zn-Mg, označovaný jako ZM. Chemické složení tohoto zinkohořčíkového povlaku představuje 1-3 Wt% hliníku, 1-4 Wt% hořčíku a zbytek zinkového obsahu viz Obr. 7. Legování hliníkem má za následek tvorbu mezivrstvy v povlaku, která také přispívá k ochraně ocelové matrice. Tento druh povlaku má oproti klasickému zinkovému povlaku vyšší korozní odolnost, lepší svařitelnost a díky vyšší tvrdosti i větší otěruvzdornost. Na druhou stranu není tento povlak kvůli křehkosti vzniklé vrstvy vhodný pro tváření složitě náročných dílů viz Obr. 6. [4, 5]



Obr. 6 Poškozený ZM povlak [6]



Obr. 7 Chemická analýza poškozeného povlaku ZM [6]

#### - Povlak Zn-Mn

Další možností zlepšení korozní odolnosti zinkového povlaku je jeho legování manganem (1,2 Wt%). Ten poskytuje 65% zvýšení korozní odolnosti oproti klasickému zinkovému povlaku, při zachování tvářitelnosti a adheze povlaku k základnímu materiálu. Komplikací při tvorbě tohoto povlaku je vysoká teplota tavení manganu (1 246 °C) v porovnání se zinkem (419,5 °C). Další problém při výrobě tohoto povlaku nastává při odebrání polotovaru z lázně, kdy dochází k okamžité oxidaci manganu, což má za následek tvorbu neestetických skvrn viz Obr. 8. Za účelem eliminace tohoto jevu se do slitiny Zn-Mn přidává příměs hliníku (0,2 Wt%). Hliník má větší záporný elektroodový potenciál než zinek a mangan, čímž dochází k jeho prvotní oxidaci a brání tak tvorbě skvrn viz Obr. 9. [7]



Zn-1.2Mn

Obr. 8 Barevné skvrny na povlaku ze slitiny Zn-Mn [7]

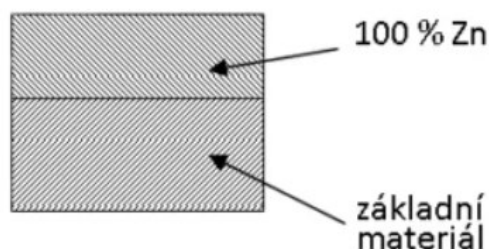


Zn -0.2Al  
-1.2Mn

Obr. 9 Povlak s příměsí hliníku bez barevných skvrn [7]

### Povlaky tvořené galvanickým zinkováním (EG)

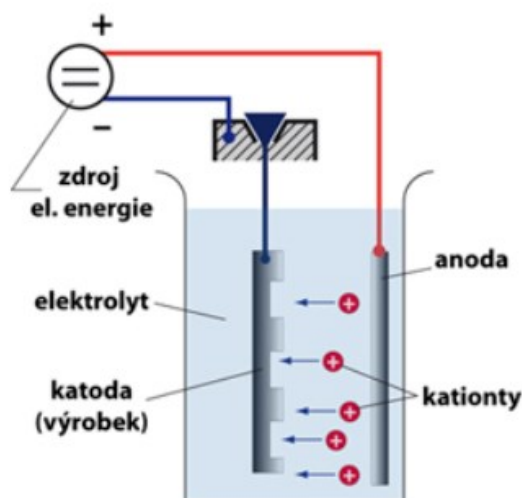
Metoda galvanického zinkování umožňuje vytvářet chemicky čistou vrstvu povlaku (Obr. 10) s kontrolovanou tloušťkou, která je konstantní po celé ploše materiálu. Proces galvanického zinkování nijak neovlivňuje mechanické vlastnosti základního materiálu a vzniklý zinkový povlak se vyznačuje velmi dobrou tvářitelností, tudíž je vhodný k hlubokému tažení. Jakost a morfologie zinkového povlaku nanášeného tímto způsobem je značně ovlivněna kvalitou podkladového materiálu. [5]



Obr. 10 Schématické znázornění zinkového povlaku tvořeným EG metodou [5]

Proces galvanického zinkování začíná předúpravou povrchu, která spočívá v odmaštění a následném moření plechu. Následně je plech ponořen do elektrolytu (kyselá nebo alkalická lázeň s rozpuštěnými zinkovými solemi), který je zapojený jako katoda, a plát čistého zinku, který je zapojen jako anoda. Při procesu galvanického zinkování se používá

zdroj stejnosměrného napětí. Po zapojení elektrického proudu dochází k uvolňování kationtů zinkového plátu (anoda), které se vylučují na pokoveném plechu (katoda) viz Obr. 11. [3, 8]



Obr. 11 Schéma galvanického pokovení [8]

## 2.2.2 Anorganické povlaky

Anorganické povlaky se používají zejména ke zvýšení korozní odolnosti, přilnavosti organických povlaků, nebo jako povrchová úprava před procesem tváření za studena za účelem snížení tření mezi polotovarem a nástrojem. [3]

### Fosfátování

Fosfátování je jedním z nejrozšířenějších způsobů chemické úpravy povrchu s velmi širokým využitím. Výroba fosfátové vrstvy začíná předúpravou povrchu, tedy mechanickým odstraněním nečistot, odmaštěním a následným mořením. Po těchto úpravách se materiál ponoří do fosfátovací lázně, kde kovový povrch reaguje s fosfatizačním roztokem. Na povrchu pak vzniká vrstva nerozpustných krystalických fosforečnanů. Díky přidaným urychlovačům (dusičnany, dusitany, chlornany) do fosfátovací lázně celý proces probíhá po dobu 5-10 minut za teplot 50-60 °C. Výsledkem této metody je nerozpustná pórovitá vrstva, kterou tvoří krystaly fosforečnanů (zinku, železa nebo manganu). Vzniklá vrstva má malou pevnost a není vhodná jako finální úprava povrchu.

Má-li být fosfátování použito jako dodatečná protikorozní ochrana, je nutno výslednou vrstvu dodatečně impregnovat konzervačními přípravky (oleje, vosky). Fosfátování se také velmi často používá jako povrchová úprava před tvářením za studena, kdy porézní

fosfátová vrstva absorbuje velké množství maziva, a dochází tak ke snížení tření mezi nástrojem a polotovarem. Objem absorbovaného maziva závisí na tloušťce vrstvy. Fosfátové vrstvy se také velmi hojně využívají jako podklad pod organické nátěry z důvodu zlepšení jejich přilnavosti k základovému povrchu. Pro tyto účely není vhodné používat tlusté fosfátové vrstvy, jelikož by mohlo docházet k uvolňování jednotlivých krystalů. Za tímto účelem se používají jemnozrnné tenké vrstvy. Těch se dosahuje úpravou složení fosfátovací lázně a takzvanou aktivací povrchu před samotným procesem. [3]

## **Chromátování**

Chromátování je nejrozšířenější způsob pasivace. Hojně se využívá za účelem zvýšení korozní odolnosti oceli i zinkových povlaků pasivačním účinkem chromových sloučenin. Chromátování lze využít i k tvorbě mezivrstvy pod organické nátěry, která zvyšuje jejich přilnavost a zamezuje pronikání korozního média pod nátěr. Jedná se o levnější metodu než fosfátování. Pasivace touto metodou může probíhat v lázních alkalického nebo kyselého typu, které bývají nejčastější.

Lázně kyselého typu obsahují jako základní složku sloučeniny šestimocného chromu, aktivátory a kyseliny stabilizující hodnotu pH lázně, která se pohybuje v rozmezí pH 1 až 2.5. Plech se nejprve podrobí předúpravám povrchu (odmaštění, moření) a následně se ponoří do lázně. Zde reaguje kovový povrch s šestimocným chromem ( $\text{Cr}^{+6}$ ), který se částečně redukuje na trojmocný chrom ( $\text{Cr}^{+3}$ ) za vzniku vrstvy. Tu tvoří směs sloučenin chromu a základního kovu. Tloušťka této vrstvy ovlivňuje výslednou barvu povlaku. Ta může být čirá, jasně modrá, žlutě irizující, olivová, hnědá nebo černá. Nevýhodou této metody je agresivita některých chromátovacích lázní, která může mít následek částečné odleptání již vytvořených povlaků. [3, 9]

### **2.2.3 Organické povlaky**

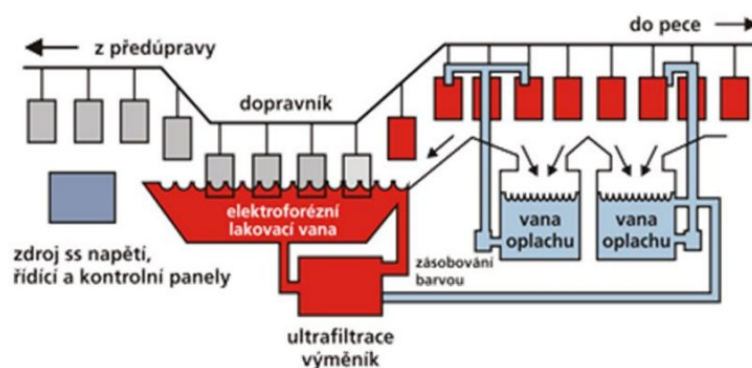
Organické povlaky tvořené nátěrovými hmotami poskytují plechu korozní odolnost, která je založena především na bariérovém způsobu, kdy povlak nepropustí korozní médium k povrchu plechu. Jelikož povlaky tvořené tímto způsobem nejsou nikdy bezpórovité, je tento účinek doplňován inhibičními látkami, které korozní médium zadrží. Organické nátěrové hmoty jsou nejstarším a stále nejekonomičtějším způsobem tvorby ochranných povlaků nejen pro svůj poměrně vysoký ochranný účinek, ale také díky jednoduché výrobě a dostupnosti. Existuje mnoho technologií nanášení nátěrových hmot. V automobilovém průmyslu

je ale nejpoužívanější elektrochemický způsob nanášení s katodickým zapojením lakovaného výrobku. Tato varianta je označována jako katoforézní lakování. [3, 10]

### Katoforézní lakování (KTL)

Katoforéza je ekologický, hospodárný a technologicky nejmodernější způsob lakování, který se používá pro ocelové, hliníkové i pozinkované výrobky. Pro katoforézní lakování se používají kationické nátěrové hmoty na bázi epoxidů nebo akrylátů, které jsou rozpustné ve vodě. Tyto nátěrové hmoty mají velmi nízký obsah organických rozpouštědel s obsahem částic laku, které tvoří polymerní kationty. Pro zajištění dobré přilnavosti výsledné vrstvy a zvýšení korozní odolnosti v případě porušení laku se na plechy před katoforézou aplikují povlaky tvořené fosfátováním s následnou pasivací.

Při katoforézním lakování je výrobek zapojen jako katoda a ponořen do lakovací lázně. Anodu tvoří kovová vana. Působením stejnosměrného elektrického pole, které vzniká vlivem umístění stejnosměrného napětí mezi katodu a anodu, jsou částice nátěrové hmoty přitahovány ke katodě. Zde dochází k tvorbě povlaku. S rostoucí tloušťkou vrstvy také stoupá elektrický odpor pokryté části povrchu, čímž klesá rychlost vylučování. Ze stejného důvodu také dochází k posunu elektrického silového pole na plochy s nižším odporem, což má za následek vytvoření stejnoměrné vrstvy po celém povrchu i na tvarově složitějších výrobcích. Po dosažení určité tloušťky povlaku, která je dána velikostí napětí, se další vylučování zastaví. Katoforézou se vyrábí vrstvy o tloušťce 15-30  $\mu\text{m}$ , při extrémních požadavcích až 45  $\mu\text{m}$ . Po následném oplachu přebytečného laku se vzniklá vrstva vypaluje při teplotách 160-180  $^{\circ}\text{C}$ , čímž dojde k polymeraci povlaku. Tuto metodu lze využít k výrobě základních i finálních nátěrů. Na Obr. 12 lze vidět Schématické znázornění KTL procesu. [3, 11]



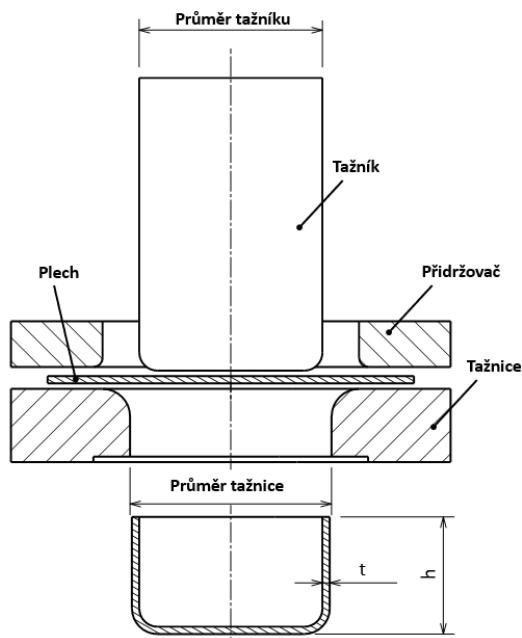
Obr. 12 Schématické znázornění KTL procesu [10]

## 2.3 Základní principy technologie tažení

Technologie tažení se řadí mezi technologie plošného tváření kovů. Provádí se nejčastěji za studena, kdy vlivem průvodních jevů tváření dochází ke zlepšení kvality výtažků. Touto technologií tváření se z rovinného přístřihu plechu vyrábějí prostorové výtažky zpravidla nerozvinutelného tvaru, které se dále již nezpracovávají, pouze se ostříhují. Z toho důvodu má technologie tažení velký význam pro hromadnou a sériovou výrobu. Aby při procesu tváření nedocházelo k porušení materiálu, jsou používány polotovary z materiálů s vysokou tažností (hlubokotažné plechy). Touto technologií je možné vyrábět výtažky rotačních, nerotačních tvarů a složité nepravidelné tvary. [12, 13]

### 2.3.1 Nástroje

Technologie tažení se provádí s použitím tažných nástrojů, které se nazývají tažidla. Ty se skládají z tažníku, tažnice, popřípadě také z přidržovače viz Obr. 13. Při procesu tažení je rovinný plechový přístřih vtahován tažníkem do tažnice, čímž dochází k přesunu materiálu a vzniku výtažku. Tažné nástroje se dělí na jednoduché, postupové, sdužené a sloučené. Dále je možné rozdělení podle charakteru operace na nástroje pro první a další tahy, a dle druhu lisu na nástroje pro jednočinné, dvojčinné a postupové lisy. [12, 13]



Obr. 13 Konstrukční provedení jednoduchého tažidla [12]

V průběhu procesu tažení není k vytvoření výtažku využito veškeré množství materiálu z přístřihu viz Obr. 14. Tento přebytečný materiál se v průběhu tažení může začít



pěchovat mezi tažníkem a tažnicí, což má za následek zvlnění přístřihu a možné utržení dna. Za účelem eliminace tohoto jevu se používají přídržovače, které brzdí vtahování materiálu a zabráňují tak vlnění. Po provedení operačního zdvihu přídržovač zároveň nabývá funkce stíracího prvku, kdy zhotovený výtažek sejme z tažníku. Pro výrobu hlubokých a složitějších výrobků je použití přídržovače nutností. Tažení mělkých a jednoduchých výtažků s velikou tloušťkou stěny je možné provádět i bez přídržovače. [12, 13, 14]

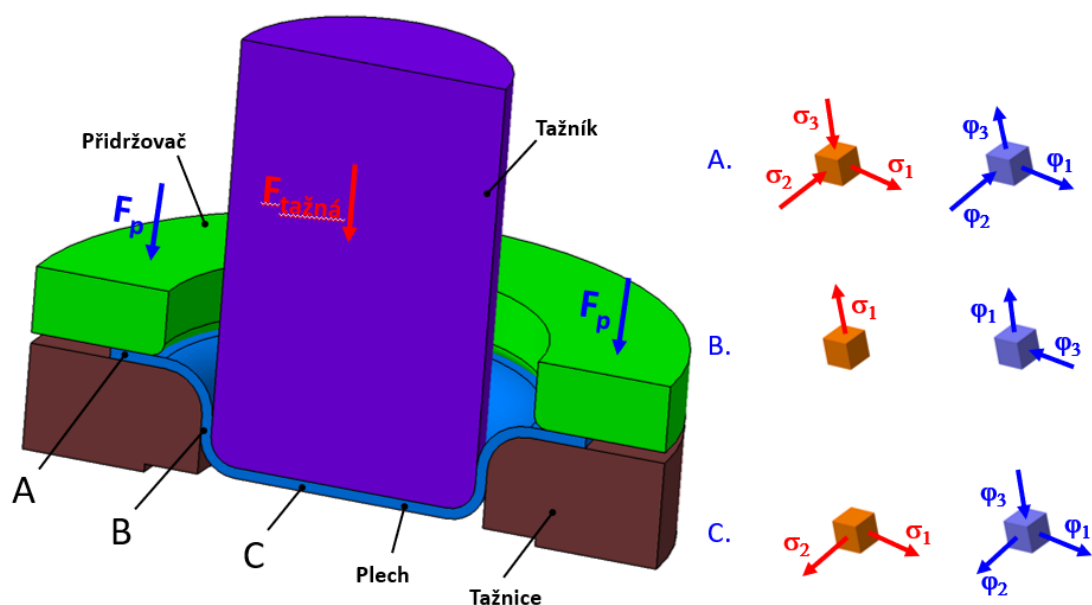


Obr. 14 Přístřih pro válcový výtažek s vyznačenou oblastí přebytečného materiálu

[12]

### 2.3.2 Napět'ové stavy při procesech tažení

Při procesu tažení se v polotovaru vlivem tažné síly tvoří napětí, respektive deformace viz Obr. 15. V oblasti příruby pod přídržovačem (A) je prostorová napjatost, kterou tvoří radiální tahové napětí  $\sigma_1$ , tečné tlakové napětí  $\sigma_2$  a tlakové napětí od přídržovače  $\sigma_3$ , které je velmi malé a někdy se zanedbává. V oblasti stěny výtažku (B) se nachází jednoosá, tahová napjatost, tvořená radiálním napětím  $\sigma_1$ . Dochází zde ke ztenčení materiálu a prodloužení stěny ve směru tažné síly. Zeslabení stěny je možné regulovat správným nastavením přídržovací síly přídržovače. Díky zákonu zachování objemu přebytečný materiál (Obr. 14) kompenzuje toto zeslabení. V oblasti dna (C) je dvouosá napjatost, tvořena radiálním napětím  $\sigma_1$  a tečným napětím  $\sigma_2$ . Ta je z důvodu velkého tření mezi tažníkem a tažnicí velmi malá a z tohoto důvodu také v této oblasti nedochází k výrazné deformaci. V oblasti přechodu stěny výtažku na dno dochází k největšímu zeslabení a nejčastěji i k utržení dna. To hrozí při nesprávném navržení přídržovací síly. Pokud je tato síla příliš velká nedochází k vtahování materiálu, což má za následek velké zeslabení stěny a následné utržení. Stejně tomu je, pokud je síla navržena příliš malá. V tom případě dochází k tvorbě zvlnění materiálu, který se následně vtáhne do nástroje a výtažek se tím utrhne. [12]



Obr. 15 Schéma napětí a deformací při procesu tažení [12]

### 2.3.3 Technologické parametry tažení

K výrobě kvalitních výtažků s požadovanou přesností je potřeba správného navržení technologických parametrů. Pro výrobu složitých nepravidelných výtažků se tyto parametry navrhují s využitím MKP analýz. V případě výroby jednoduchých tvarů se tyto parametry dají určit výpočtem.

Výpočet začíná určením tvaru a velikosti přístříhu, při kterém se vychází ze zákona zachování objemu, kdy objem přístříhu musí být shodný s objemem výlisku. Případně se dá uvažovat konstantní tloušťka plechu v průběhu tváření, v tom případě se vychází z rovnosti ploch. K takto určenému rozměru se ještě přidává přídavek na ostřížení.

Aby při výrobě úzkých, vysokých výtažků nedošlo vlivem tření k porušení materiálu, jsou vyráběny na více tahů. K určení počtu tahů potřebných k výrobě takového výrobku se určuje tak zvaný koeficient tažení, respektive stupeň tažení. Ten závisí na druhu a kvalitě plechu a jeho poměrné tloušťce, konstrukci nástroje, způsobu mazání, technologických podmínkách a mechanických vlastnostech materiálu.

Dalším technologickým parametrem, který je potřeba určit, je velikost tažné mezery. Ta se s ohledem na toleranci tloušťky výtažku a snížení tažné síly volí větší, než je tloušťka plechu. Pro první tah se velikost tažné mezery volí větší o 20÷30%, pro další tahy se volí větší o 10÷20% a pro kalibrační tažení se volí nulová nebo záporná velikost. Je-li velikost

tažné mezery navržena příliš malá, dochází k nárůstu tažné síly a hrozí nebezpečí poškození výtazku. V opačném případě může docházet ke zvlnění stěn výtazku.

Dále je možné určit velikost tažné síly. Ta slouží především k ověření realizovatelnosti výroby na dostupných lisech. Tato síla se skládá ze tří složek: síly nutné k plastické deformaci příruby, síly potřebné k ohybu na tažné hraně a ze síly potřebné k překonání tření. Jelikož skutečná velikost tažné síly závisí na skutečném napětí ve výtazku, které se v průběhu tažení mění, používá se proto zjednodušený výpočet: [12, 15]

$$F_{\text{krit}} = o * t_0 * R_m \quad (1)$$

Kde značí:	$F_{\text{krit}}$	Kritická velikost tažné síly [N],
	$o$	Obvod tažníku [mm],
	$t_0$	Počáteční tloušťka materiálu [mm],
	$R_m$	Mez pevnosti v tahu [MPa].

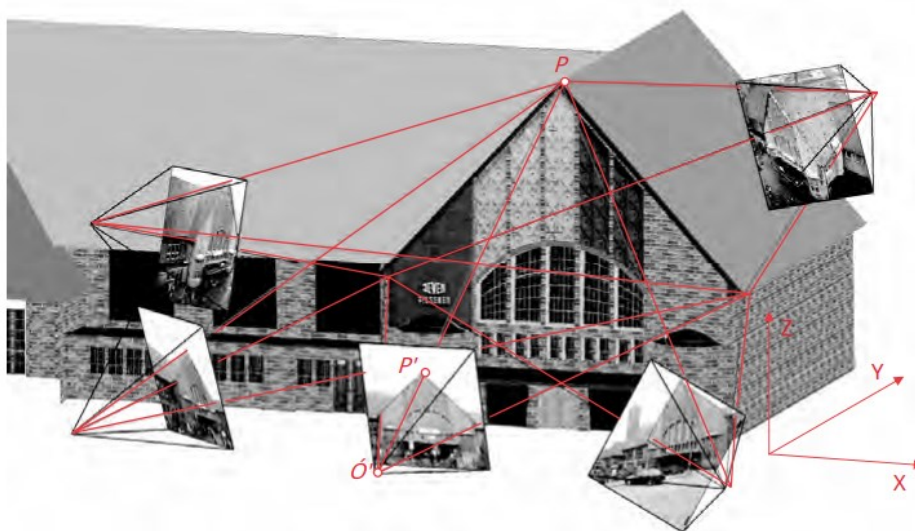
## 2.4 Základní principy fotogrammetrie

Fotogrammetrie je bezkontaktní metoda používaná k měření rozměrů, odvození geometrie a polohy 3D objektu ze zaznamenaných fotografií. Tuto metodu lze využít prakticky kdekoliv, kde jsme schopni zkoumaný objekt vyfotografovat. Fotogrammetrie byla z počátku využívána zejména k tvorbě kartografických map a průzkumu terénu. S rozvojem dostupných digitálních fotoaparátů se fotogrammetrie dále rozšířila i do dalších odvětví jako je například stavebnictví, automobilový a letecký průmysl, medicína a ekologie. Fotogrammetrii lze rozdělit dle několika aspektů. Těmi hlavními jsou: [16, 17]

- Dle polohy kamery vzdálenosti objektu:
  - **Družicová, Letecká, Pozemská, Blízká**
- Dle počtu snímků měření:
  - **Jednosnímková, Stereofotogrammetrie, Vícesnímková**
- Dle způsobu záznamu a zpracování snímků:
  - **Letecká stolní, Analogová, Digitální, Videogrammetrie**
- Dle dostupnosti výsledků měření:
  - **Real-time, On-line, Off-line**

### 2.4.1 Princip měření

Základním principem fotogrammetrického měření je matematický model, využívající centrální projekci viz Obr. 16. Tvar a pozici pozorovaného objektu lze určit rekonstrukcí obrazových paprsků. Obrazový paprsek je dán spojnici středu perspektivy  $O'$  (objektiv kamery) a obrazového bodu  $P'$ . Tento paprsek v prostoru určuje směr k odpovídajícímu bodu objektu  $P$ . K určení přesné polohy sledovaného bodu  $P$  v prostoru je zapotřebí minimálně 2 obrazových paprsků. Ta je pak dána jejich průsečíkem. Zároveň musí být známa vnitřní geometrie kamery a vnější geometrie kamery, tedy její pozice v prostoru sledovaného objektu. [16]

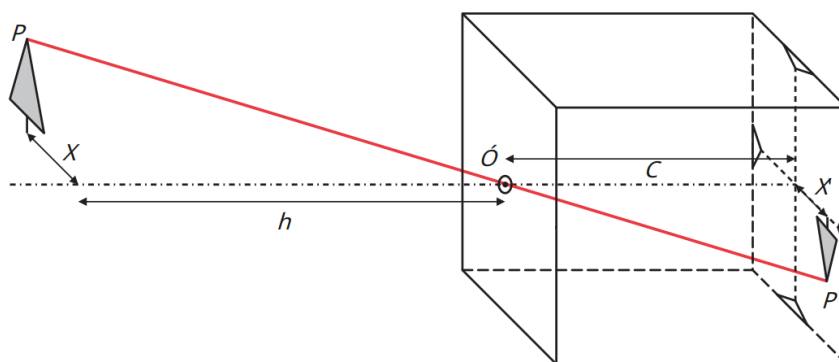


Obr. 16 Princip fotogrammetrického měření [16]

Vnitřní geometrii kamery lze reprezentovat na zjednodušeném modelu dírkové kamery viz Obr. 17. Nejdůležitějším místem tohoto modelu je střed perspektivy  $O'$ , kterým procházejí všechny obrazové paprsky. Nejdůležitějším parametrem vnitřní geometrie kamery je pak hlavní vzdálenost  $C$ . Ta definuje vzdálenost středu perspektivy od roviny obrazu. Základní vlastností fotogrammetrického obrazu je měřítko obrazu. To je definováno vztahem mezi vzdáleností objektu  $h$  a hlavní vzdáleností  $C$ , případně je pak definováno vztahem mezi vzdáleností objektu  $X$  v rovnoběžném směru od roviny obrazu a příslušnou vzdáleností  $X'$  v rovině obrazu. Tato vlastnost rozhoduje o rozlišení obrazu a tím i o přesnosti fotogrammetrického měření. [16]

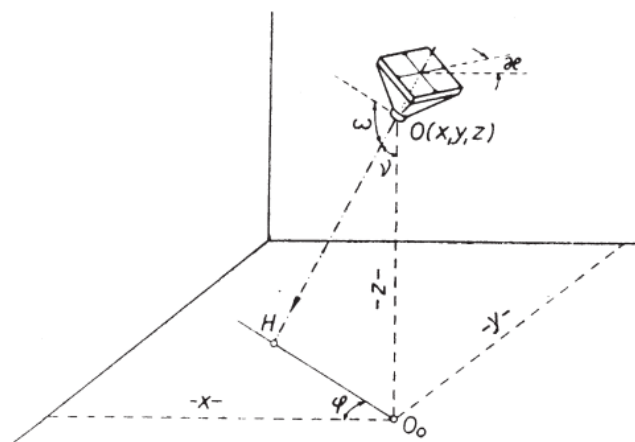
$$m = \frac{h}{C} = \frac{X}{X'} \quad (2)$$

- Kde značí:
- h   Vzdálenost objektu od středu perspektivy [mm],
  - C   Hlavní vzdálenost [mm],
  - X   Vzdálenost objektu v rovnoběžném směru od roviny obrazu [mm],
  - X'   Vzdálenost objektu v rovině obrazu [mm].



Obr. 17 Model dírkové kamery [16]

Pozici kamery, tedy i pozici obrazových paprsků, v prostoru sledovaného objektu lze vyjádřit šesti prvky vnější orientace viz Obr. 18. Jsou jimi tři prostorové souřadnice  $x$ ,  $y$  a  $z$ , které určují pozici středu perspektivy v prostoru a tři prostorové úhly  $\nu$ ,  $\omega$  a  $\varkappa$ . Ty určují pootočení osy záběru v prostoru. K určení těchto parametrů je zapotřebí kalibrace kamery objektem s pevně danými a známými globálními souřadnicemi. [16, 18]

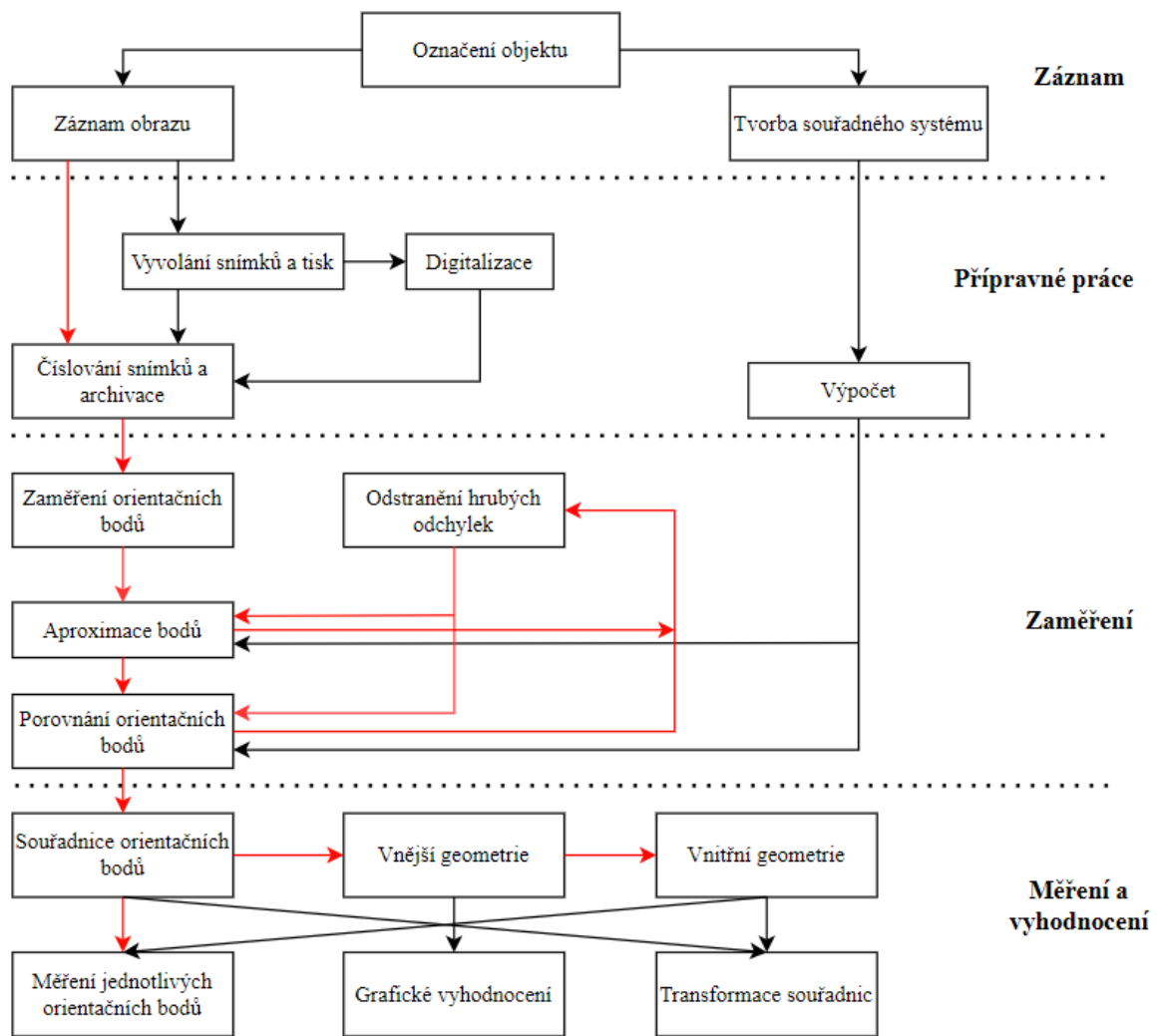


Obr. 18 Pozice kamery v prostoru [18]

## 2.4.2 Postup záznamu a vyhodnocení fotogrammetrických dat

Postup záznamu a vyhodnocení fotogrammetrických dat lze vidět na Obr. 19, kde červené šipky znázorňují zpracování dat získaných digitálním systémem. Postupy záznamu a vyhodnocení jsou stručně shrnuty v následujících částech. [16]

- **Nahrávání:**
  - **Označení objektu:** Označení měřeného objektu orientačními body za účelem větší přesnosti měření a lepší automatizace.
  - **Tvorba souřadného systému:** Vytvoření globálního souřadného systému pro měřený objekt definicí referenčních bodů nebo délek.
  - **Záznam obrazu:** Záznam obrazu digitálním nebo analogovým fotogrammetrickým systémem.
- **Přípravné práce:**
  - **Výpočet:** Výpočet souřadnic referenčních bodů nebo délek.
  - **Vyvolání snímků a tisk:** V případě analogového záznamu.
  - **Digitalizace:** Digitalizace analogového záznamu skenováním.
  - **Číslování snímků a archivace**
- **Zaměření:**
  - **Zaměření orientačních bodů:** Identifikace a měření orientačních a spojujících bodů (stejně body sledované na více snímcích)
  - **Aproximace:** Výpočet přibližných (počátečních hodnot) orientačních bodů
  - **Porovnání orientačních bodů:** Výpočet parametrů vnitřní a vnější orientace obrazových paprsků příslušných orientačních bodů a jejich srovnání pro jednotlivé snímky.
  - **Odstranění hrubých odchylek**
- **Měření a vyhodnocení**
  - **Měření jednotlivých orientačních bodů:** Tvorba 3D souřadnicí orientačních bodů objektu pro další numerické zpracování.
  - **Grafické vyhodnocení:** Tvorba zmenšenin map nebo plánů.
  - **Transformace souřadnic:** Tvorba transformovaných obrazů nebo obrazových mozaik, které odstraňují efekt natočení od referenční roviny.



Obr. 19 Schématické znázornění postupu záznamu a vyhodnocení dat [16]

### 3 Experimentální část

Cílem experimentální části této bakalářské práce bylo stanovení vlivu deformace na korozní odolnost plechů s povlakem ZnMg. K tomu byly použity dva hlubokotažné plechy ze stejného materiálu o tloušťce 0,7 mm. Hlubokotažný plech CR 180BH – ZM 40/40 E-O od výrobce Voest Alpine, který byl opatřen povlakem ZM, a hlubokotažný plech CR 180BH GI40/40-E-O+NIT od výrobce ArcelorMittal opatřený povlakem NIT. Oba tyto polotovary byly dodány firmou ŠKODA.

Řešení experimentu, které bylo v této bakalářské práci použito, lze shrnout do několika bodů:

- Příprava vzorků k jejich deformaci jednoosým a víceosým tahem.
- Deformace vzorků jednoosým tahem.
- Deformace vzorků víceosým tahem.
- Urychlené korozní zkoušení vzorků korozním testem PV 1210.
- Hodnocení vlivu deformace na korozní odolnost povlaků pomocí chemických analýz povrchů a metalografických výbrusů vzorků.

#### 3.1 Použité metody

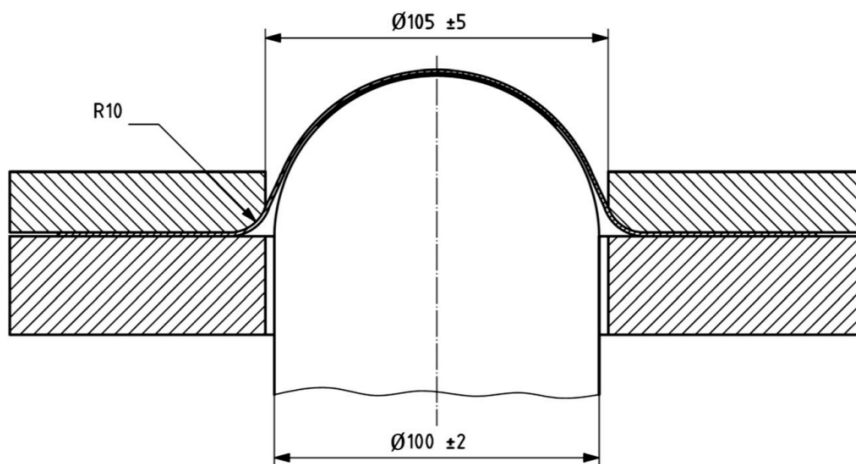
##### Statická zkouška tahem

Jedná se o základní a nejrozšířenější metodu, která slouží ke zjištění základních mechanických vlastností materiálu a to: tažnost, kontrakci, mez pevnosti v tahu a mez kluzu. Zkouška je definována normou ČSN EN ISO 6892-1 a provádí se na trhačích strojích.

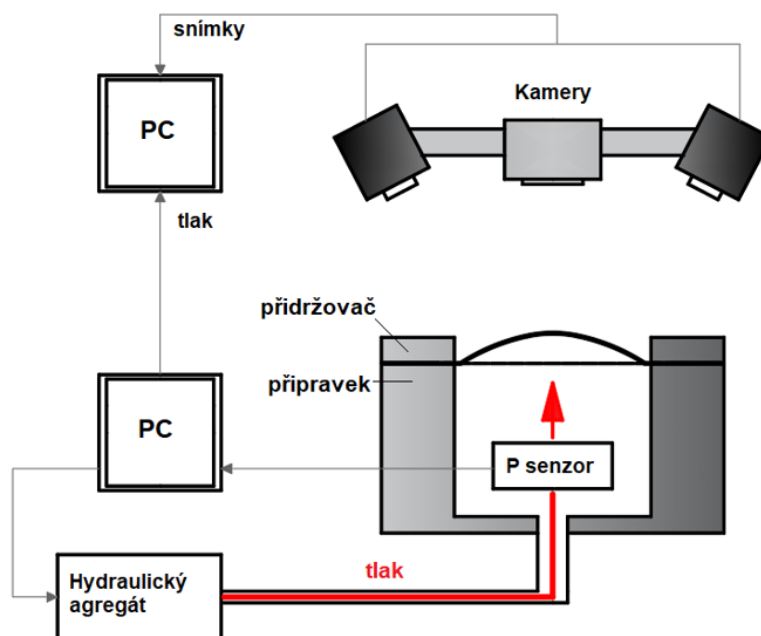
##### Nakazima test

Jedná se o technologickou zkoušku, definovanou normou ČSN EN ISO 12004-2, která se používá ke konstrukci diagramu mezních přetvoření (FLD), respektive křivky mezních přetvoření (FLC), hodnotící tvářitelnost materiálu. Zkouška se provádí vypínáním kruhového přístřihu o definovaných rozměrech polokulovým tažníkem (Obr. 20) až do vzniku trhliny na vrcholu výtažku. K vyhodnocení velikosti napětí a deformací v průběhu zkoušky se Nakazima test nejčastěji používá v kombinaci s fotogrammetrií viz Obr. 21. [19, 20]



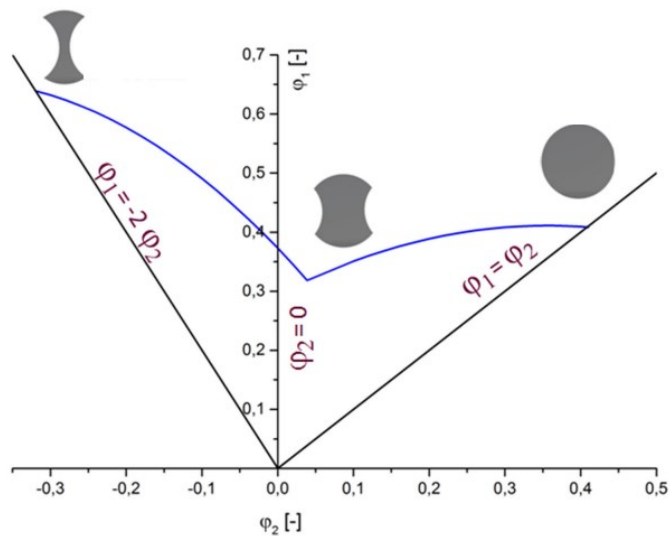


Obr. 20 Průběh Nakazima testu [19]



Obr. 21 Schéma měření [21]

Diagram mezních přetvoření vzniká zkoušením nejčastěji 7 kruhových přístřihů o proměnné šířce viz Obr. 22. Každý ze 7 přístřihů odpovídá jinému stavu napjatosti, které se běžně vyskytují v průběhu tváření. Do diagramu, který se zobrazuje v souřadnicích hlavní ( $\varphi_1$ ) a vedlejší ( $\varphi_2$ ) přetvoření, se vynášejí body, které odpovídají velikostem přetvoření při porušení vzorků. Po aproximaci těchto bodů lze získat zmíněný diagram s vykreslenou křivkou mezních přetvoření, která definuje oblast tváritelnosti materiálu viz Obr. 22. [20, 22]



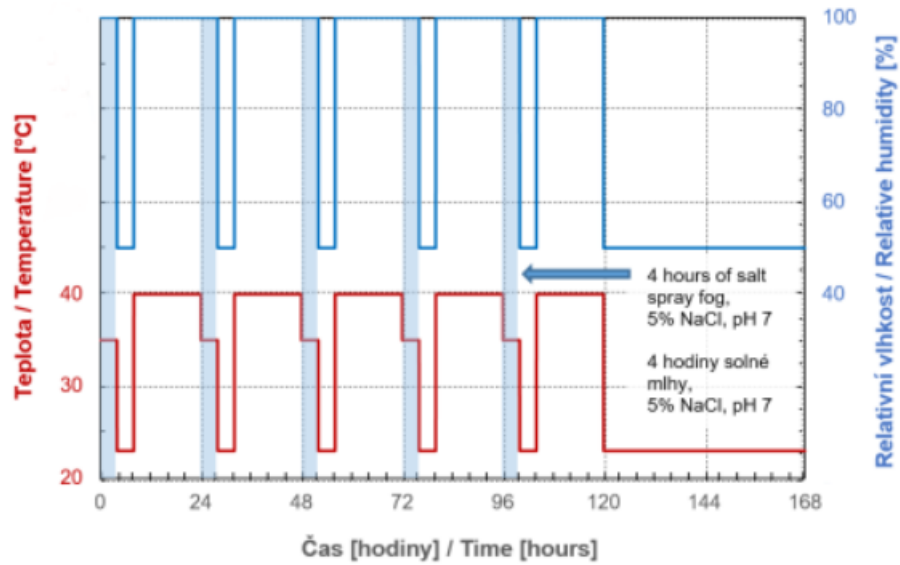
Obr. 22 Diagram mezních přetvoření s vyznačenými tvary zkušebních vzorků [23]

### Urychlená korozní zkouška PV 1210

Jedná se o cyklickou korozní zkoušku používanou pro testování součástí, které jsou opatřené různými antikorozními povlaky. Princip zkoušky spočívá v cyklicky se měnící kombinaci různých klimatických nebo korozních namáhání. Zkušební cyklus se skládá z následujících operací: [24]

- 4 h test solnou mlhou dle DIN EN ISO 9227.
- 4 h skladování za normálních klimatických podmínek dle ISO 554-23/50.
- 16 h vystavení kondenzačnímu vodnímu prostředí dle EN ISO 6270-2.

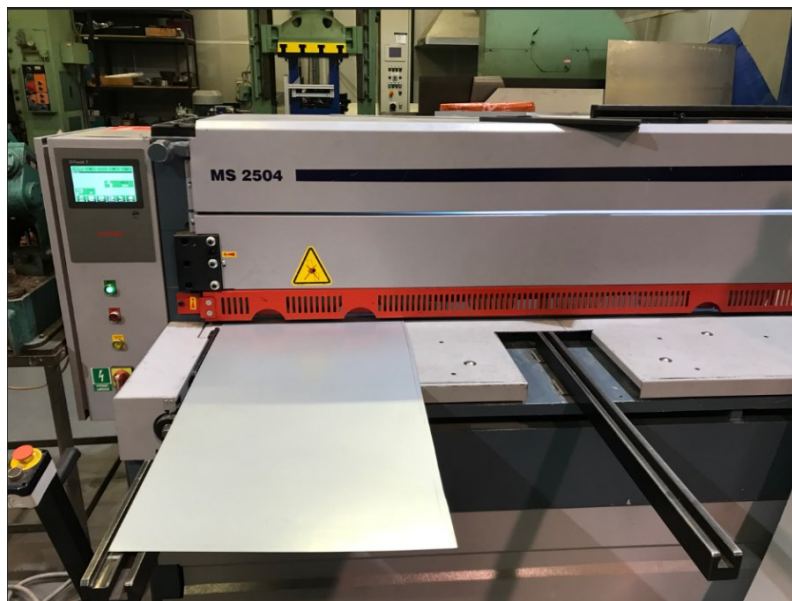
Po každých 5 cyklech následuje dvou denní klidová fáze, která probíhá za normálních klimatických podmínek dle ISO 554-23/50. Typická doba trvání korozního testu je 3, 6, 12 nebo 18 týdnů, kdy 15 cyklů odpovídá 3 týdnům. Na následujícím grafu (Obr. 23) je znázorněn průběh týdenního cyklu. [24, 25]



Obr. 23 Grafické znázornění týdenního cyklu [25]

### 3.2 Příprava vzorků

Dodané polotovary ve formě plechu o rozměrech 0,7x1015mm bylo zapotřebí nejprve rozdělit na menší části, ze kterých by bylo možné pomocí střížného nástroje zhotovit vzorky. K tomu byly použity tabulové nůžky MS 2504 viz Obr. 24.

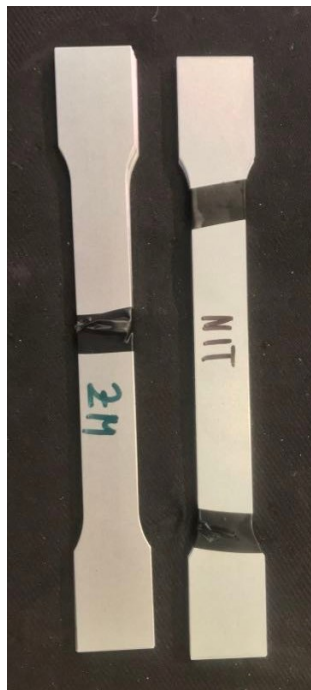


Obr. 24 Tabulové nůžky MS 2504

Z připravených částí plechu byly vzorky vyrobeny za pomoci lisu LENP 63 (Obr. 25) a střížných nástrojů. Vzorky určené pro deformaci jednoosým tahem, o rozměrech 0,7x20 mm, jenž udává norma ČSN EN ISO 6892-1, byly z polotovarů odebrány střížným nástrojem ve směru válcování viz Obr. 26.

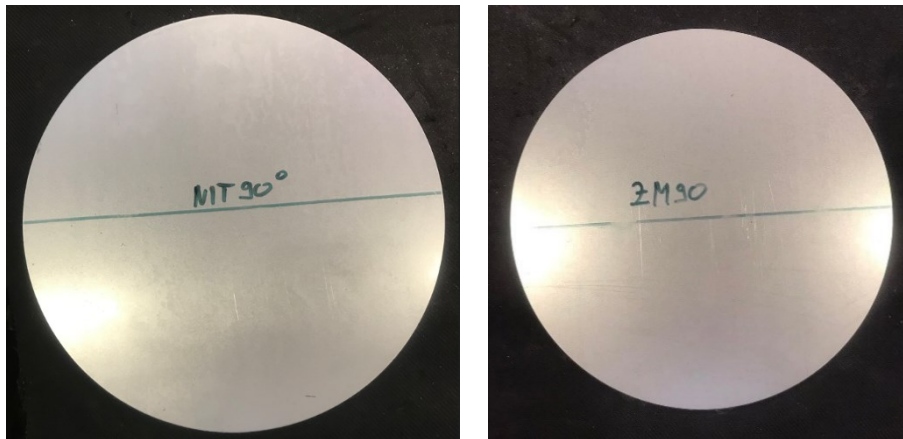


Obr. 25 Lis LENP 63



Obr. 26 Vzorky pro jednoosý tah

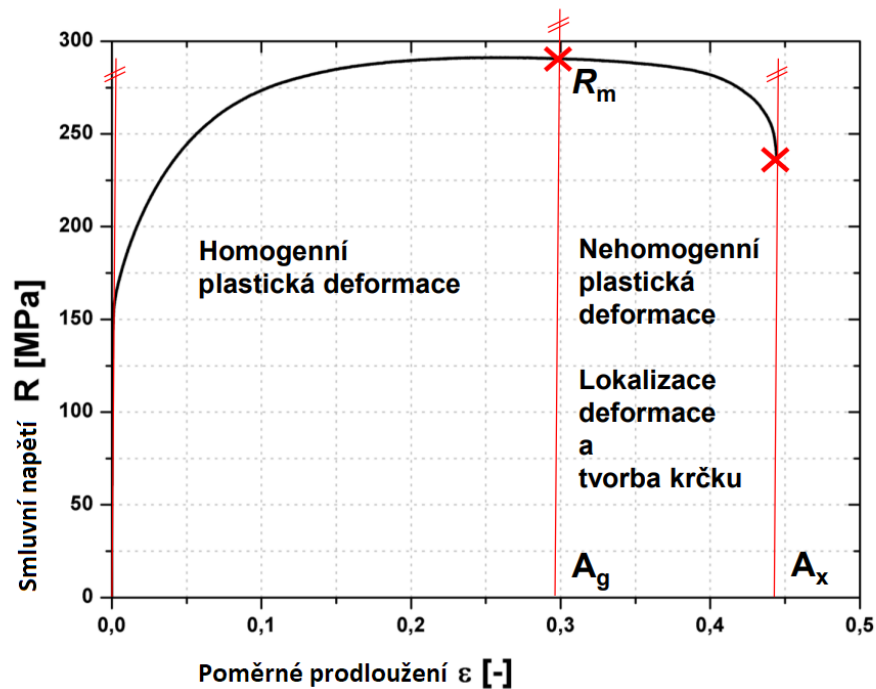
Druhým typem byly vzorky určené ke zkoušce víceosým tahem, o průměru 210 mm, který udává norma ČSN EN ISO 12004-2. Před vystřížením těchto vzorků byla na polotovar nakreslena orientační čára kolmá na směr válcování. Z takto označených polotovarů byly vzorky následně vystříženy viz Obr. 27.



Obr. 27 Vzorky pro víceosý tah s referenční čarou

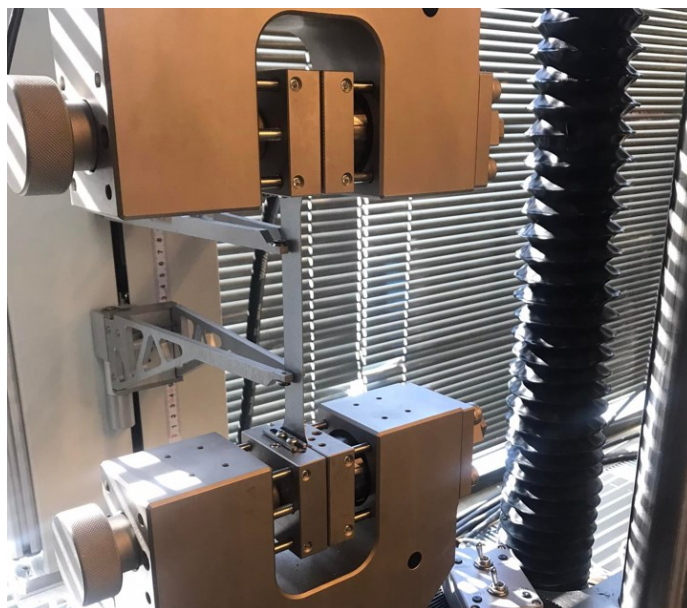
### 3.3 Deformace vzorků jednoosým tahem

Aby při deformaci vzorků jednoosým tahem nedošlo k překročení meze pevnosti materiálu ( $R_m$ ), čímž by docházelo k tvorbě nehomogenní deformace a vzniku krčku, bylo nutné nejprve určit homogenní tažnost materiálu ( $A_g$ ) (Obr. 28). K tomu bylo potřeba provést statickou zkoušku tahem. Na základě této hodnoty byly určeny dvě hodnoty poměrných prodloužení, o které byly vzorky deformovány.



Obr. 28 Smluvní diagram s vyznačenou homogenní tažností  $A_g$  [4]

Statická zkouška tahem byla provedena na trhacím stroji TIRA test 2300 (Obr. 29) podle normy ČSN EN ISO 6895-1 za pokojové teploty na katedře KSP TUL.



Obr. 29 Trhací stroj TIRA test 2300 s upnutým vzorkem

Do softwaru trhacího stroje byly vloženy následující informace: rozměry vzorku a jeho charakter, předpětí vzorku před začátkem zkoušky o velikosti 200 N, rychlost posuvu příčnicku do meze kluzu o velikosti 1 mm/min a 15 mm/min po překročení této hodnoty a informace o poloze extenzometru (80 mm). Po nastavení softwaru trhacího stroje byly provedeny 2 zkoušky pro oba druhy povlaků. Z provedených měření byly následně vygenerovány protokoly, které jsou součástí příloh. Z těch byly následně odečteny hodnoty homogenní tažnosti viz Tab. 2 a Tab. 3.

Tab. 2 Mechanické hodnoty vzorku s povlakem NIT

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	216.9	321.1	21.38	39.48
2	216.9	321.3	21.52	39.72

Tab. 3 Mechanické hodnoty vzorku s povlakem ZM

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	210.5	312.9	22.54	38.14
2	210.2	312.9	21.48	38.27

Kde značí: Rp0,2 Smluvní mez kluzu [MPa],  
Rm Mez pevnosti [MPa],  
Ag Homogenní tažnost [%],  
A Celková tažnost [%].

Z naměřených dat je zřejmé, že hodnota homogenní tažnosti je pro oba druhy vzorků velmi podobná. Pro další postup experimentu bylo tedy rozhodnuto, že vzorky byly jednoosým tahem deformovány na hodnoty 10 a 20 procent poměrného prodloužení.

### 3.3.1 Deformace vzorků jednoosým tahem na určené hodnoty

Deformace vzorků jednoosým tahem byly provedeny podle normy ČSN EN ISO 6892-1 opět na trhacím stroji TIRA test 2300 za stejných podmínek. V softwaru trhacího stroje byly nastaveny stejné parametry jako u statické zkoušky tahem s výjimkou podmínek ukončení zkoušky. Zde bylo nastaveno kritérium zastavení zkoušky při dosažení určité procentuální hodnoty poměrného prodloužení. Od každé sady materiálů byly 3 vzorky deformovány na 10 % poměrného prodloužení a 3 vzorky na 20 % viz Obr. 30.



Obr. 30 Deformované vzorky na určité hodnoty poměrného prodloužení

### 3.4 Deformace vzorků víceosým tahem

Deformace vzorků víceosým tahem byla provedena jejich vypínáním polokulovým tažníkem do určitých výšek, které odpovídaly požadované deformaci. K tomu bylo zapotřebí zjistit, jak se vzorky deformují v závislosti na výšce tažení. Za tímto účelem byl proveden Nakazima test s fotogrammetrickým vyhodnocením deformace.

Nakazima test byl realizován v laboratorních prostorách TUL za pokojové teploty podle normy ČSN EN ISO 12004-2. K deformaci vzorků byl použit hydraulický dvojčinný lis CBA 300 (Obr. 31) spolu s dvojicí kamer, které zaznamenávaly průběh deformace viz

Obr. 32. Pro fotogrammetrické vyhodnocení deformace vzorku byl použit software Mercury RT.



Obr. 31 Hydraulický lis s připraveným fotogrammetrickým softwarem



Obr. 32 Kamery s osvětlením

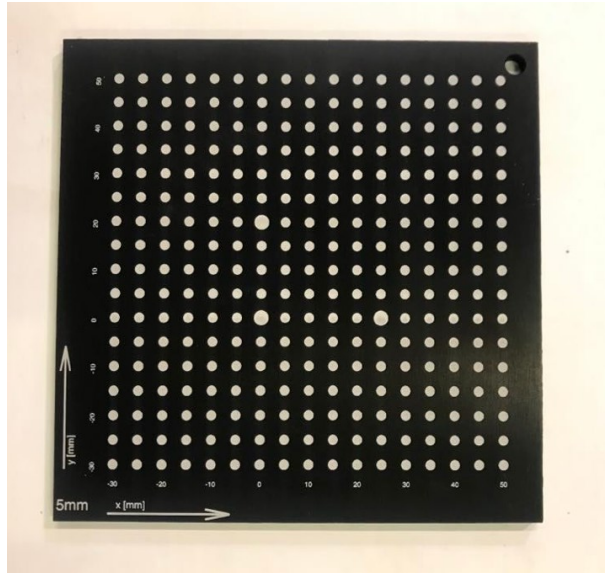
Aby byl fotogrammetrický software schopný dopočítat deformace materiálu, byl vzorek opatřen patternem. K zajištění přilnutí barvy byl vzorek nejprve důkladně odmaštěn a následně na něj byla sprejem nanесena celistvá vrstva bílé barvy. Po zaschnutí první vrstvy byla nanесena druhá, černá vrstva. Pro lepší rozlišitelnost fotogrammetrickým softwarem byla druhá vrstva nanесena nepravidelně (Obr. 33). Po nanесení patternu byl vzorek osušen. Pro zajištění toho, že se vzorek během zkoušky poruší co nejbližе vrcholu kulového vrchlíku, byly z důvodu snížení tření na jeho spodní část a nástroj nanесeny vrstvy maziva a PVC folií. Takto připravený vzorek byl umístěn do pracovního prostoru lisu pod dvojici kamer.

Dalším krokem měření bylo zaostření kamer na zkoušený vzorek a jejich následná kalibrace. Ta se provádí pomocí kalibrační destičky (Obr. 34), která má srovnatelnou velikost jako sledovaný vzorek. Na destičce jsou znázorněny body o známých souřadnicích, které software v průběhu kalibrace sleduje. Samotná kalibrace spočívá v pořizování snímků kalibrační destičky pod různými úhly. Po těchto přípravách bylo možné provést samotné měření.





Obr. 33 Vzorek opatřený patternem



Obr. 34 Kalibrační destička

Po ukončení zkoušky software Mercury RT z nahraných záznamů vypočítal velikosti deformací v závislosti na výšce tažení. Z naměřených dat bylo zřejmé, že druh povlaku nemá na velikost deformace velký vliv a oba vzorky se deformały stejným způsobem viz Obr. 35. Následující část práce, týkající se určení výšek tažení, tedy platí pro oba druhy vzorků.



Obr. 35 Vzorek po provedení Nakazima testu

### 3.4.1 Určení velikostí výšek tažení

Pro deformaci vzorků víceosým tahem bylo rozhodnuto, že vzorky byly deformały na dvě hodnoty výšek tažení. První výška tažení byla zvolena tak, aby hodnota vzniklé deformace odpovídala deformaci, kterou způsobil jednoosý tah na hodnotu 10 % homogenní tažnosti.

Za tímto účelem byla podle rovnice (3) spočítána hodnota skutečného přetvoření ( $\varphi_3$ ), ke kterému došlo při deformování vzorků jednoosým tahem na hodnotu 10 % homogenní tažnosti. Stejná hodnota skutečného přetvoření, ke kterému došlo při deformaci vzorků víceosým tahem, byla dohledána v programu Mercury RT a s ní i výška tažení, která toto přetvoření způsobila.

$$\varphi_3 = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

Kde značí:  $\varphi_3$  Skutečné přetvoření [-],  
 $\varepsilon$  Poměrné přetvoření [-].

V Tab. 4 je zobrazena výška tažení, na kterou byly vzorky deformovány víceosým tahem a která byla srovnatelná s deformací způsobenou jednoosým tahem na hodnotu 10% homogenní tažnosti.

Tab. 4 Určené výšky tažení

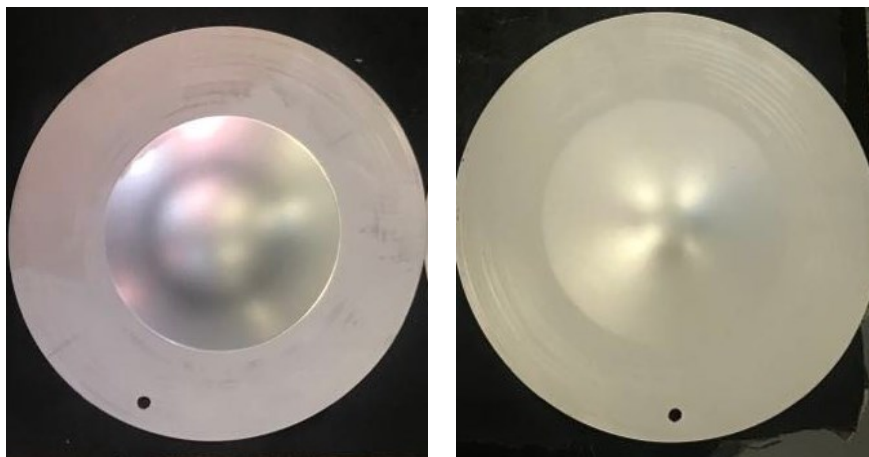
$\varepsilon$ [-]	$\varphi_3$ [-]	H [mm]
0,1	0,0953	13

Kde značí: H Výška tažení [mm]

Druhá výška tažení byla zvolena několik okamžiků před vznikem trhliny. Jednalo se o krajní výšku tažení o velikosti H=35 mm. Po určení těchto hodnot bylo možné přistoupit k samotné deformaci vzorků.

### 3.4.2 Deformace vzorků víceosým tahem na určené hodnoty

Deformace vzorků víceosým tahem proběhla opět v laboratorních prostorách TUL za pokojové teploty s pomocí dvojčinného hydraulického lisu CBA 300. Vzorek byl upnut mezi přidržovač a tažnici a následně byl zapnut posuv nástroje. Po dosažení požadované výšky tažení byl posuv nástroje zastaven, vzorek odebrán a následně očištěn od maziva. Takto byly na každou výšku tažení deformovány vždy 3 vzorky. Tento proces se stejným způsobem opakoval pro vzorky s NIT i ZM povlakem. Na následujícím obrázku (Obr. 36) jsou zobrazeny vzorky deformované na jednotlivé výšky tažení.



Obr. 36 Deformované vzorky na určené výšky tažení

### 3.5 Urychlené korozní zkoušení vzorků

Po deformaci vzorků jednoosým a víceosým tahem následovalo jejich urychlené korozní zkoušení. K tomu byla použita korozní komora Liebisch (Obr. 37), která simuluje korozní podmínky, kterým jsou automobily běžně vystavovány.



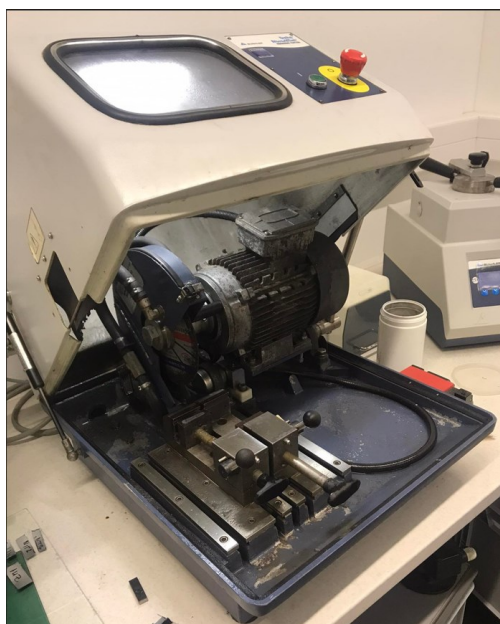
Obr. 37 Korozní komora Liebisch

Urychlené korozní zkoušení vzorků bylo provedeno dle korozního testu PV 1210. Po uplynutí 15 cyklů, což odpovídá třem týdnům, byla vyndána první část. Finální část vzorků byla z korozní komory vyndána po 30 cyklech, což odpovídá 6 týdnům.

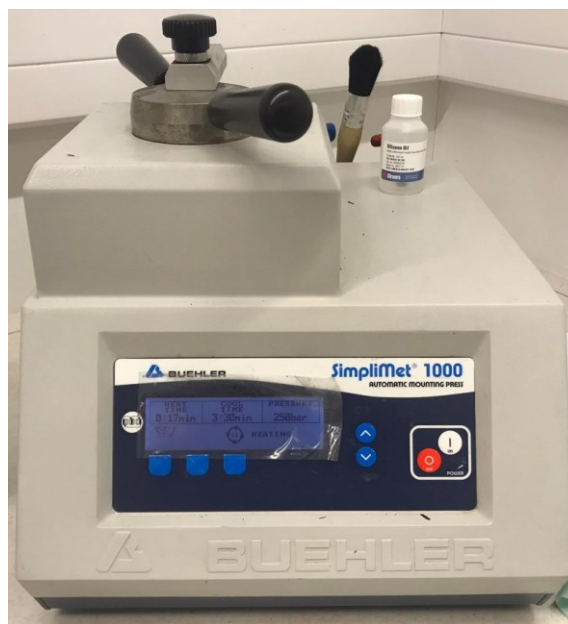
### 3.6 Příprava vzorků k mikroskopickému pozorování

Jelikož vzorky byly poměrně rozměrné a obtížně by se připravovaly k mikroskopovému sledování, byly z nich vyříznuty menší části. Jednalo o oblasti s největší deformací. Pro jednoosý tah se jednalo o prostředek zkušební tyčinky a pro víceosý tah o vrchol kulového vrchlíku. Po označení takto vyříznutých částí je bylo možné připravit k mikroskopickému pozorování.

Pro přípravu vzorků k mikroskopickému pozorování byla použita rozbrušovací pila Abrasimet Delta viz Obr. 38. Na této pile byly vyříznuté části rozpůleny. Jedna polovina byla použita jako vzorek k pozorování korozního napadení povrchu viz Obr. 41. Druhá polovina byla použita k přípravě metalografického výbrusu kolmého řezu viz Obr. 42. Z ní bylo vybráno místo s oblastí největšího korozního napadení, ve kterém byl proveden řez. Vzorek byl následně pomocí pily oříznut, aby jej bylo možné zapouzdřit. Zapouzdření bylo provedeno za tepla do vodivé pryskyřice PolyFast lisem SimpliMet 1000 viz Obr. 39.



Obr. 38 Rozbrušovací pila Abrasimet Delta



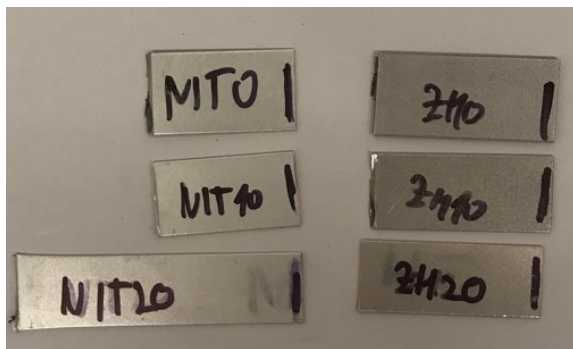
Obr. 39 Lis SimpliMet 1000

Zapouzdřené vzorky byly následně broušeny na poloautomatické metalografické brusce Saphir 550 viz Obr. 40. K broušení byla použita sada brusných papírů o drsnostech 220, 500, 800, 1200, 2000 a 4000. Při broušení byly vzorky chlazeny přiváděnou vodou. Po dokončeném broušení následovalo leštění vzorků pomocí leštícího plátna a emulzí s volnými

zrny o velikostech 3 a 1  $\mu\text{m}$ . Po leštění byly vzorky omyty a osušeny. Aby vzorky vlivem relativní vlhkosti vzduchu nekorodovaly, byly následně omyty lihem.



Obr. 40 Poloautomatická metalografická bruska Saphir 550



Obr. 41 Vzorky ke sledování povrchu



Obr. 42 Metalografické výbrusy

### 3.7 Mikroskopické pozorování vzorků

Mikroskopické pozorování připravených vzorků se uskutečnilo v prostorách TUL na skenovacím elektronovém mikroskopu Tescan Mira 3, který je vybavený EDX detektorem Oxford UltimMax65 pro lokální chemickou analýzu viz Obr. 43.

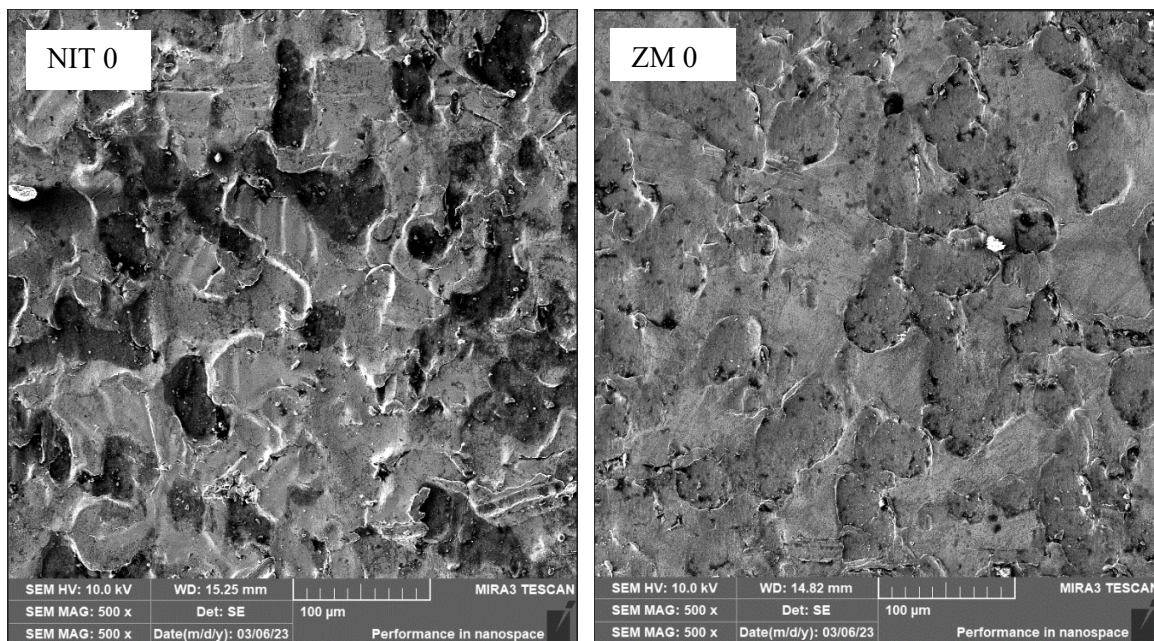


Obr. 43 Skenovací elektronový mikroskop Tescan Mira 3

#### 3.7.1 Snímky vzorků v nekorodovaném stavu

##### Snímky povrchu vzorků bez deformace

Na následujících snímcích (Obr. 44) je možné vidět srovnání pozorovaných povlaků. Na povlaku NIT je možné pozorovat lepší morfologii povrchu oproti ZM povlaku, který má hladší a celistvější povrch. Popis a vlastnosti obou povlaků byly vysvětleny v kapitole 2.2.1.

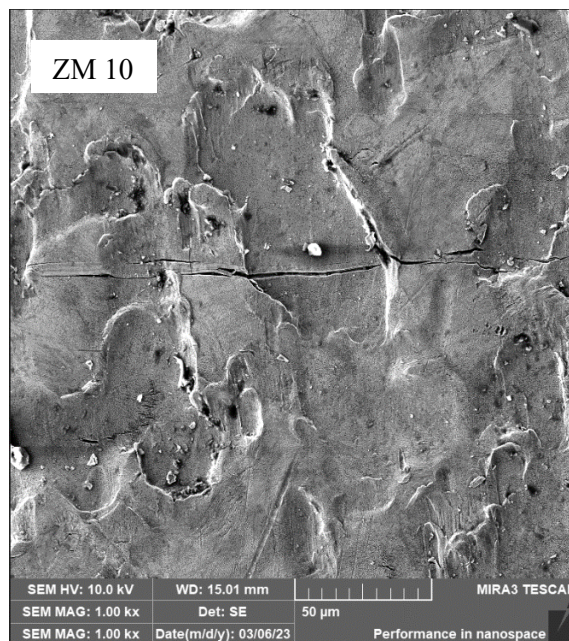
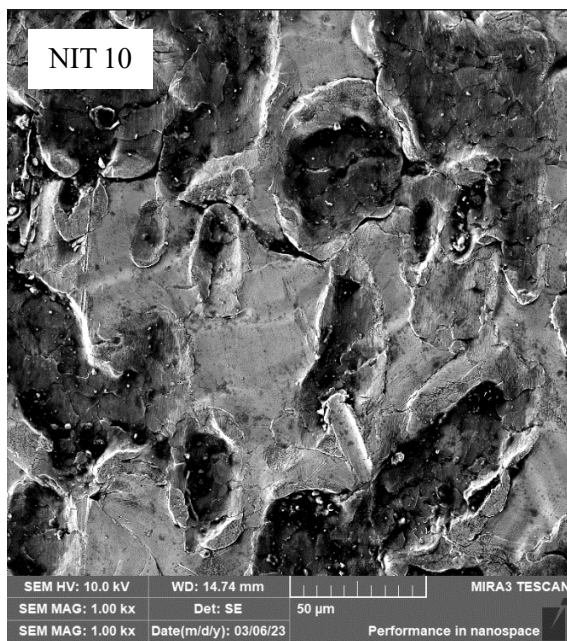


Obr. 44 Nedeformované vzorky.

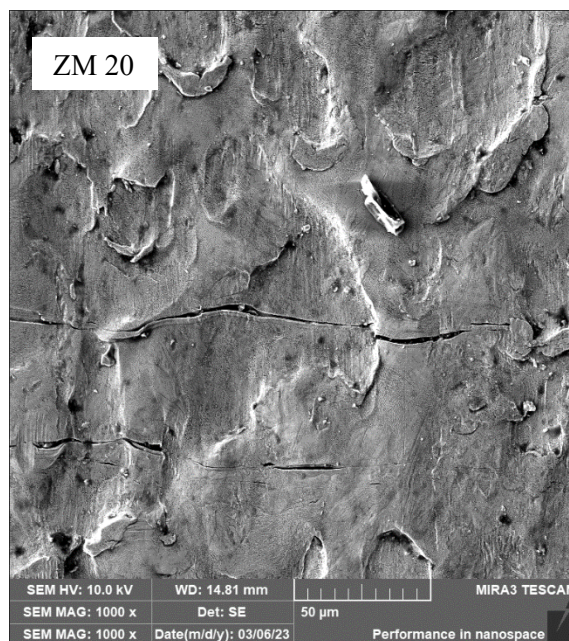
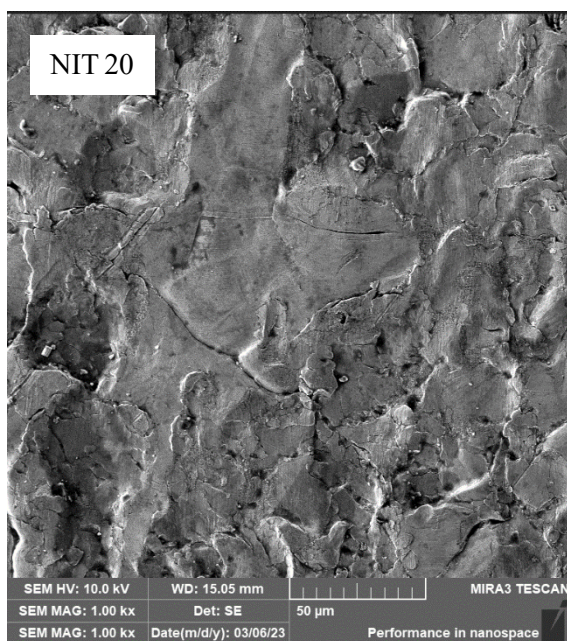
### **Snímky povrchu vzorků po jejich jednoosým a víceosým tahem**

Deformace povlaků v závislosti na druhu a velikosti přetvoření je možné pozorovat na Obr. 45 až Obr. 48.

Povlak NIT, po jeho deformaci jednoosým a víceosým tahem, nevykazoval žádné výrazné porušení jeho integrity ani v jednom ze dvou druhů přetvoření. Oproti tomu povlak ZM, jak bylo předpokládáno, takové chování nevykazoval. Již při deformaci jednoosým tahem na hodnotu 10 % a 20 % poměrného prodloužení vzorku došlo k tvorbě trhlin o šířce 2 µm viz Obr. 45 a Obr. 46. Při deformaci vzorků víceosým tahem na výšku tažení  $H=13$  mm, došlo k tvorbě četnějších trhlin s podobnou šířkou, která se pohybovala mezi 2 a 3 µm viz Obr. 47. K největšímu poškození ZM povlaku došlo v případě jeho deformace víceosým tahem na krajní výšku tažení  $H=35$  mm (Obr. 48), kdy se šířka trhlin pohybovala v rozmezí 10 až 15 µm.

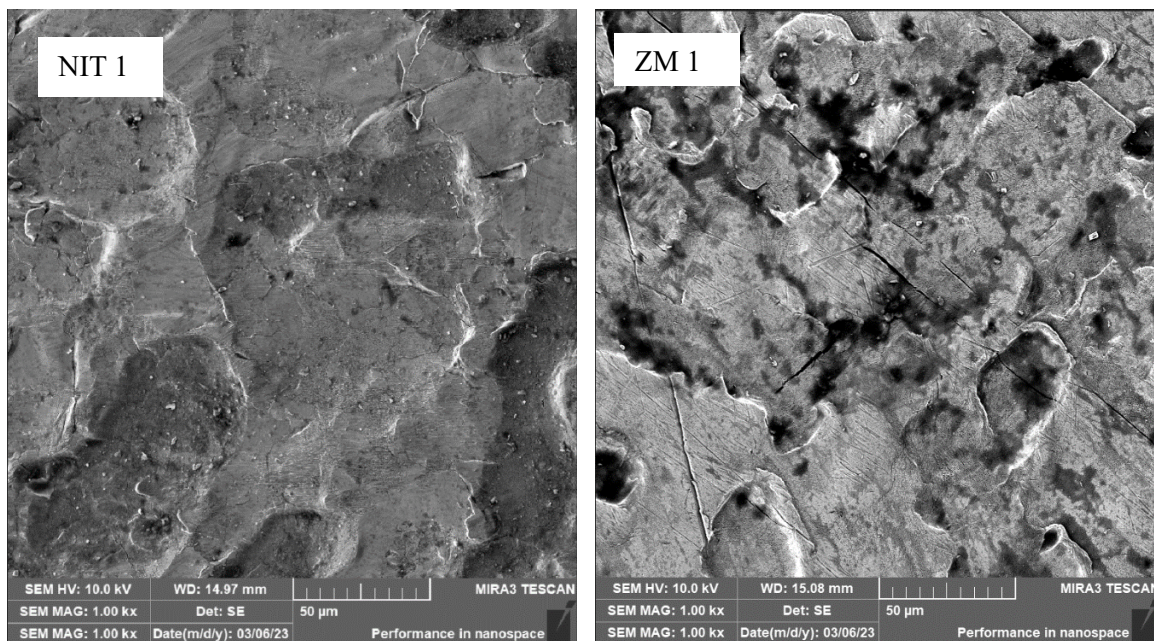


Obr. 45 Vzorky deformované jednoosým tahem na hodnoty 10 % poměrného prodloužení.

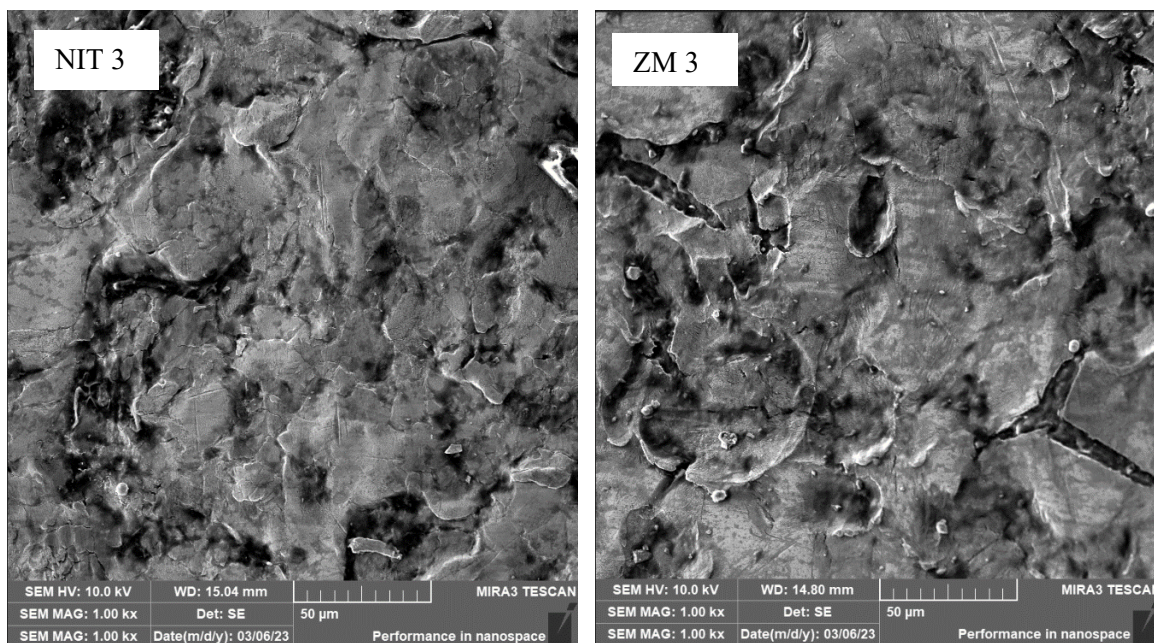


Obr. 46 Vzorky deformované jednoosým tahem na hodnoty 20 % poměrného prodloužení.





Obr. 47 Vzorky deformované víceosým tahem na výšku tažení  $H=13$  mm.

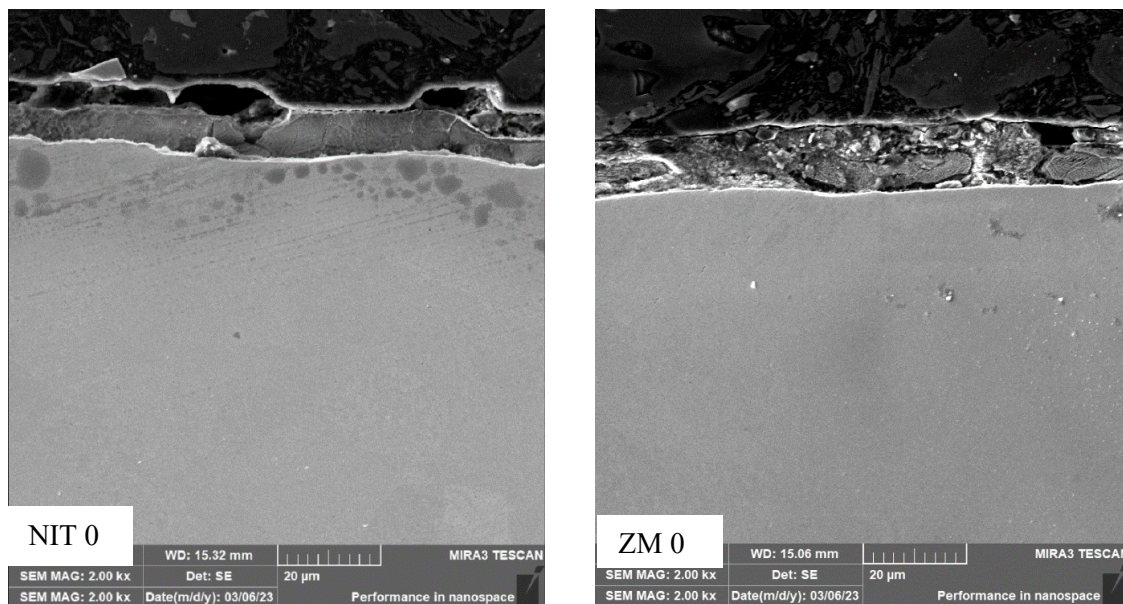


Obr. 48 Vzorky deformované víceosým tahem na výšku tažení  $H=35$  mm.

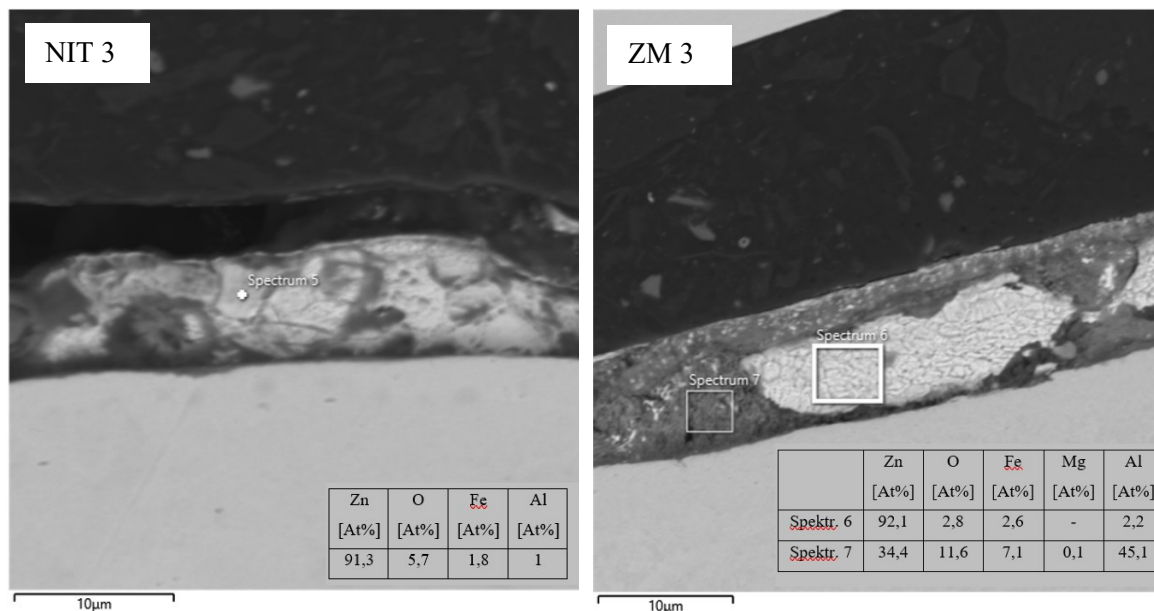
### **Snímky metalografických výbrusů s chemickou analýzou**

Jelikož deformace povlaků není ze snímků metalografických výbrusů zřejmá, jsou zde uvedeny pouze snímky vzorků v nedeformované stavu a chemické analýzy vzorků po jejich deformaci víceosým tahem na výšku tažení  $H=35$  mm. Na Obr. 49 je možné sledovat strukturu obou povlaků. Povlak NIT je tvořen homogenní vrstvou, kdežto povlak ZM je tvořen z více fází.

Z chemických analýz (Obr. 50) je možné sledovat chemické složení obou povlaků. V obou povlacích je samozřejmě obsažen zinek a malé množství železa. Přítomnost železa v povlaku již byla vysvětlena v kapitole 2.2.1 a na Obr. 4. Dále oba povlaky obsahují hliník, kterým se leguje zinková lázeň za účelem zlepšení přilnavosti povlaku k základnímu materiálu. Přítomnost kyslíku v povlacích je známka oxidace zinku vlivem atmosférické vlhkosti. V případě ZM povlaku je dále přítomen i hořčík.



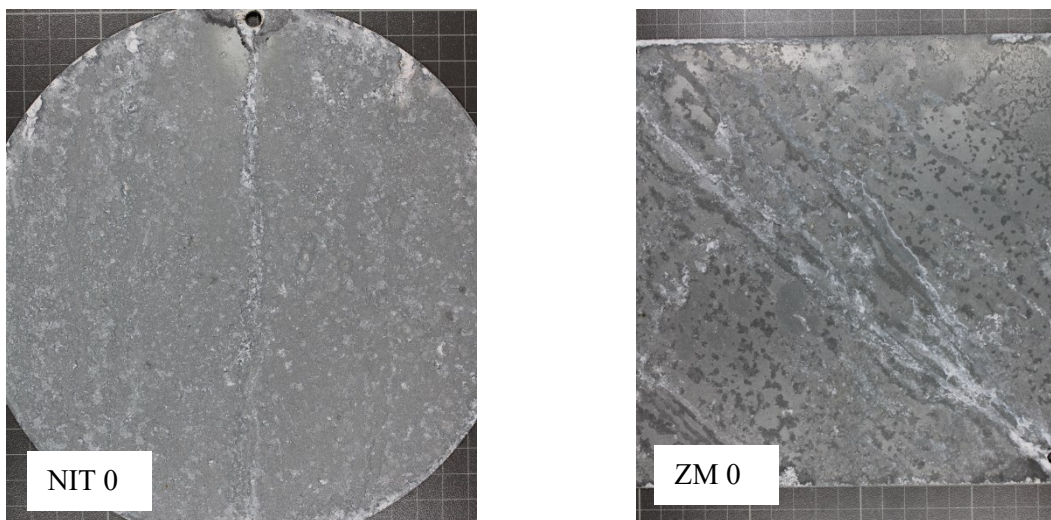
Obr. 49 Metalografické výbrusy nedeformovaných vzorků.



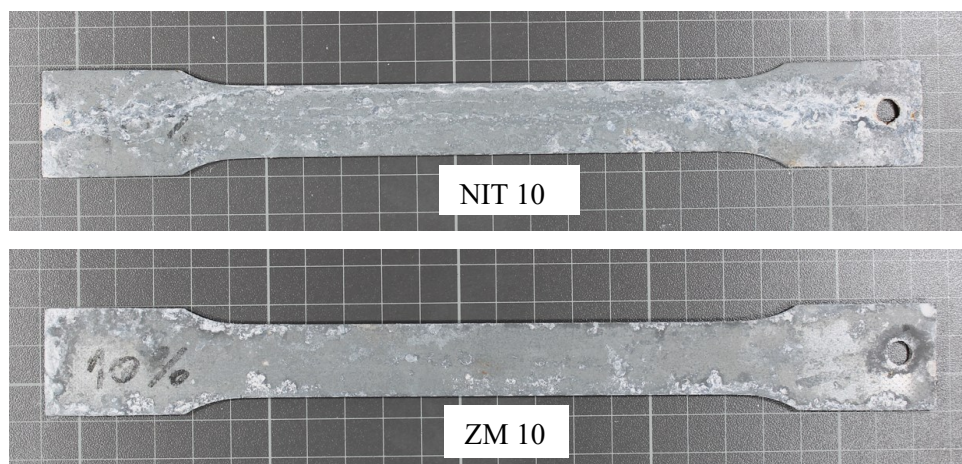
Obr. 50 Chemické analýzy povlaků NIT a ZM po jejich deformaci víceosým tahem na výšku tažení H=35 mm.

### 3.7.2 Snímky povlaků po 3 týdnech v solné komoře

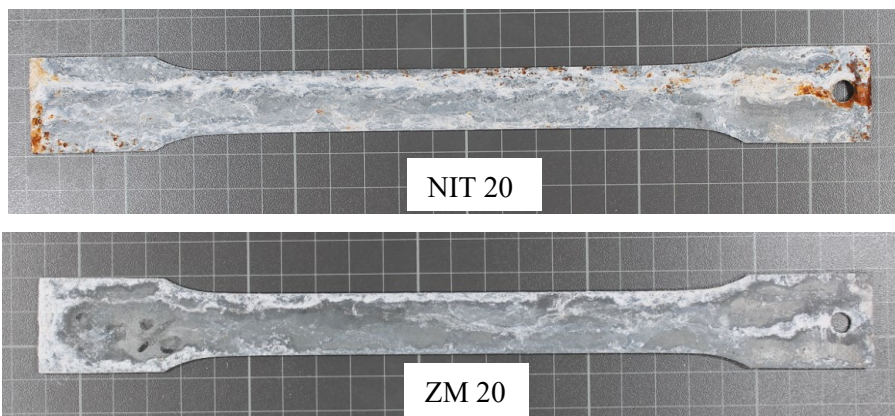
Na Obr. 51 až Obr. 55 je ukázán vzhled vzorků po třech týdnech jejich urychleného korozního zkoušení dle testu PV 1210. Po odebrání vzorků z korozní komory bylo možné u obou vzorků pozorovat vytvořený bílý povlak. Jednalo se o bílou rez, která je tvořena oxidy zinku. V případě povlaku ZM došlo pouze k tvorbě této vrstvy. Zároveň je možné pozorovat, že intenzita tvorby této vrstvy rostla v závislosti na druhu a velikosti přetvoření. V případě povlaku NIT se mimo bílé rzi projevila také koroze základního materiálu. Z těchto oblastí byly následně připraveny vzorky, na kterých byly provedeny chemické analýzy.



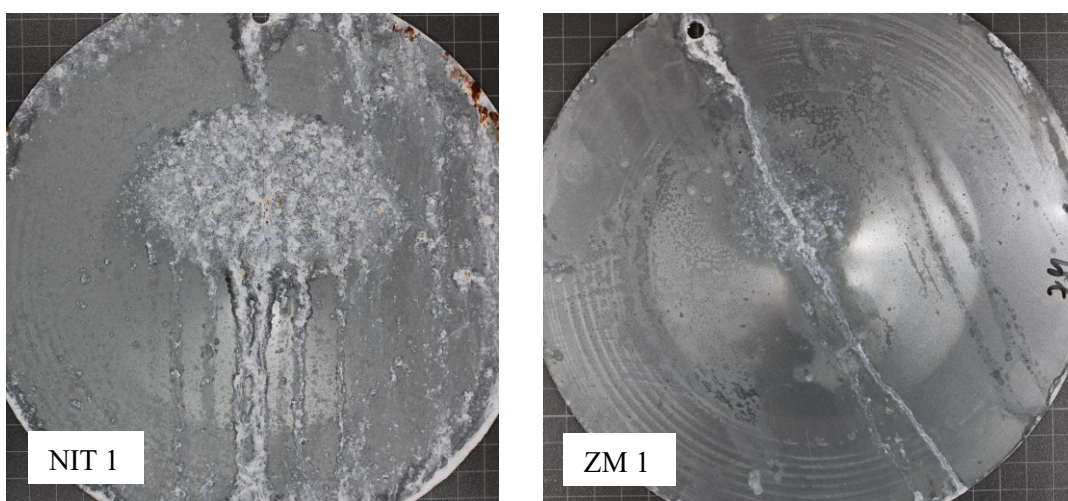
Obr. 51 Nedeformované vzorky.



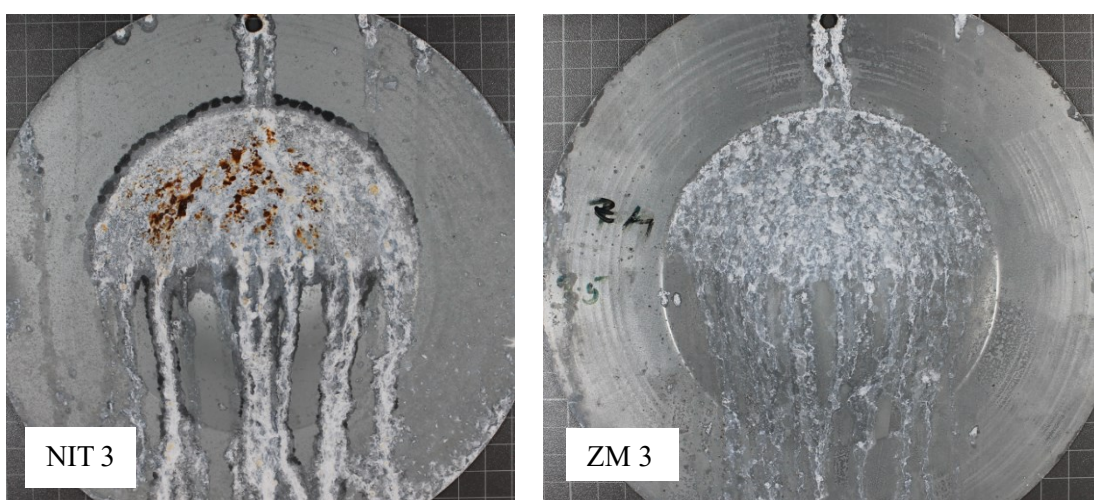
Obr. 52 Vzorky deformované jednoosým tahem (10 % poměrného prodloužení)



Obr. 53 Vzorky deformované jednoosým tahem (20 % poměrného prodloužení)



Obr. 54 Vzorky deformované víceosým tahem (výška tažení H=13 mm)

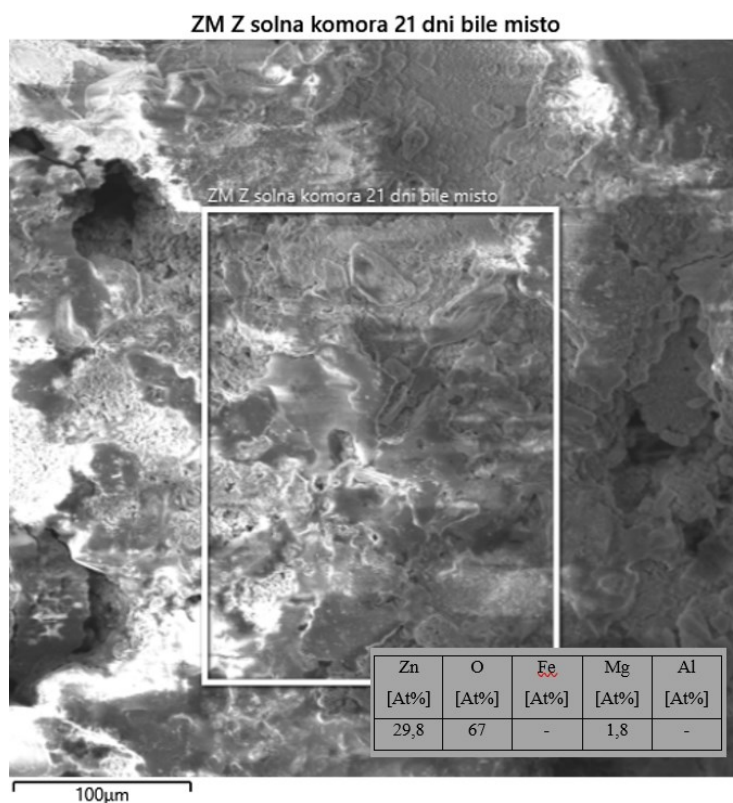


Obr. 55 Vzorky deformované víceosým tahem (výška tažení H=35 mm)

### Chemické analýzy povrchu ZM povlaku po 3 týdnech v solné komoře

Jak již bylo zmíněno na povrchu vzorku se ZM povlakem bylo možné pozorovat dvě oblasti. Jednalo se o oblast bez korozního napadení a o oblast s bílým povlakem, tedy s bílou rží. Chemickou analýzu této oblasti lze vidět na Obr. 56.

Jelikož si chemické analýzy vzorků byly velmi podobné bez ohledu na způsob a velikost deformace, je zde přiložena pouze chemická analýza povlaku v nedeformovaném stavu. Chemické analýzy zbylých vzorků jsou součástí příloh. Z těchto chemických analýz je možné ve všech případech pozorovat velmi podobný úbytek zinku na hodnotu cca 30 At% a nárůst obsahu kyslíku na cca 60 At%. To značí tvorbu oxidů zinku ( $ZnO_2$ ) vlivem jeho koroze. Tedy tvorbu bílé rzi.

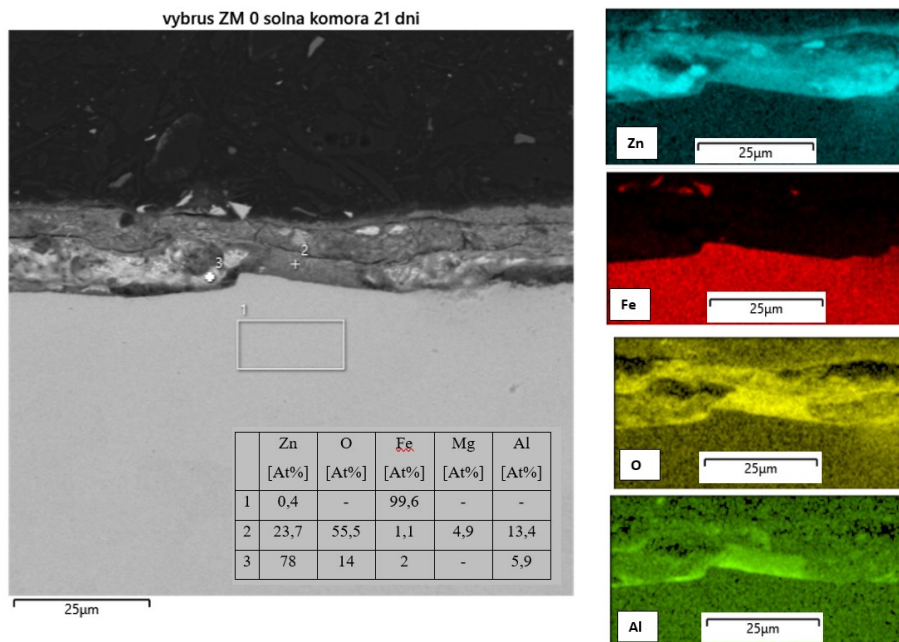


Obr. 56 Chemická analýza bílé rzi na nedeformovaném ZM povlaku (3 týdny koroze)

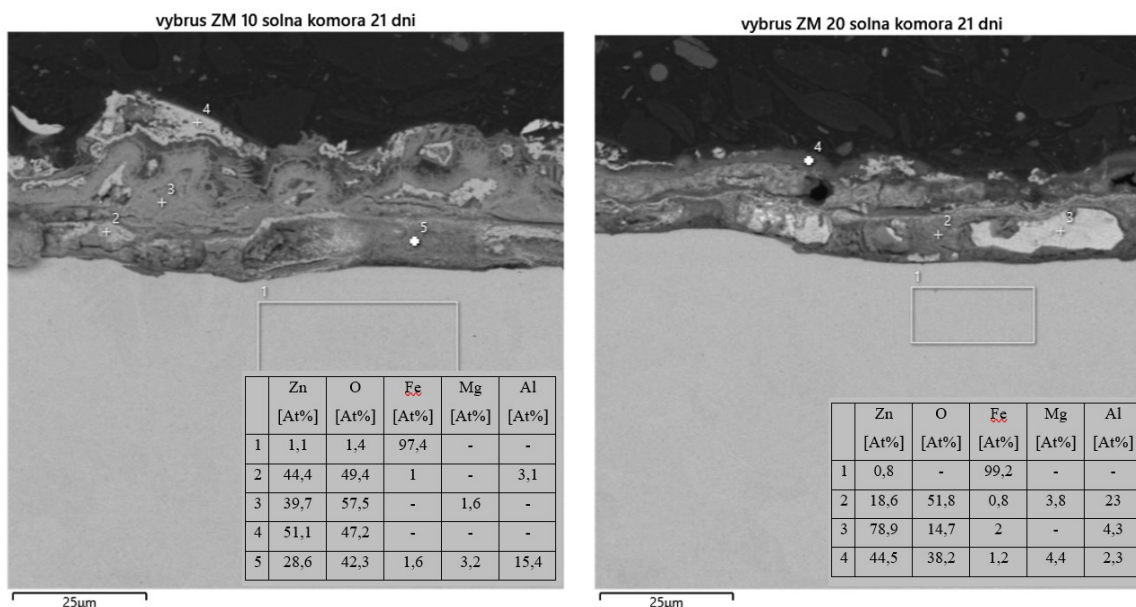
### Chemické analýzy metalografických výbrusů ZM povlaku po 3 týdnech v solné komoře

Protože při deformaci vzorků se ZM povlakem došlo k jeho porušení a po urychleném korozním zkoušení se na povrchu neprojeví oblasti, které by značily korozi základního materiálu, byly provedeny metalografické výbrusy. Ty se provedly za účelem odhalení podpovrchové koroze.

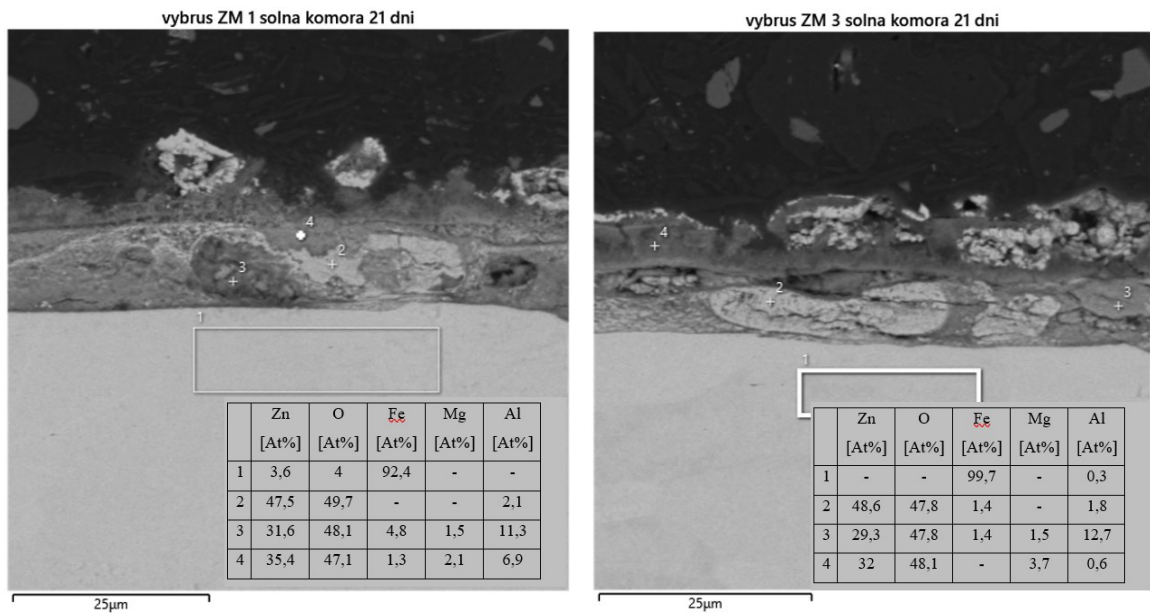
Na přiložených chemických analýzách (Obr. 57 až Obr. 59) lze ve vrstvě povlaku vidět dostatečné množství zinku a velmi malou tvorbu oxidů železa v jednotek řádu atomových procent. Zároveň lze na rozhraní plechu a zinkové vrstvy pozorovat vytvořenou celistvou vrstvou, která je tvořena oxidy hliníku viz Obr. 60.



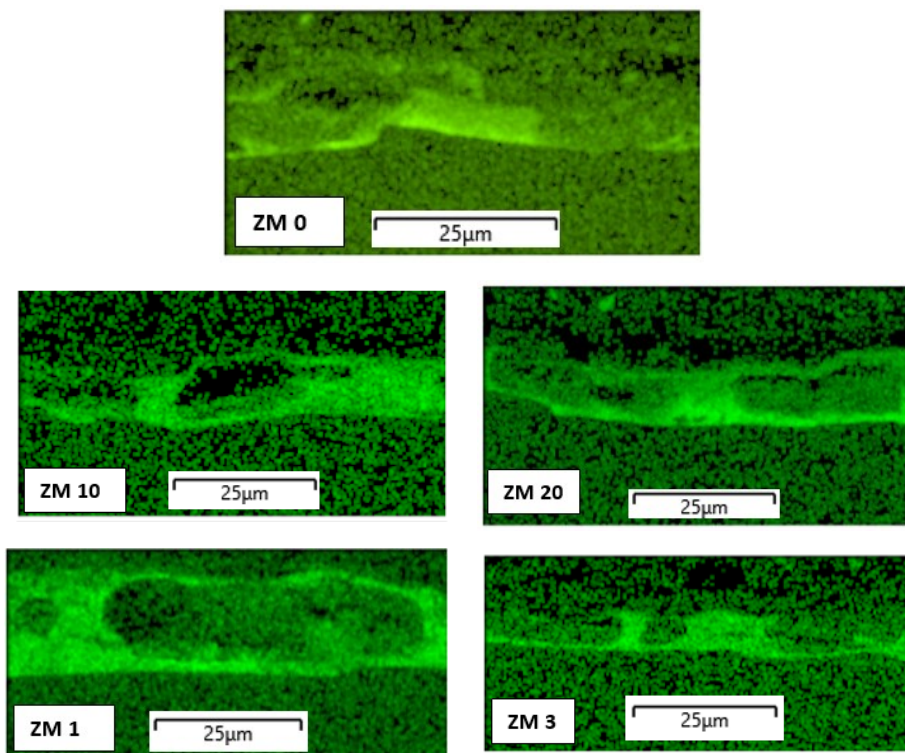
Obr. 57 Chemická analýza nedeformovaného vzorku se ZM povlakem. (3 týdny koroze)



Obr. 58 Chemická analýza vzorků se ZM povlakem po jejich deformaci jednoosým tahem na hodnotu 10 % a 20 % poměrného prodloužení. (3 týdny koroze)



Obr. 59 Chemická analýza vzorků se ZM povlakem po jejich deformaci víceosým tahem na výšku tažení H=13 mm a H=35 mm. (3 týdny koroze)

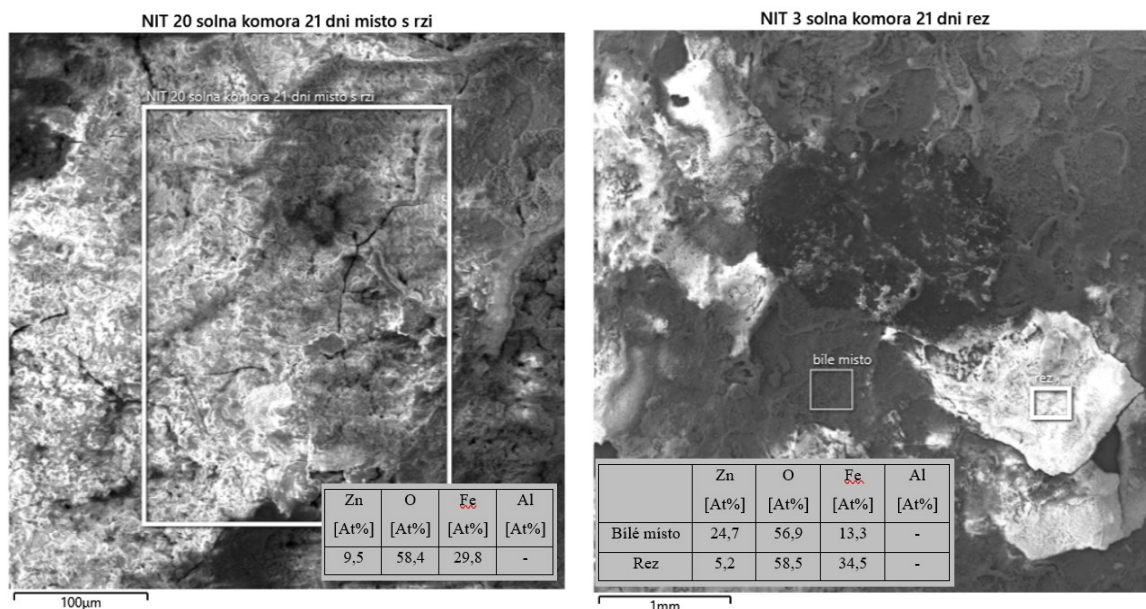


Obr. 60 Barevné mapy Al ve vytvořené oxidové vrstvě v ZM vzorcích. (3 týdny koroze)

### Chemické analýzy povrchu NIT povlaku po 3 týdnech v solné komoře

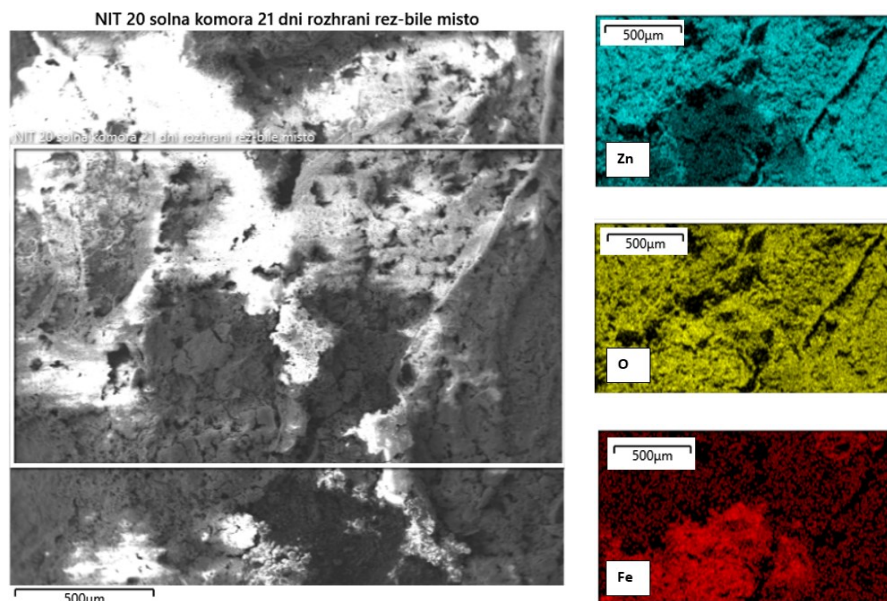
Z fotografií vzorků po 3 týdnech jejich korozního zkoušení, bylo na povrchu NIT vzorků možné sledovat 3 oblasti. Stejně jako u vzorků se ZM povlakem se jednalo o oblast s čistým povlakem a o oblast s bílou rží. Mimo tyto dvě oblasti se dále projevila oblast s korozi základního materiálu, tedy oceli. Na Obr. 61 jsou zobrazeny chemické analýzy vzorků NIT 20 a NIT 3, na kterých se projeví největší oblasti korozního napadení základního materiálu. Chemické analýzy zbylých vzorků jsou součástí příloh.

Z přiložených chemických analýz zkorodovaných oblastí je možné vlivem koroze pozorovat snížený obsah zinku, který již neposkytoval základnímu materiálu dostatečnou protikorozní ochranu. Tím docházelo k tvorbě oxidů železa namísto oxidů zinku. Na Obr. 62 je dále možné pozorovat přechod mezi oblastí bílé koroze a oblastí koroze základního materiálu na vzorku NIT 20.



Obr. 61 Chemické analýzy rzi základního materiálu na vzorcích NIT 20 a NIT 3.



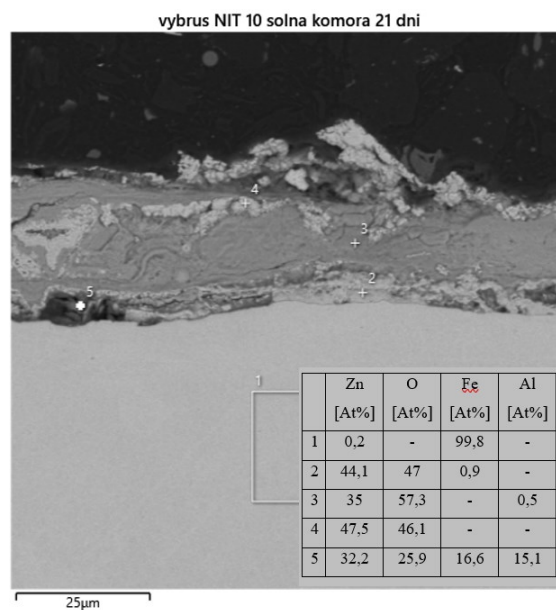
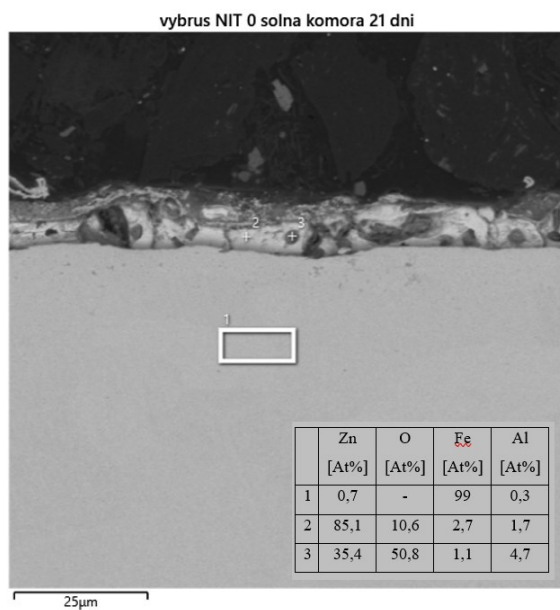


Obr. 62 Barevná mapa rozhraní bílé zci a zci základního materiálu na povlaku NIT po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 20 % poměrného prodloužení.

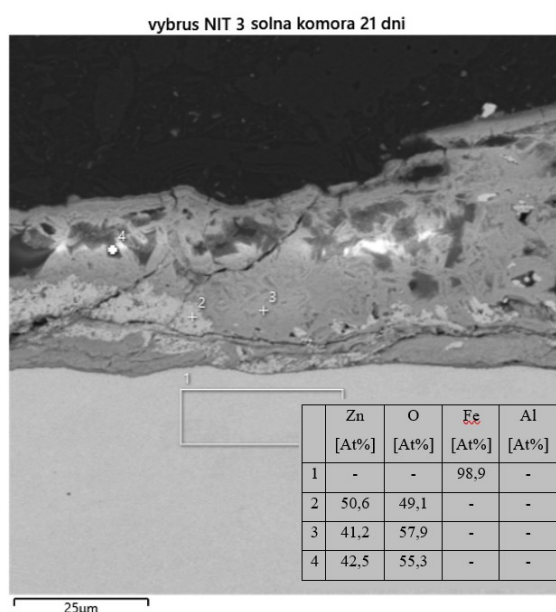
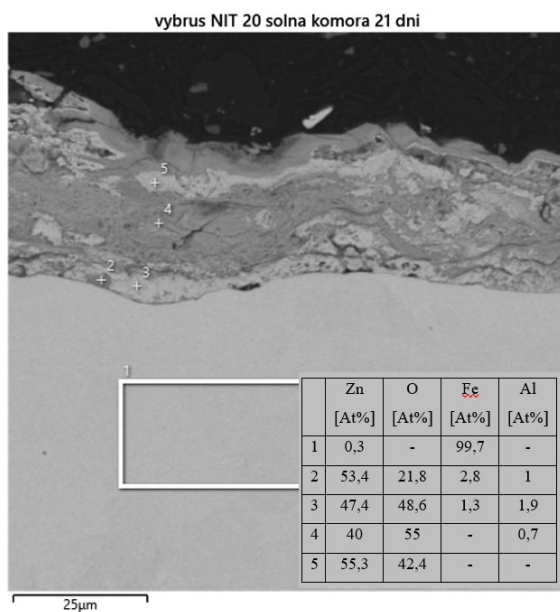
### **Chemické analýzy metalografických výbrusů NIT povlaku po 3 týdnech v solné komoře**

Na následujících snímcích (Obr. 63 až Obr. 65) lze vidět chemické analýzy metalografických výbrusů vzorků s NIT povlakem. Na Obr. 65 lze pozorovat vznik oxidů železa, které se táhnou pod vrstvou oxidů zinku  $ZnO_2$  a možnou trhlinou v povlaku se dostávají na povrch.

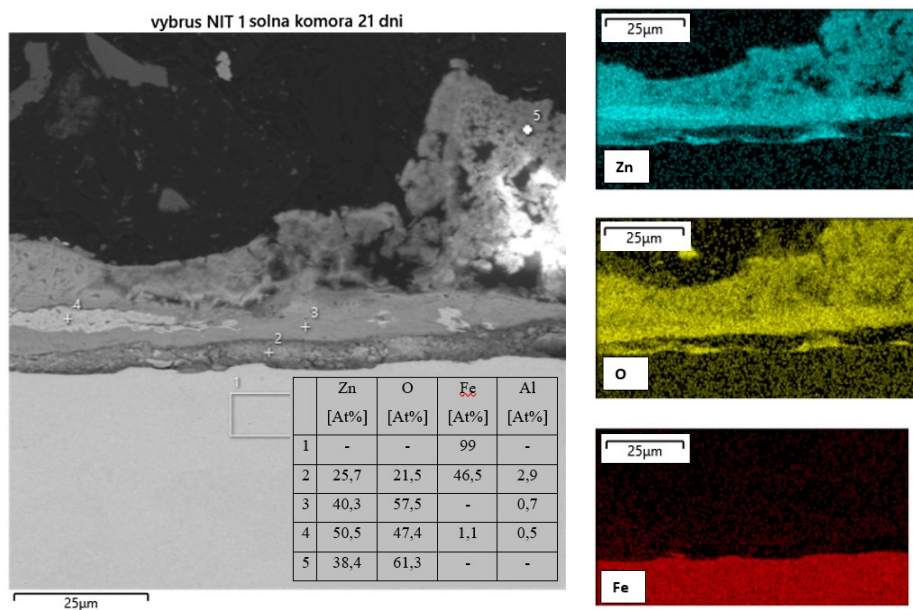
Po provedení chemických analýz bylo zjištěno, že i v případě vzorků s NIT povlakem, dochází na rozhraní zinkového povlaku a ocelové matrice k tvorbě vrstvy, tvořené z oxidů hliníků. Na rozdíl od vzorků se ZM povlakem (Obr. 60) byla tato vrstva ve vzorcích s NIT povlakem ztelně tenčí a v u některých vzorků necelistvá viz NIT 3.



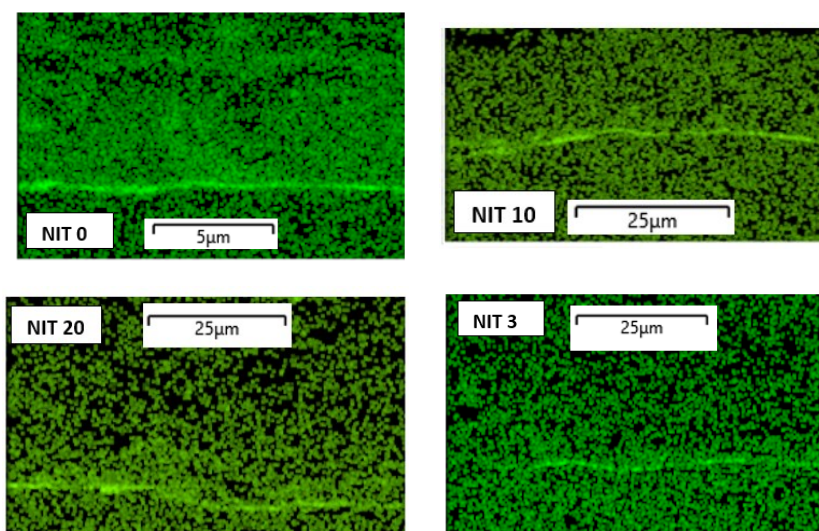
Obr. 63 Chemické analýzy vzorků NIT 0 a NIT 10. (3 týdny koroze)



Obr. 64 Chemické analýzy vzorků NIT 20 a NIT 3. (3 týdny koroze)



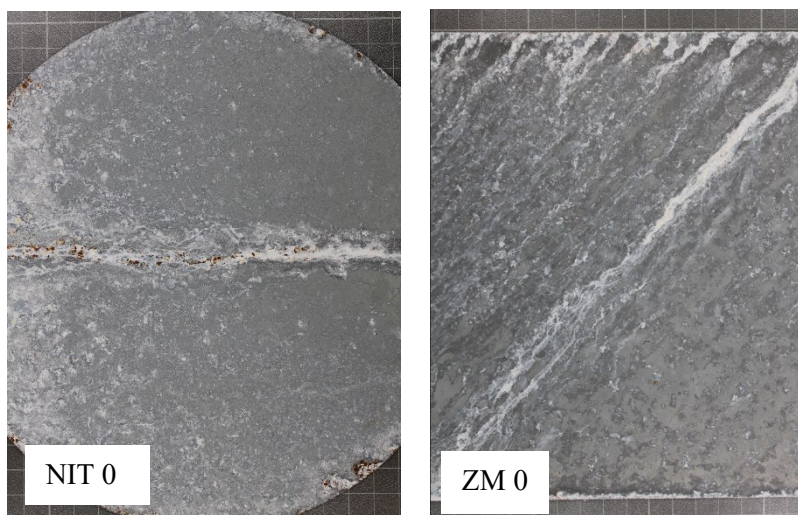
Obr. 65 Chemická analýza viditelná na vzorku NIT 1 (3 týdny koroze)



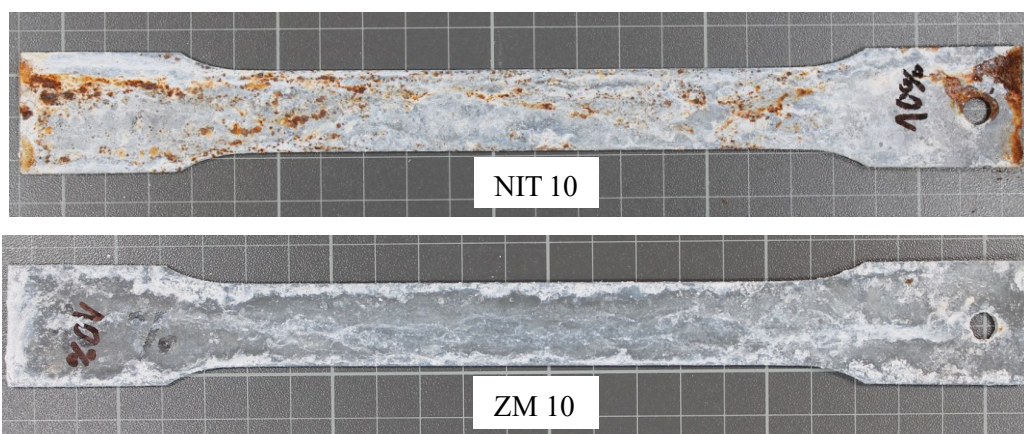
Obr. 66 Barevné mapy Al ve vytvořené oxidové vrstvě v NIT vzorcích. (3 týdny koroze)

### 3.7.3 Snímky vzorků po 6 týdnech v solné komoře

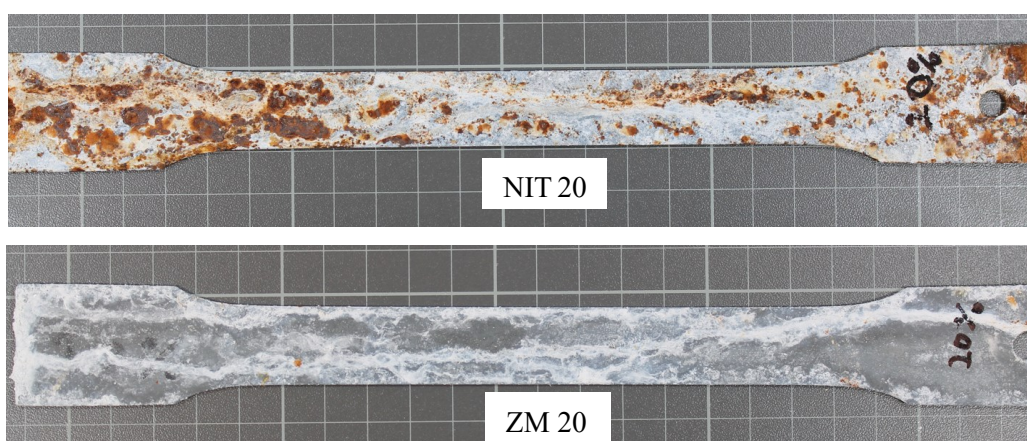
Na obrázcích Obr. 67 až Obr. 71 jsou ukázány vzorky po šesti týdnech urychleného korozního zkoušení dle testu PV 1210. V případě povlaku ZM se na povrchu neprojevil koroze základního materiálu. Došlo pouze k intenzivnější tvorbě bílé rzi. U povlaku NIT se projevil oblasti koroze oceli u všech vzorků. Vyšší míra koroze byla pozorována u vzorků s největší deformací a to NIT 20 a NIT 3.



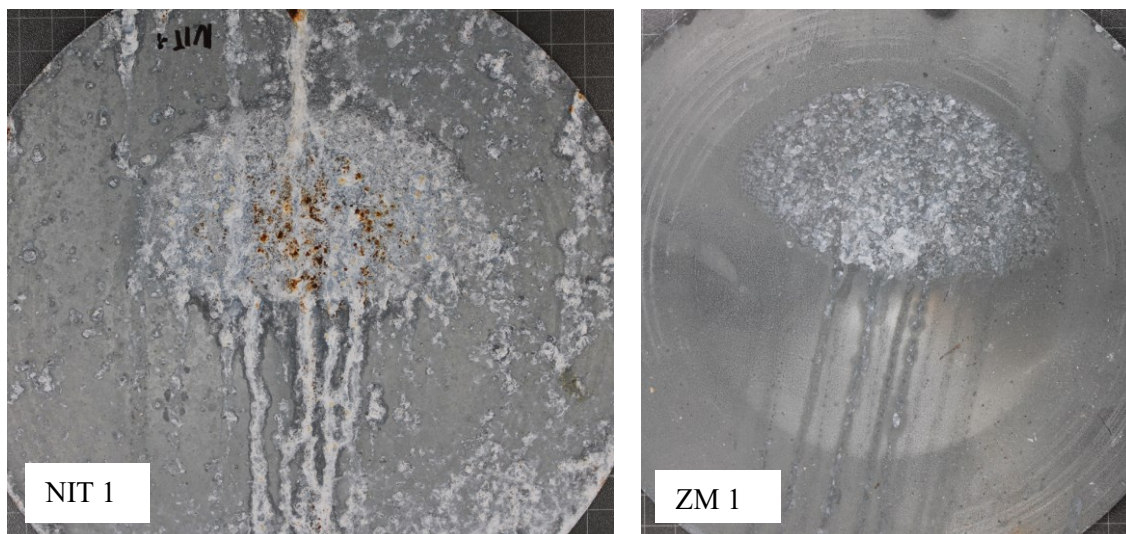
Obr. 67 Nedeformované vzorky



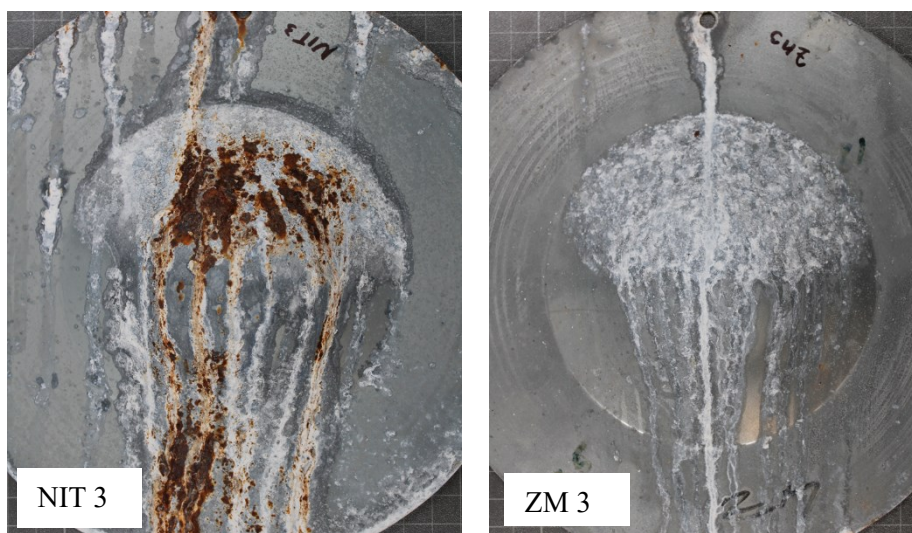
Obr. 68 Vzorky deformované jednoosým tahem (10 % poměrného prodloužení)



Obr. 69 Vzorky deformované jednoosým tahem (20 % poměrného prodloužení)



Obr. 70 Vzorky deformované víceosým tahem (výška tažení H=13 mm)



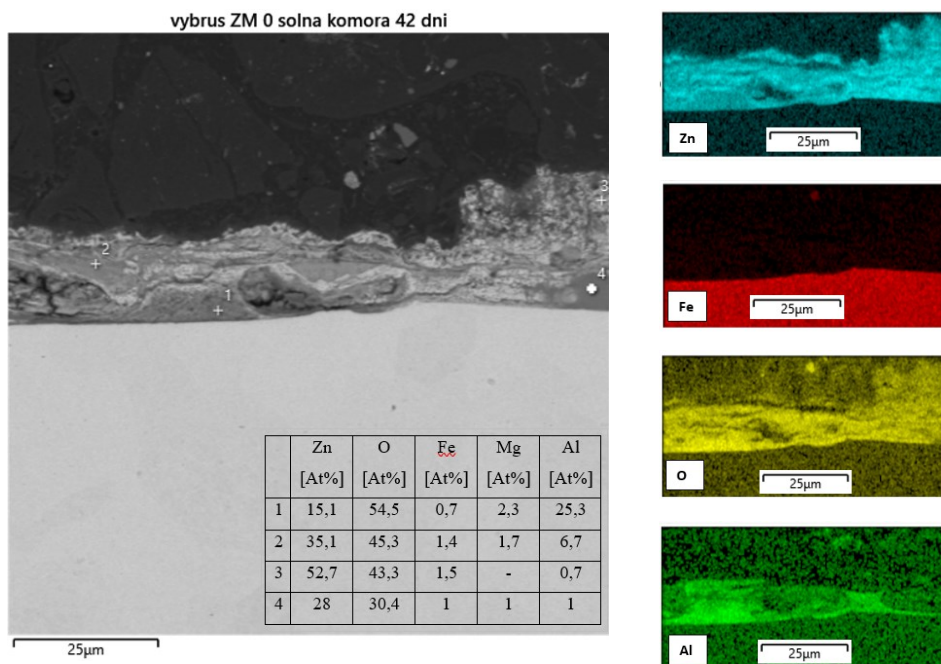
Obr. 71 Vzorky deformované víceosým tahem (výška tažení H=35 mm)

### **Chemické analýzy povrchu ZM povlaku po 6 týdnech v solné komoře**

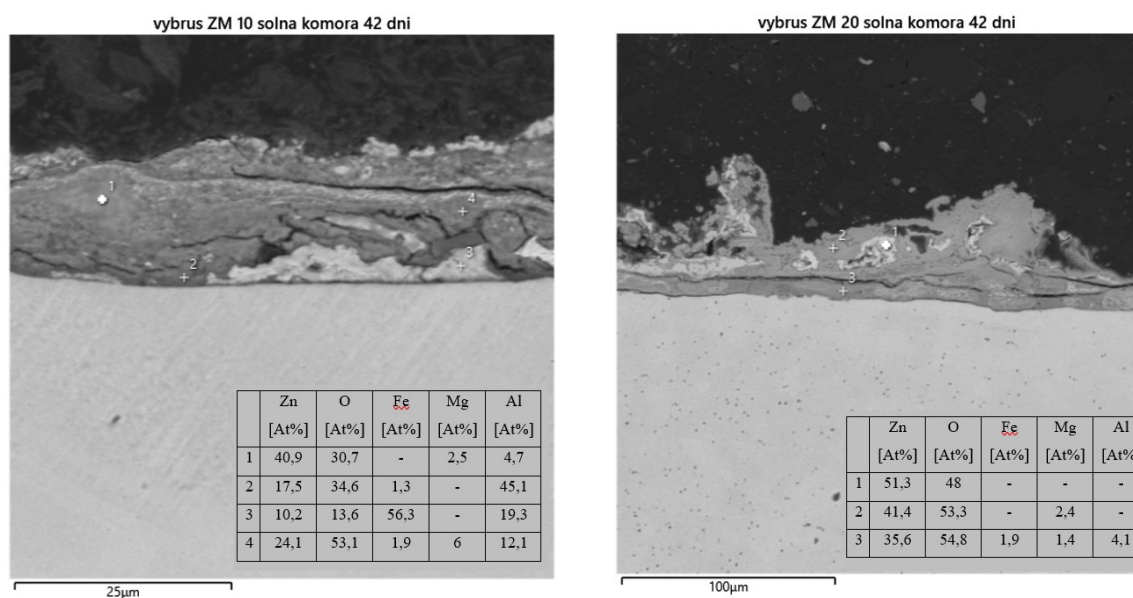
Při zkoumání povrchu ZM povlaku po 6 týdnech koroze v solné komoře bylo opět možné pozorovat pouze 2 oblasti. Oblast bez nečistot a oblast s bílým povlakem, tedy s bílou rzi. Jelikož výsledky získané chemickou analýzou těchto oblastí byly velmi podobné výsledkům získaných při sledování ZM povlaku po 3 týdnech jeho koroze, tyto analýzy zde nebyly uvedeny.

## Chemické analýzy metalografických výbrusů ZM povlaku po 6 týdnech v solné komoře

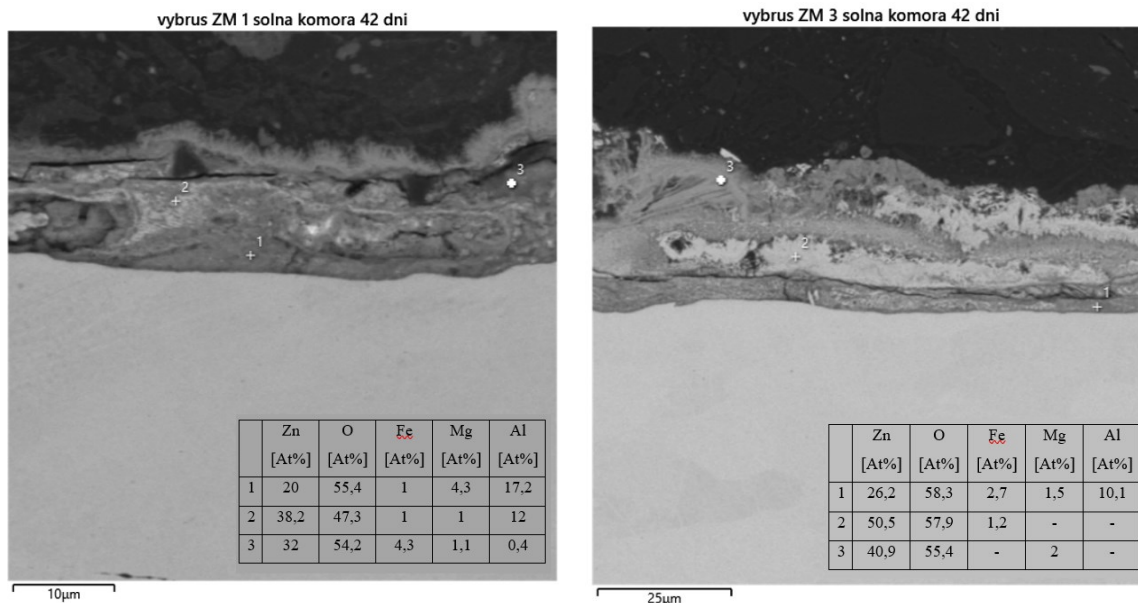
Z přiložených chemických analýz (Obr. 72 až Obr. 74) ZM povlaku je zřejmé, že i po 6 týdnech urychleného korozního zkoušení bylo ve vrstvě povlaku stále dostatečné množství zinku a nedocházelo tak ke korozi základního materiálu. Na Obr. 75 je opět na rozhraní plechu a povlaku možné vidět snímky vrstvy tvořené oxidy hliníku.



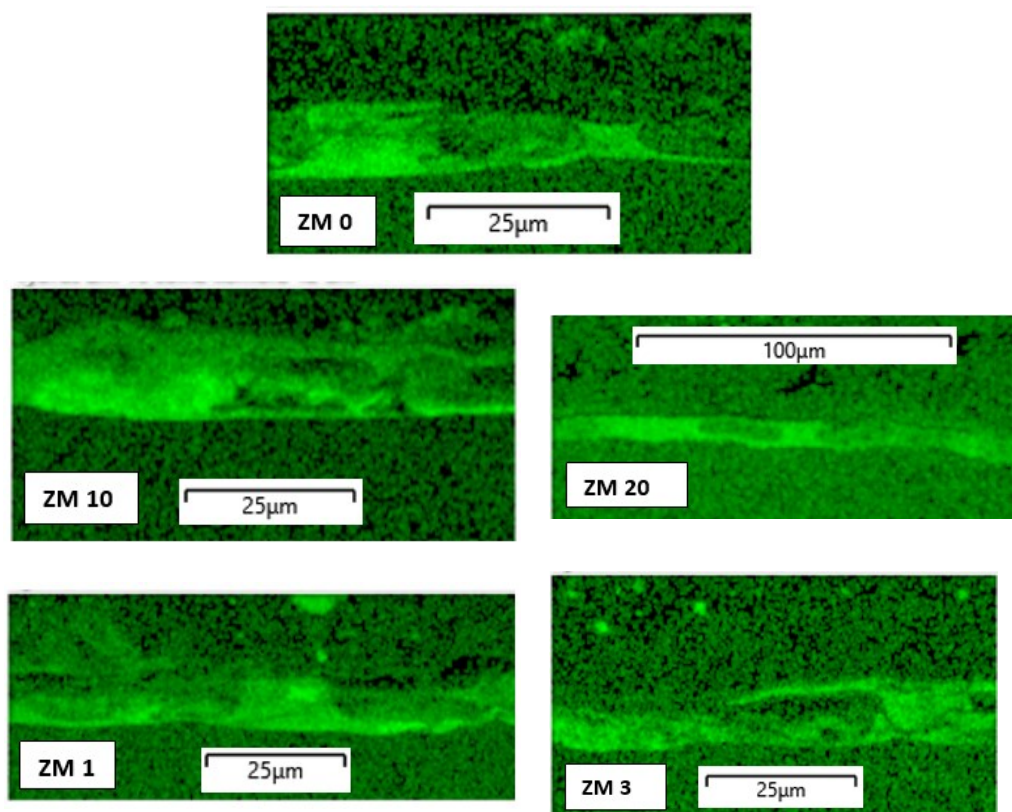
Obr. 72 Chemická analýza nedeformovaného vzorku se ZM povlakem. (6 týdnů koroze)



Obr. 73 Chemická analýza vzorků se ZM povlakem po jejich deformaci jednoosým tahem na hodnotu 10 % a 20 % poměrného prodloužení. (6 týdnů koroze)



Obr. 74 Chemická analýza vzorků se ZM povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení H=13 mm a H=35 mm. (6 týdnů koroze)



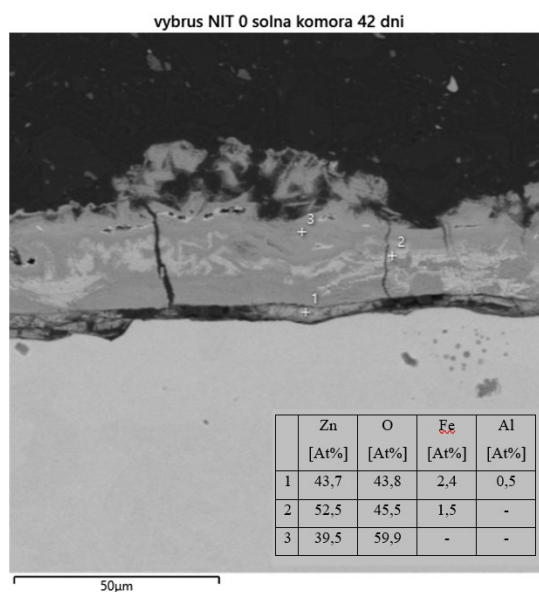
Obr. 75 Barevné mapy Al ve vytvořené oxidové vrstvě v ZM vzorcích. (3 týdny koroze)

### Chemické analýzy povrchu NIT povlaku po 6 týdnech v solné komoře

Jak je z kapitoly z fotografií vzorků s NIT povlakem zřejmé, na povlaku se po 6 týdnech urychleného korozního zkoušení projeví 3 oblasti. Protože chemické analýzy těchto oblastí již byly uvedeny dříve, je v přílohách uvedena pouze chemická analýza vzorku NIT3 viz příloha č. 12.

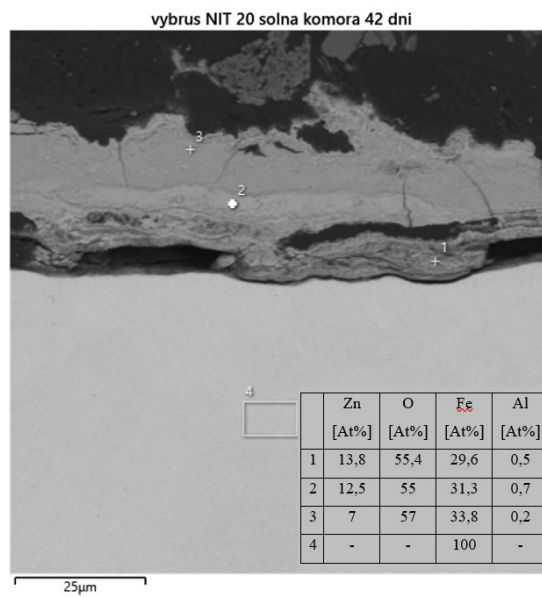
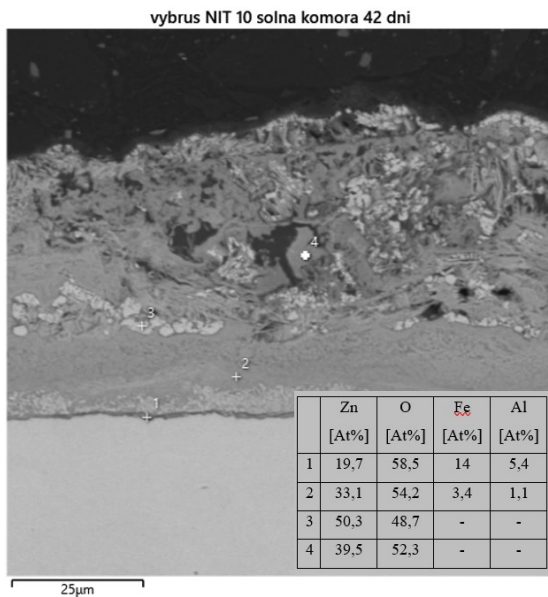
### Chemické analýzy metalografických výbrusů NIT povlaku po 6 týdnech v solné komoře

Chemické analýzy metalografických výbrusů ze vzorků s povlakem NIT lze sledovat na Obr. 76 až Obr. 78, kdy na analýzách vzorků NIT 20 a NIT 3 je možné vidět zřetelnou oxidaci ocelové matrice. Zároveň je na Obr. 79 možné pozorovat vrstvu tvořenou z oxidů hliníku. Opět je patrné, že oproti vzorkům se ZM povlakem (Obr. 75) je tato vrstva u NIT vzorků velmi tenká a necelistvá.

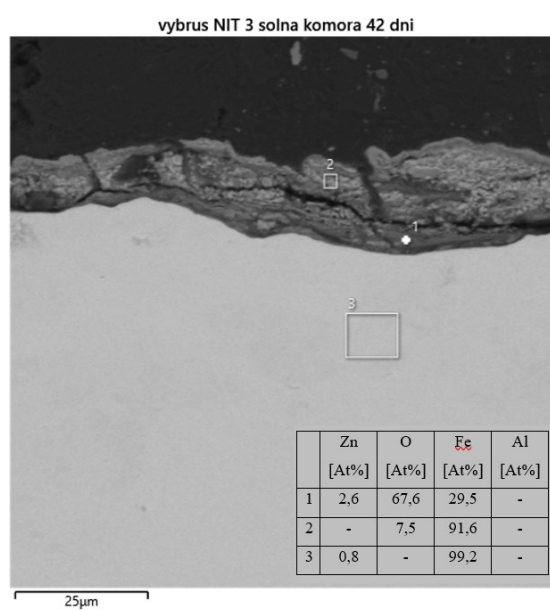
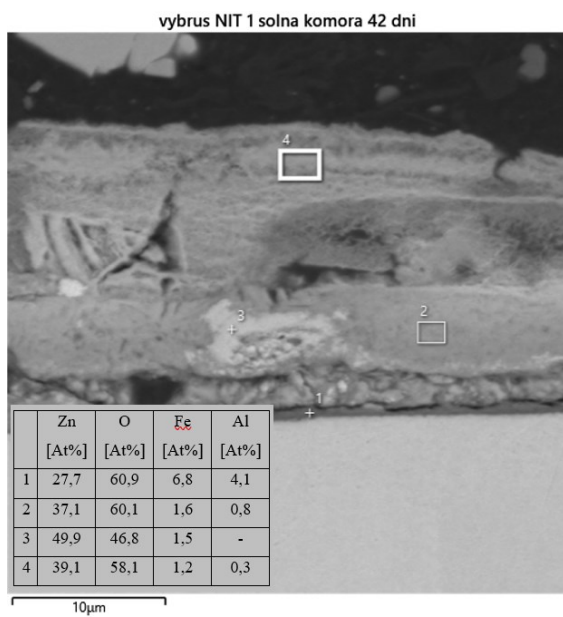


Obr. 76 Chemická analýza nedeformovaného vzorku s NIT povlakem. (6 týdnů koroze)

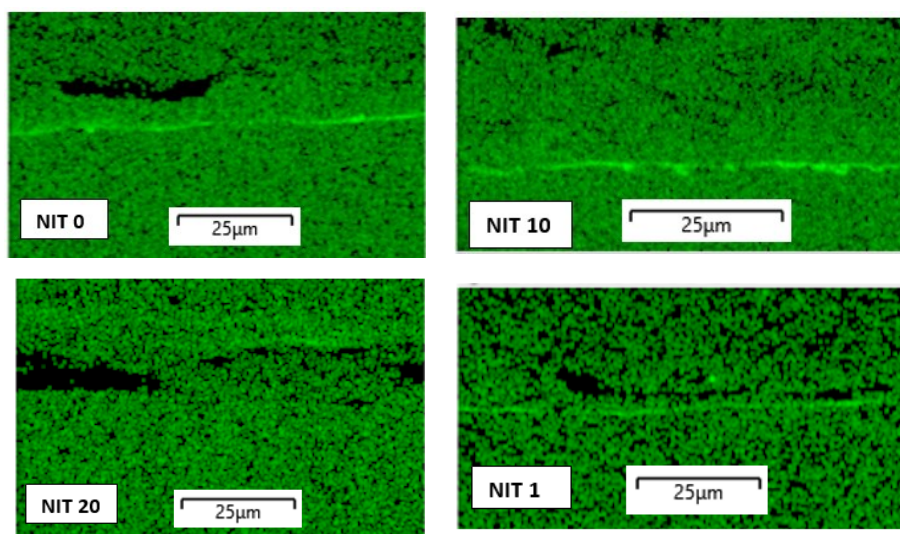




Obr. 77 Chemická analýza vzorků s NIT povlakem po jejich deformaci jednoosým tahem na hodnoty 10 % a 20 % poměrného prodloužení. (6 týdnů koroze)



Obr. 78 Chemické analýza vzorků s NIT povlakem po jejich deformaci víceosým tahem na výšky tažení H=13 mm a H=35 mm. (6 týdnů koroze)



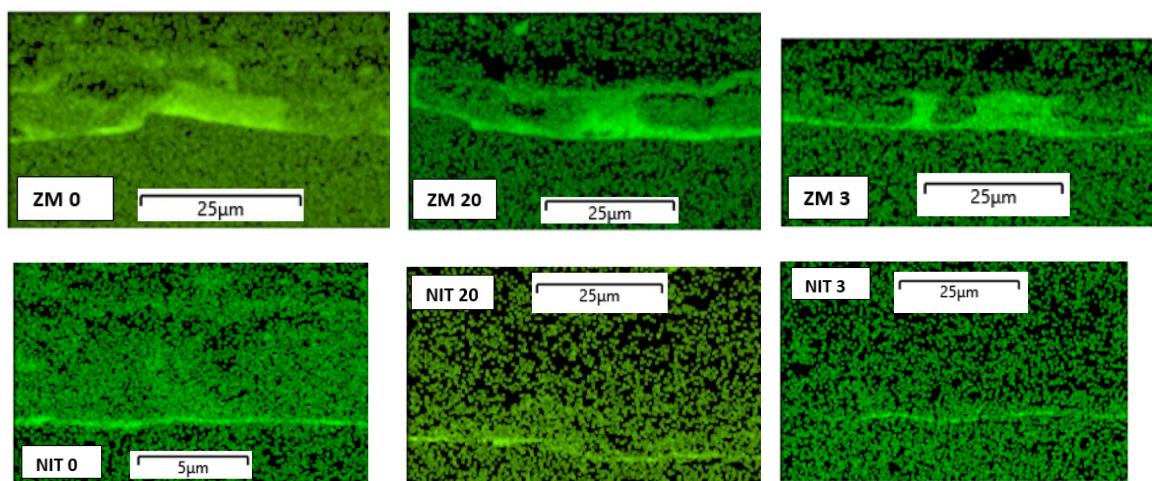
Obr. 79 Barevné mapy Al ve vytvořené oxidové vrstvě v NIT vzorcích. (6 týdnů koroze)

## 4 Diskuze výsledků

Ke zpracování této bakalářské práce byly použity dva hlubokotažné plechy vyrobené ze stejného materiálu s různými antikorozními povlaky. Jednalo se o zinkový povlak s NIT povrchovou úpravou a slitinový zinkohořčíkový povlak ZM. Z obou polotovarů bylo vyrobeno stejné množství vzorků po třech sadách, které byly stejným způsobem deformovány jednoosým a víceosým tahem na různé hodnoty přetvoření.

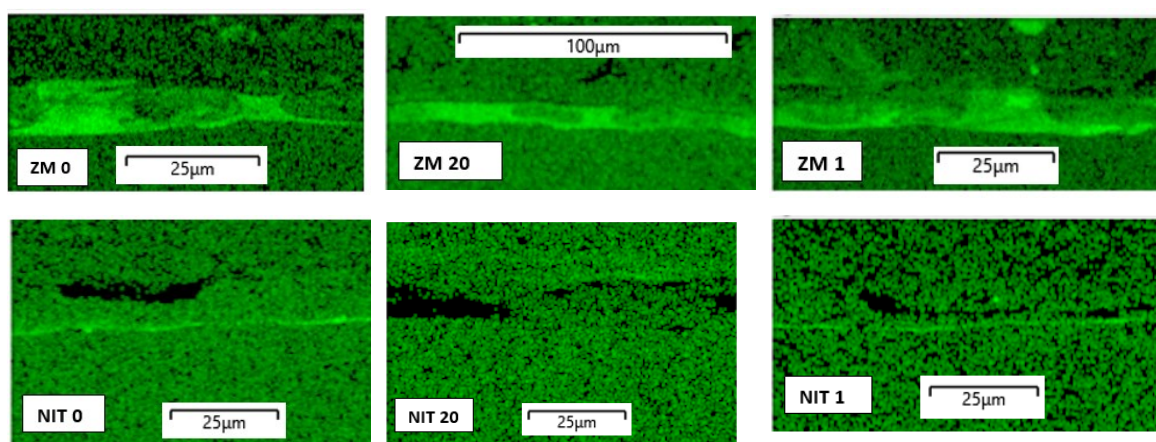
Po vyhodnocení mikroskopických snímků povrchů vzorků v kapitole 3.7.1 bylo na vzorcích se ZM povlakem možné pozorovat vytvořené trhliny. Při deformaci těchto vzorků jednoosým tahem na hodnoty 10 a 20 % poměrného prodloužení docházelo k tvorbě trhlin o šířce cca 2  $\mu\text{m}$ . Četnější, obdobně veliké trhliny o šířce 2-3  $\mu\text{m}$  vznikaly při deformaci vzorků víceosým tahem na výšku tažení  $H=13$  mm. Největší trhliny o šířce až 20  $\mu\text{m}$  byly pozorovány po deformaci víceosým tahem na mezní výšku tažení  $H=35$  mm. Po vyhodnocení povrchu vzorků s NIT povlakem nebylo pozorováno žádné porušení celistvosti povlaku u žádného ze vzorků. Předpokladem tedy bylo, že vzorky s NIT povlakem poskytnou ocelové matici dostatečnou protikorozi ochranu a k tvorbě koroze bude docházet u vzorků se ZM povlakem vlivem tvorby zmíněných trhlin.

Po třech týdnech urychleného korozního zkoušení dle testu PV 1210 se ovšem ukázalo, že tyto předpoklady byly mylné. Po odebrání vzorků ze solné komory bylo na povrchu vzorků se ZM povlakem možné pozorovat pouze tvorbu bílé vrstvy tvořené z oxidů zinku. Tedy tvorby bílé rzi, která byla intenzivnější u vzorků s větší velikostí přetvoření. Nebyla ovšem pozorována koroze základního materiálu. Jak lze vidět v kapitole 3.7.2 oblasti korozního napadení byly pozorovány u vzorků s NIT povlakem. Konkrétně se jednalo o vzorky NIT 20 a NIT 3. Ze všech vzorků byly následně zhotoveno metalografické výbrusy kolmých řezů. Studium metalografických výbrusů vzorků se ZM povlakem neprokázalo přítomnost podpovrchové koroze. Bylo pouze možné pozorovat tvorbu bílé rzi. Na metalografických výbrusech vzorků s NIT povlakem bylo možné sledovat jak tvorbu bílé rzi, tak i vytvořené oxidy železa. Při dalším zkoumání metalografických výbrusů bylo zjištěno, že u obou druhů povlaků dochází na rozhraní základního materiálu a povlaku k tvorbě vrstvy na bázi hliníkových oxidů viz Obr. 80. Tato vrstva byla širší a celistvější u vzorků se ZM povlakem. To by mohl být důvod, proč byla koroze pozorována u vzorků s NIT povlakem, a ne u vzorků se ZM povlakem.



Obr. 80 Porovnání vrstvy na bázi oxidů hliníku u vzorků s NIT a ZM povlakem (3 týdny koroze)

Ani po 6 týdnech korozního zkoušení v solné komoře, jak lze vidět v kapitole 3.7.3, nebyla u vzorků se ZM povlakem pozorována oxidace ocelové matrice. Pozorovatelná byla pouze intenzivnější tvorba bílé rzi. U vzorků s NIT povlakem došlo ke korozi základního materiálu u všech vzorků, kdy se největší oblasti korozního napadení projeví u vzorků s největší velikostí přetvoření. Po vyhodnocení mikroskopických snímků metalografických výbrusů nebyla ani v tomto případě u vzorků se ZM povlakem pozorována tvorba podpovrchové koroze, narozdíl od vzorků s NIT povlakem. Obdobně jako u vzorků po třítýdenním korozním testu, byla i po 6 týdnech v případě vzorků se ZM povlakem pozorována tvorba mezivrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Po vyhodnocení vrstvy tvořené oxidy hliníku bylo opět možné pozorovat stejné rozdíly mezi vzorky s NIT a ZM povlakem viz Obr. 81.



Obr. 81 Porovnání vrstvy na bázi oxidů hliníku u vzorků s NIT a ZM povlakem (6 týdnů koroze)

## 5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovení vlivu deformace na korozní odolnost plechů s povlakem ZnMg. Vliv deformace na korozní odolnost tohoto povlaku byl srovnáván s plechem, který byl opatřen NIT povlakem. V praktické části bakalářské práce byly získány následující poznatky:

- Vzorky se ZM a NIT povlakem byly deformovány jednoosým a víceosým tahem. Po deformaci vzorků bylo zjištěno, že u vzorků se ZM povlakem dochází k tvorbě trhlin povlaku. Vzorky s NIT povlakem zůstaly bez porušení.
- Předpokladem bylo, že vlivem trhlin dojde ke korozi vzorků se ZM povlakem. Po urychleném korozním zkoušení však došlo ke korozi vzorků s NIT povlakem a vzorky se ZM povlakem nekorodovaly.
- Po vyhodnocení mikroskopických snímků metalografických výbrusů příčných řezů vzorků byla u vzorků se ZM povlakem pozorována mezivrstva na bázi hliníkových oxidů, která u vzorků s NIT povlakem byla velmi tenká, necelistvá nebo žádná.

Na základě chemických analýz je tedy zřejmé, že ZM povlak poskytl deformovaným vzorkům dostatečnou protikorozní ochranu. Vliv a velikost přetvoření měl u vzorků se ZM povlakem pouze vliv na intenzitu tvorby bílé rzi.

ZM povlaky jsou však při výrobě karosářských dílů problematické vzhledem ke své křehkosti a nízké plasticitě, kvůli kterým často dochází k tvorbě trhlin v základním materiálu a tím i destrukci dílů. Z toho důvodu bych doporučil věnovat se podrobnějšímu studiu vznikající hliníkové mezivrstvy. Ta má z hlediska korozní ochrany potenciál zcela nahradit křehký ZM povlak při zachování plasticity plechu.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] Příručka žárového zinkování. [4., aktualiz. vyd.]. Ostrava: Asociace českých a slovenských zinkoven, [2011]. ISBN 978-80-260-3324-0.
- [2] Materiály a jejich chování při svařování: učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, 2016.
- [3] KRAUS, Václav. Povrchy a jejich úpravy. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [4] PILVOUSEK, Tomáš a Jan ŠANOVEC. Lehké konstrukce automobilů - Specifické povlaky hlubokotažných ocelí. In: MM Průmyslové spektrum [online]. Praha, 2016 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-specificke-povlaky-hlubokotaznych-oceli>
- [5] Povlaky ocelí pro automobilový průmysl. In: Workswell [online]. 2017 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/>
- [6] SOLFRONK, Pavel. Nепublikovaný dokument.
- [7] GRANDHI, Srinivasulu, V.S. RAJA a Smrutiranjana PARIDA. Effect of manganese addition on the appearance, morphology, and corrosion resistance of hot-dip galvanized zinc coating. Surface and Coatings Technology [online]. 2021, 421 [cit. 2023-05-09]. ISSN 02578972. Dostupné z: [doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127377](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127377)
- [8] Galvanické pokovení. In: Galvanovna omega [online]. Praha [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <http://www.galvanovnaomega.cz/pokov/pokoveni.html>
- [9] Divize povrchových úprav materiálu. In: MetPro [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.metpro-sro.eu/DIVIZE-POVRCHOVÝCH-ÚPRAV-MATERIÁLŮ>
- [10] NOVÁ, Iva. Koroze a povrchové úpravy [online]. In: . Liberec, 2020 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/course/view.php?id=6049>

- [11] Katodové lakování. In: Lakol s.r.o [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <http://www.lakol.cz/project/katoforeza/>
- [12] SOLFRONK, Pavel. Technologie tažení [online]. In: . Liberec [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/course/view.php?id=6973>
- [13] Technologie plošného tváření - tažení [online]. In: . Liberec [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: [https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/09.htm](https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm)
- [14] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-244-8.
- [15] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [16] LUHMANN, Thomas. Close range photogrammetry: principles, techniques and applications. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-184995-057-2.
- [17] CIBULKA, Miloš. Fotogrammetrie: Laserové skenování [online]. In: . Brno [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: [http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/geodezie/geodezie\\_2018/fotogrammetrie.pdf](http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/geodezie/geodezie_2018/fotogrammetrie.pdf)
- [18] BÖHM, Jozef. Fotogrammetrie. Ostrava, 2002. Dostupné také z: <https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/544/.content/galerie-souboru/skripta/Fotogrammetrie.pdf>
- [19] ČSN EN ISO 12004-2. Kovové materiály-Stanovení křivek mezní tvářitelnosti pro plechy a pásy-Část 2: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti v laboratoři
- [20] TAYLAN, Alan a Tekkaya ERMAN. Sheet metal forming: Fundamentals. Materials Park (Ohio): ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-842-8.
- [21] SOLFRONK, Pavel a Jiří SOBOTKA. Měření materiálových vlastností - 1. Liberec, 2021.
- [22] PILAŘ, Petr. Využití fotogrammetrie pro výzkum deformace materiálu v oblasti mezních přetvoření. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [23] SOLFRONK, Pavel. Diagram mezních přetvoření. Technická univerzita v Liberci

- [24] Konzernnorm PV 1210: Interní norma Volkswagen Group. 2010.
- [25] PROŠEK, Tomáš. Urychlené korozní zkoušky. In: Technopark Kralupy [online]. Kralupy, 2022 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/urychlene-korozni-zkousky>



## Seznam příloh

- Příloha č. 1** Statická zkouška tahem vzorku s NIT povlakem
- Příloha č. 2** Statická zkouška tahem vzorku s ZM povlakem
- Příloha č. 3** Chemická analýza vzorku se ZM povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení  $H=13$  mm. (3 týdny koroze)
- Příloha č. 4** Chemická analýza vzorku se ZM povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení  $H=35$  mm. (3 týdny koroze)
- Příloha č. 5** Chemická analýza vzorku se ZM povlakem po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 10 % poměrného prodloužení. (3 týdny koroze)
- Příloha č. 6** Chemická analýza bílé rzi na ZM povlaku po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 20 % poměrného prodloužení (3 týdny koroze)
- Příloha č. 7** Chemická analýza čistého ZM povlaku po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 20 % poměrného prodloužení (3 týdny koroze)
- Příloha č. 8** Chemická analýza bílé rzi na nedeformovaném NIT povlaku (3 týdny koroze)
- Příloha č. 9** Chemická analýza čistého, nedeformovaného NIT povlaku (3 týdny koroze)
- Příloha č. 10** Chemická analýza vzorku s NIT povlakem po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 10 % poměrného prodloužení. (3 týdny koroze)
- Příloha č. 11** Chemická analýza vzorku s NIT povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení  $H=13$  mm. (3 týdny koroze)
- Příloha č. 12** Chemická analýza vzorku s NIT povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení  $H=35$  mm. (6 týdnů koroze)

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

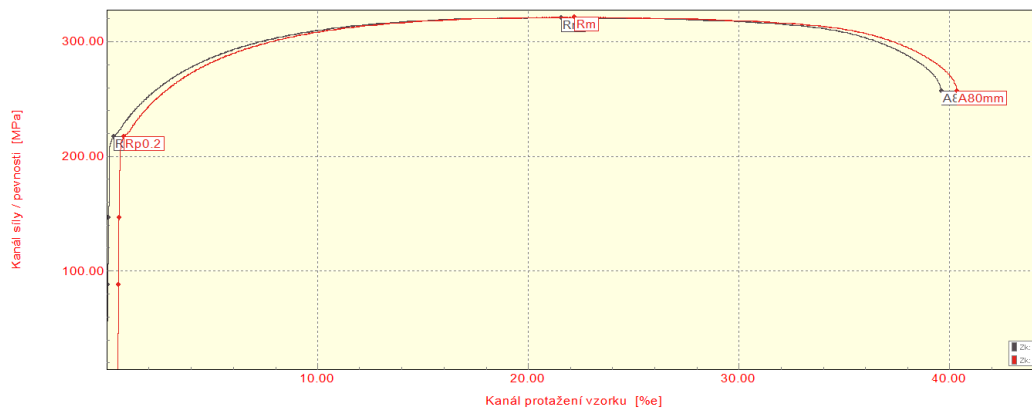
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH-GI 40/40 E-O + NIT  
 Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm  
 Směr odebrání vzorku : 0°  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Petr Jánský  
 Datum provedení testu : 18.1.2023  
 Pozn. : výrobce Arcelor

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	216.9	321.1	21.38	39.48
2	216.9	321.3	21.52	39.72

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	2	2	2	2
Průměrná hodnota	216.9	321.2	21.45	39.60
Směrodatná odchylka	0.0	0.1	0.10	0.18
Minimální hodnota	216.9	321.1	21.38	39.48
Maximální hodnota	216.9	321.3	21.52	39.72



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

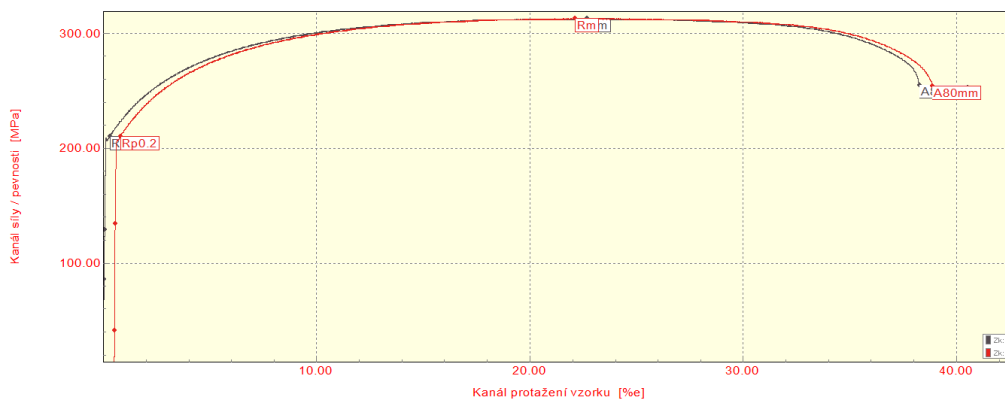
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR180 BH-ZM 40/40 E-O  
 Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm  
 Směr odebrání vzorku : 0°  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Petr Jánský  
 Datum provedení testu : 18.1.2023  
 Pozn. : výrobce Voest Alpine

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	210.5	312.9	22.54	38.14
2	210.2	312.9	21.48	38.27

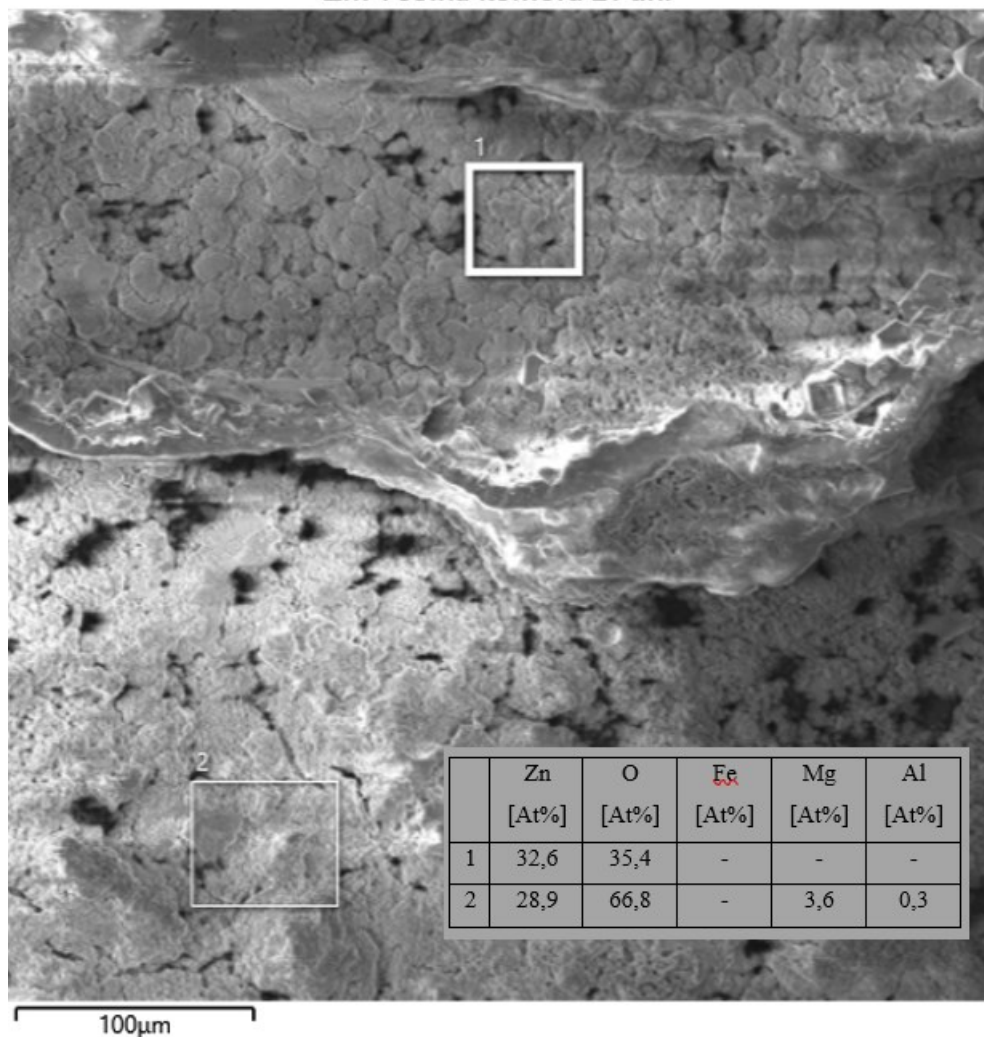
Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	2	2	2	2
Průměrná hodnota	210.3	312.9	22.01	38.20
Směrodatná odchylka	0.2	0.0	0.75	0.10
Minimální hodnota	210.2	312.9	21.48	38.14
Maximální hodnota	210.5	312.9	22.54	38.27



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

Příloha č. 3

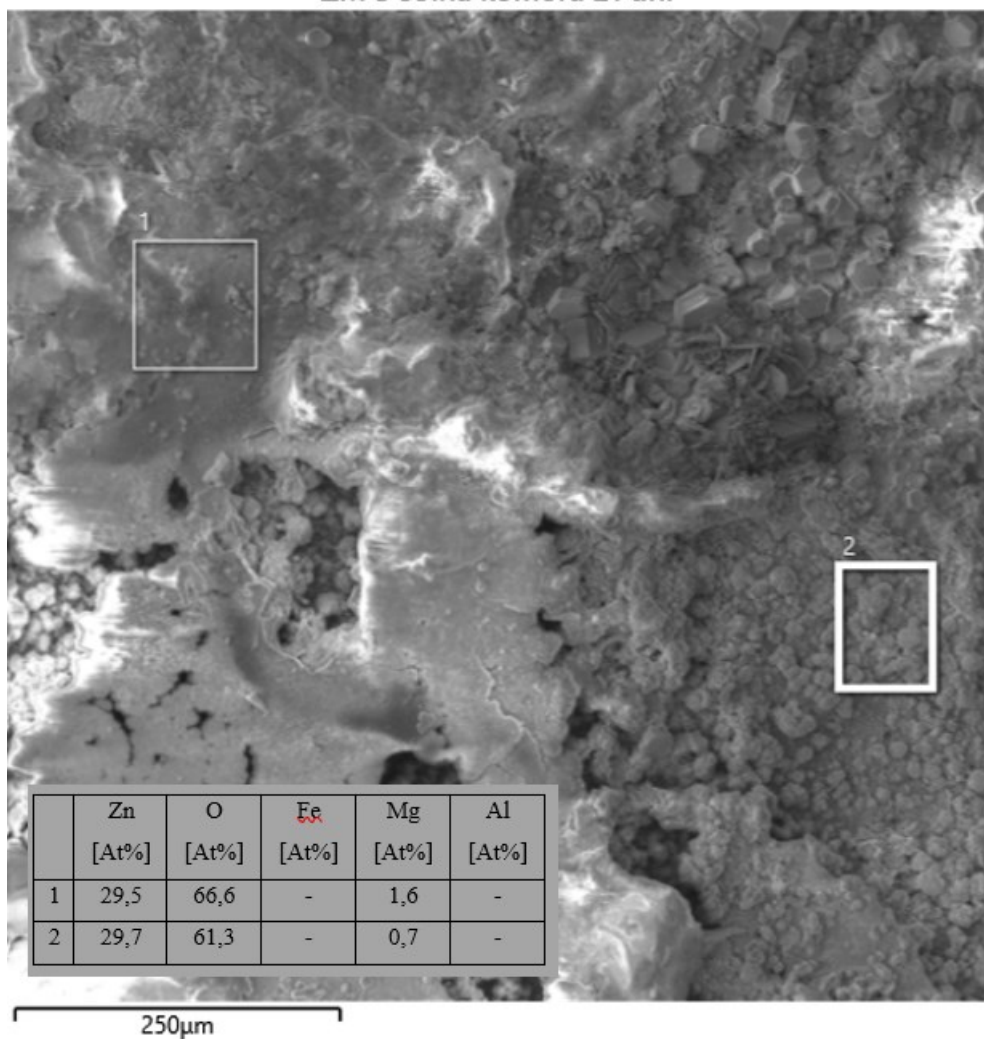
ZM 1 solna komora 21 dni



Obr. 82 Chemická analýza vzorku se ZM povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení H=13 mm. (3 týdny koroze)

Příloha č. 4

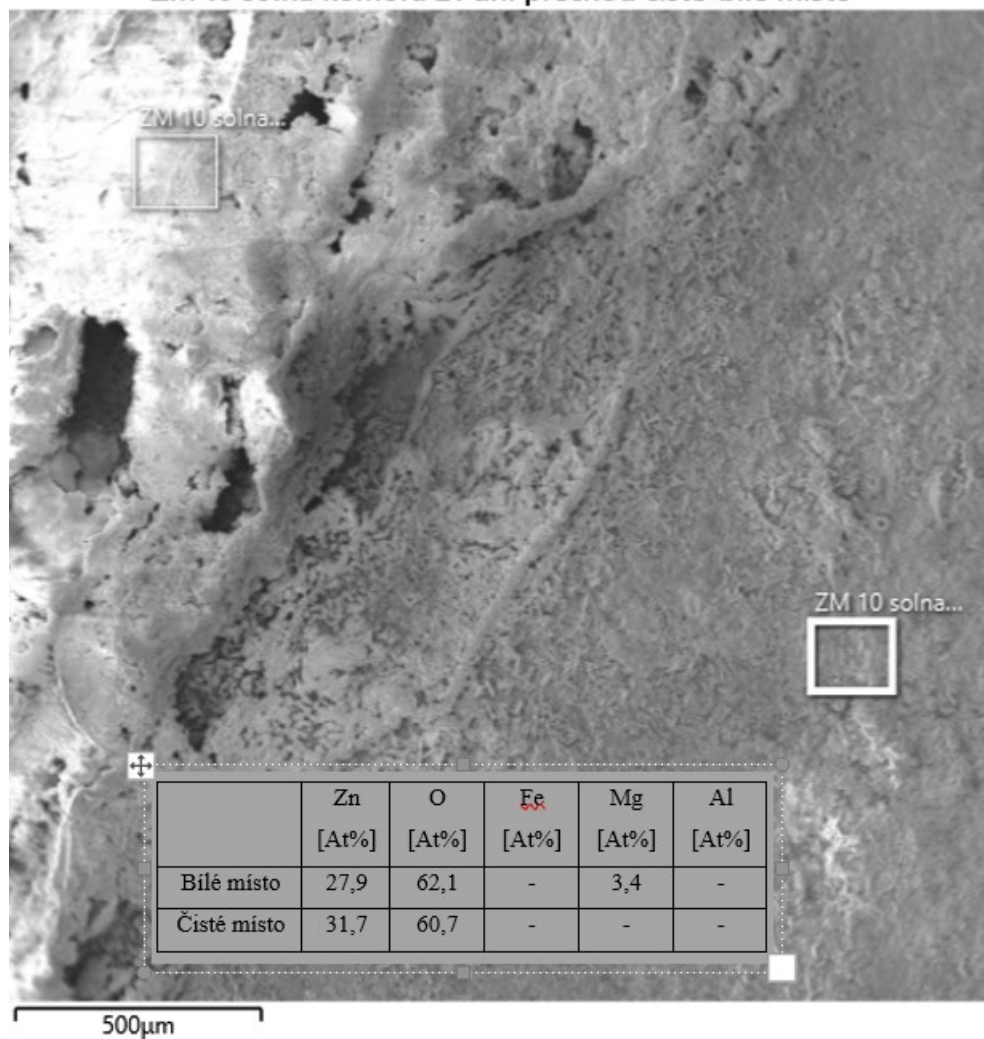
ZM 3 solna komora 21 dni



Obr. 83 Chemická analýza vzorku se ZM povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení H=35 mm. (3 týdny koroze)

Příloha č. 5

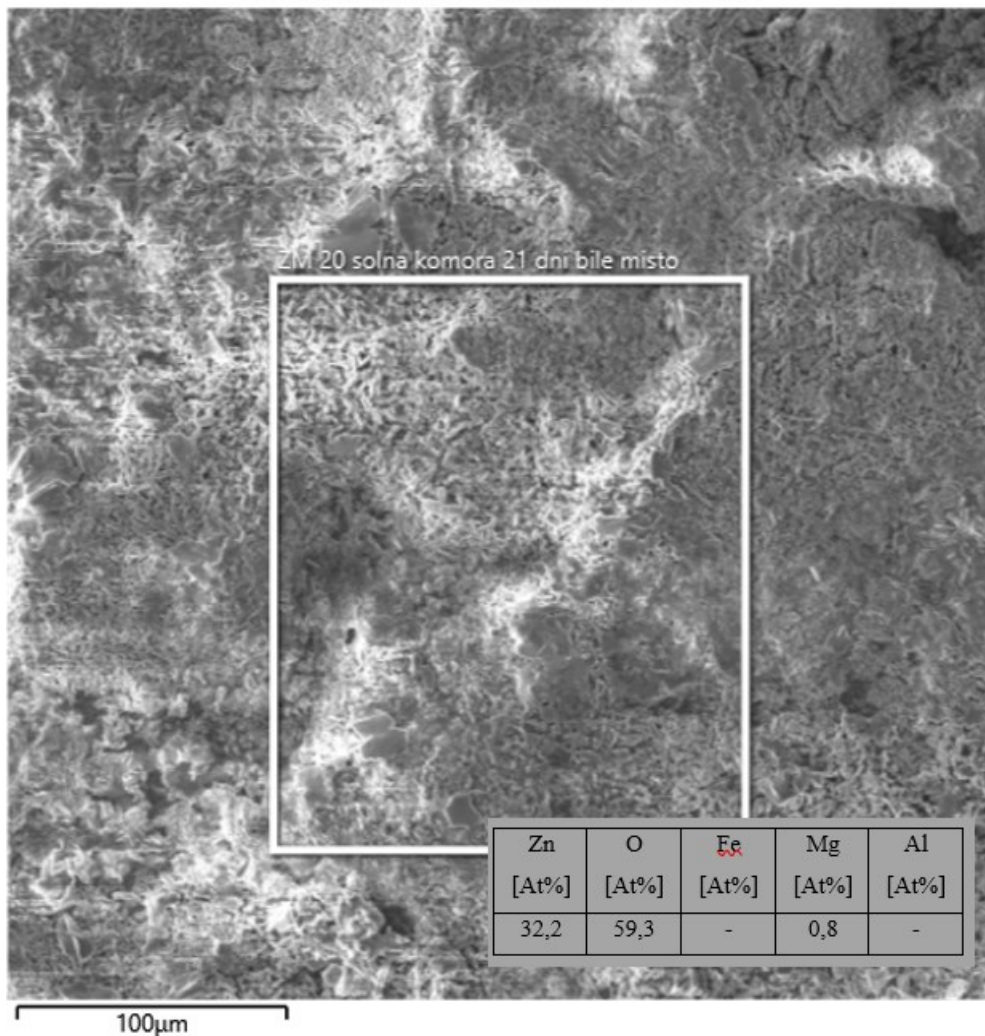
ZM 10 solna komora 21 dni prechod ciste-bile misto



Obr. 84 Chemická analýza vzorku se ZM povlakem po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 10 % poměrného prodloužení. (3 týdny koroze)

Příloha č. 6

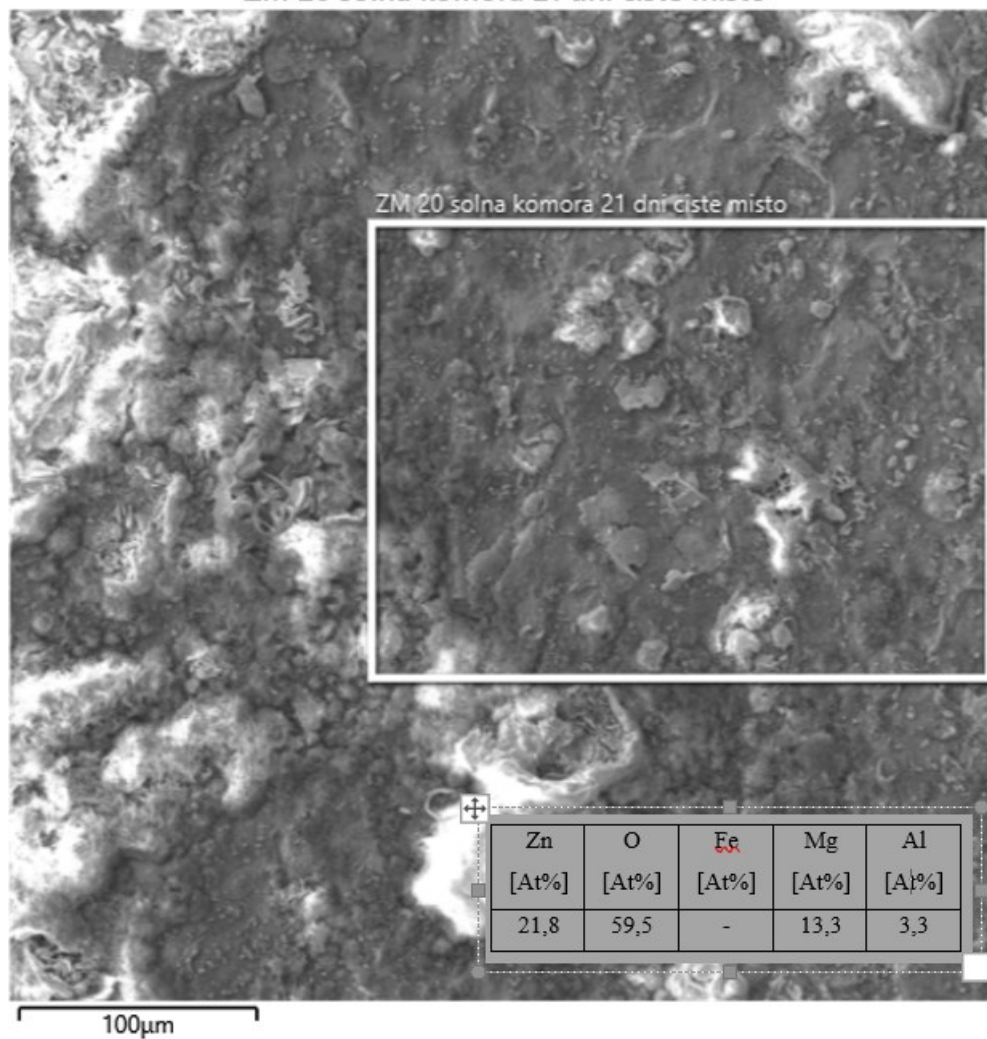
ZM 20 solna komora 21 dni bile misto



Obr. 85 Chemická analýza bíle rzi na ZM povlaku po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 20 % poměrného prodloužení (3 týdny koroze)

Příloha č. 7

ZM 20 solna komora 21 dni ciste misto

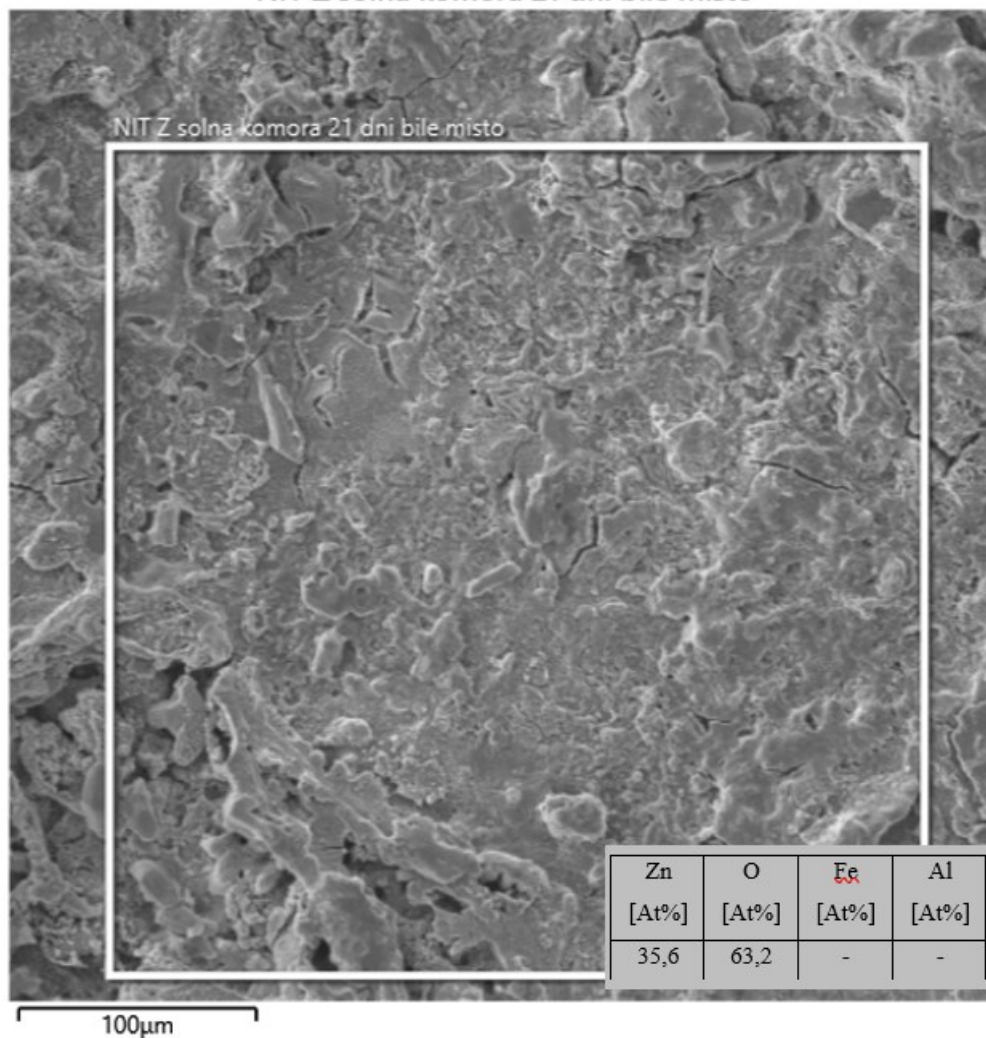


Obr. 86 Chemická analýza čistého ZM povlaku po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 20 % poměrného prodloužení (3 týdny koroze)



Příloha č. 8

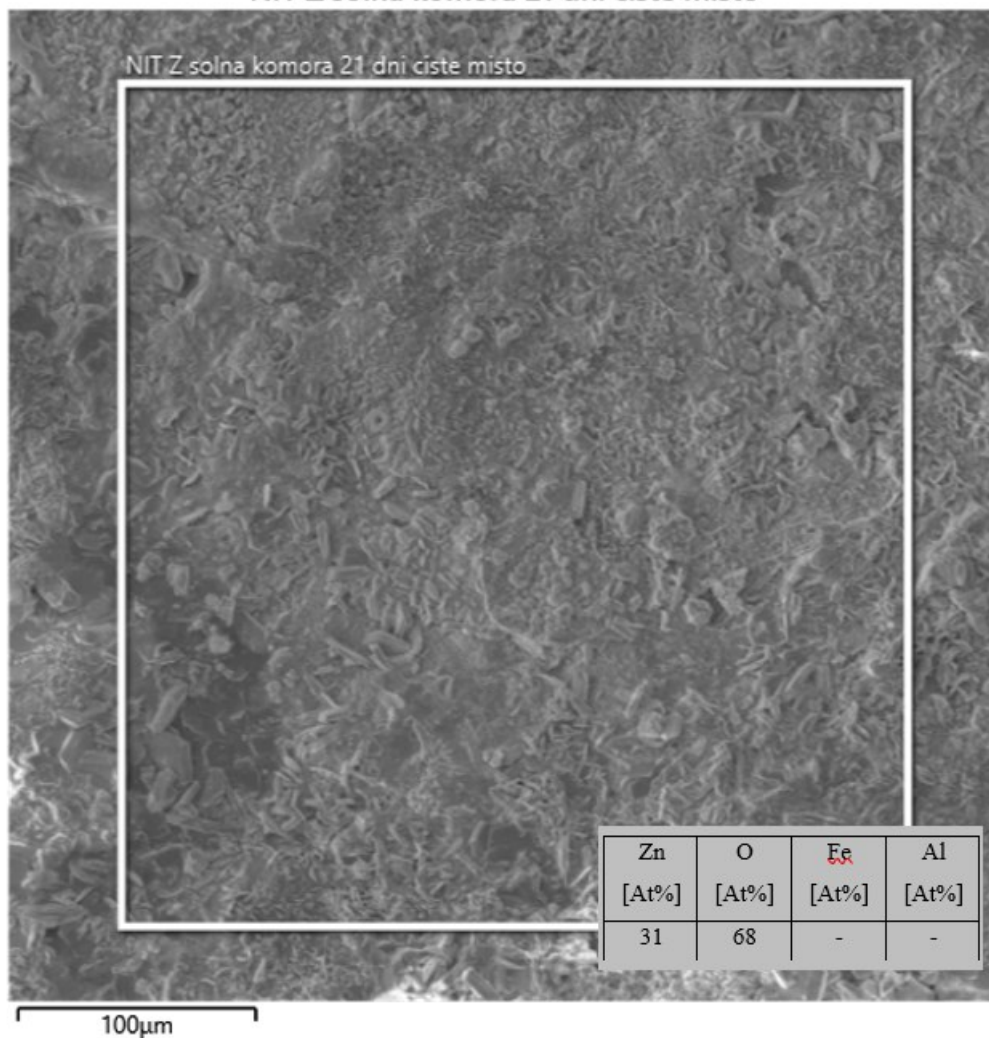
NIT Z solna komora 21 dni bile misto



Obr. 87 Chemická analýza bílé rzi na nedeformovaném NIT povlaku (3 týdny koroze)

Příloha č. 9

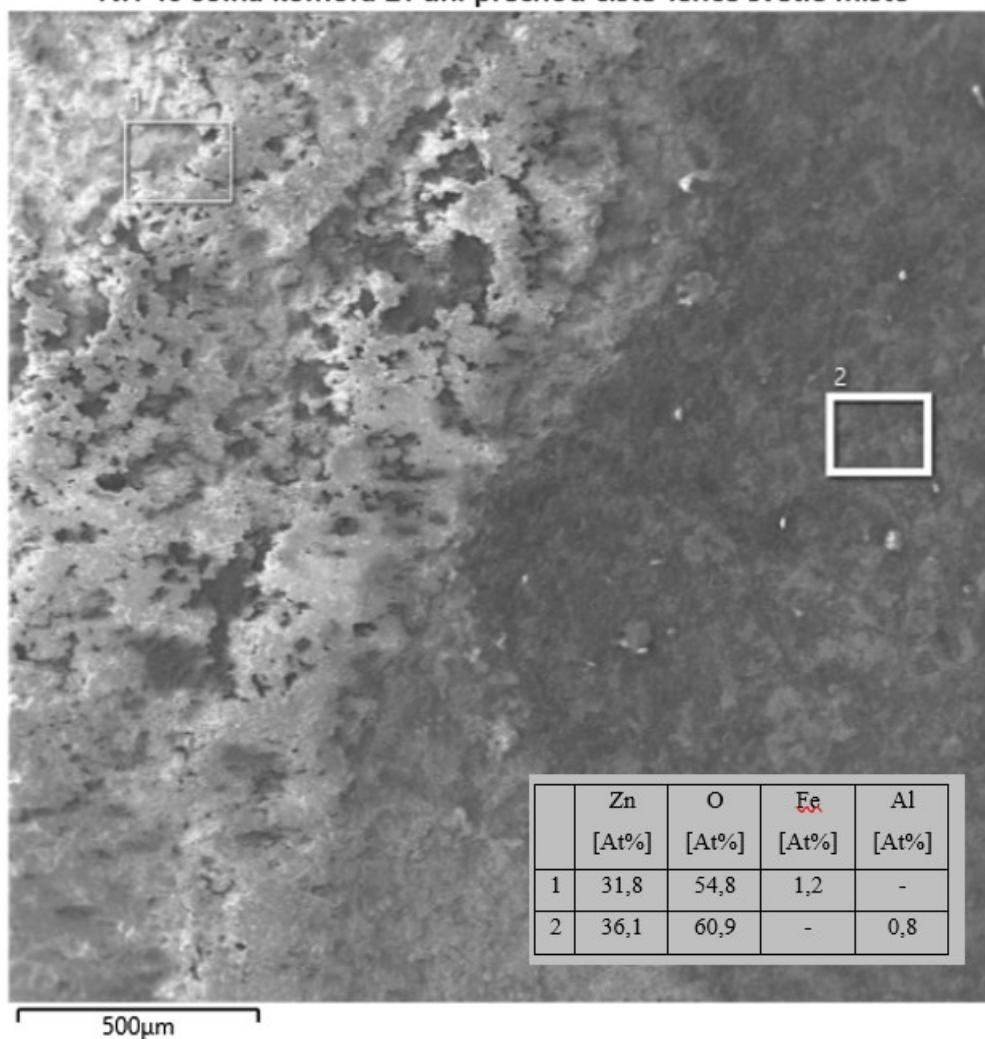
NIT Z solna komora 21 dni ciste misto



Obr. 88 Chemická analýza čistého, nedeformovaného NIT povlaku (3 týdny koroze)

Příloha č. 10

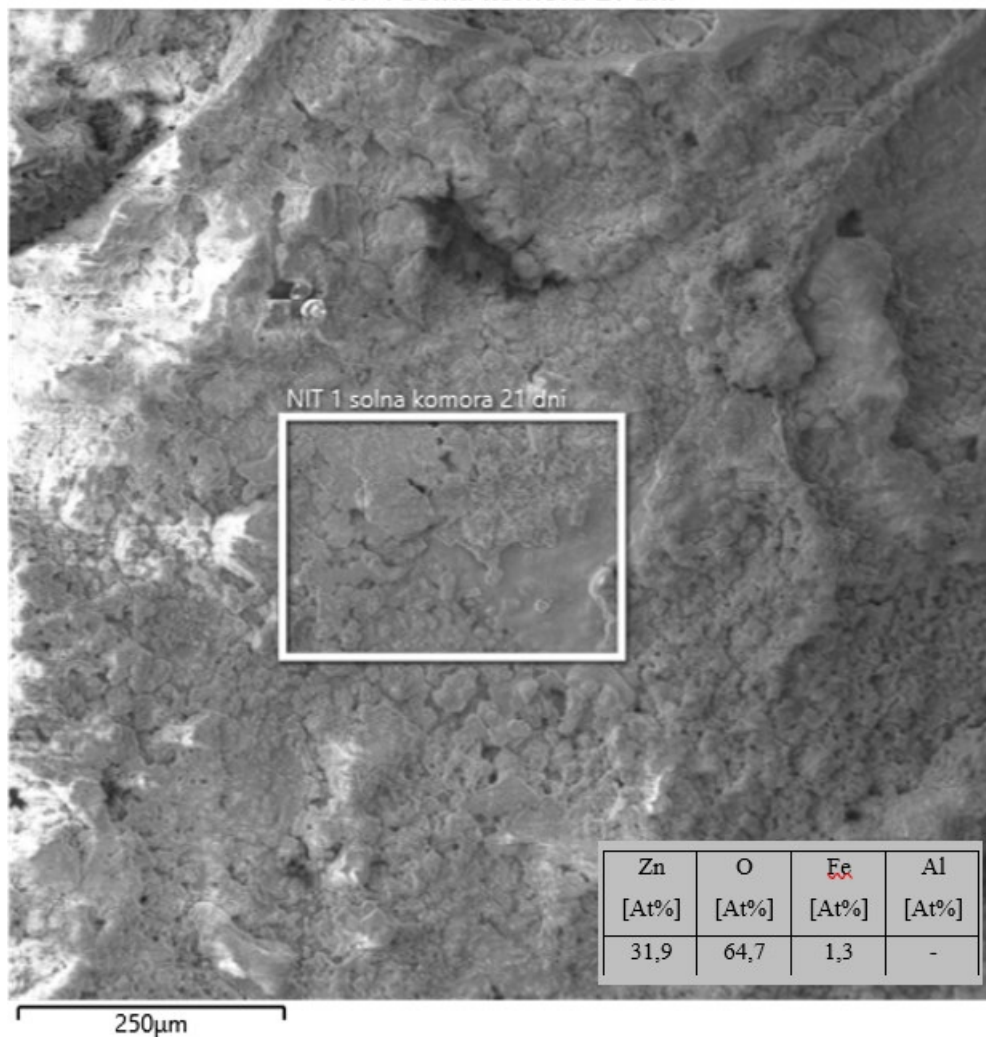
NIT 10 solna komora 21 dni prechod ciste-lehce svetle misto



Obr. 89 Chemická analýza vzorku s NIT povlakem po jeho deformaci jednoosým tahem na hodnotu 10 % poměrného prodloužení. (3 týdny koroze)

Příloha č. 11

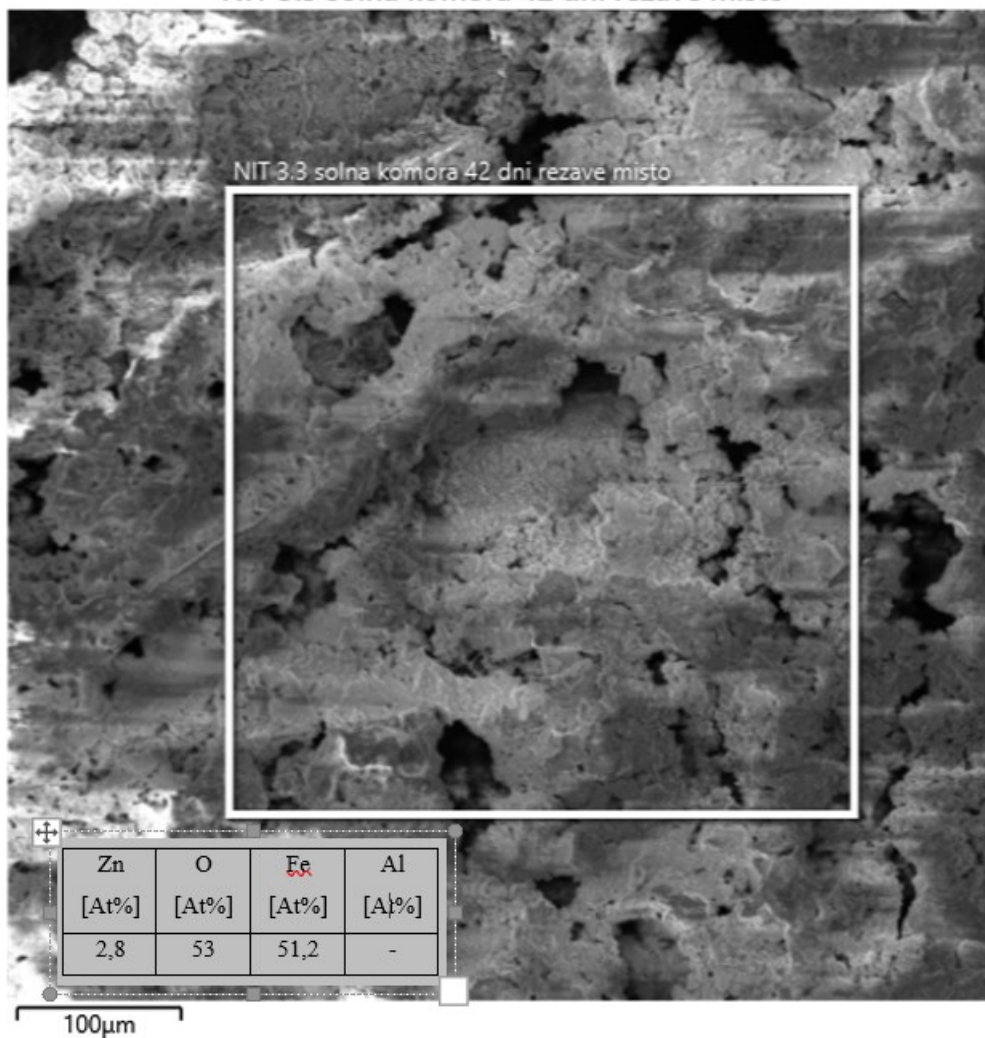
NIT 1 solna komora 21 dni



Obr. 90 Chemická analýza vzorku s NIT povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení H=13 mm. (3 týdny koroze)

Příloha č. 12

NIT 3.3 solna komora 42 dni rezave misto



Obr. 91 Chemická analýza vzorku s NIT povlakem po jeho deformaci víceosým tahem na výšku tažení H=35 mm. (6 týdnů koroze)