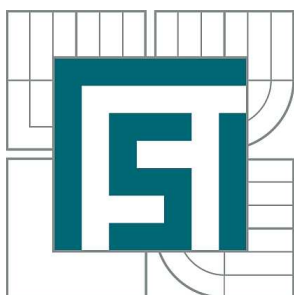


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

## STUDIUM KOROZE V MÍSTĚ NÝTOVANÝCH SPOJŮ MATERIÁLOVĚ ROZDÍLNÝCH DÍLŮ PANELU LETADLA V PROSTŘEDÍ SOLNÉ MLHY

THE CORROSION STUDY AT THE SITE OF RIVETED JOINTS OF MATERIAL DIFFERENT PART  
OF AIRCRAFT IN THE SALT SPRAY ENVIRONMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK JEČMÍNKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. BOHUMIL PACAL, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2010/11

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Ječmínka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911R011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

**Studium koroze v místě nýtovaných spojů materiálově rozdílných dílů panelu letadla v prostředí solné mlhy**

v anglickém jazyce:

**The corrosion study at the site of riveted joints of material different part of aircraft in the salt spray environment**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá kvalitativním i kvantitativním posouzením korozního děje v prostředí solné mlhy v místech nýtových spojů potahového plechu s výztuhou panelu letadla za definovaných vnějších podmínek.

Cíle bakalářské práce:

Provést popis použité Al slitiny na panel letadla - charakteristika, chemické složení, tepelné zpracování, struktura a vlastnosti.

Popsat metodiky zkoušení a hodnocení korozního napadení.

Provést zkoušky v korozní komoře se solnou mlhou na vzorcích bez a s povrchovou ochranou. Vyhodnotit vzorky po korozním napadení v místě nýtových spojů.

Seznam odborné literatury:

- [1] MICHNA, Š a kol.: Encyklopedie hliníku, ADIN, s.r.o.Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4
- [2] ROBERGE, P. R.: Handbook of Corrosion Engineering, McGraw/Hill, NY, 1999
- [3] ČERNÝ, M a kol.: Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů, SNTL Praha 1984
- [4] BARTONÍČEK, R. aj.: Koroze a protikorozi ochrana kovů, Akademia Praha, 1966
- [5] HRUBÝ, V., TULKA, J. : Koroze a ochrana materiálů. Brno, Vojenská akademie Brno, 1997. 140 s.
- [6] ČSN EN ISO 9227 (03 8132): Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Praha, Český normalizační institut, 2007. 24 s.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 6.12.2010



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na studium koroze v místě nýtových spojů panelu letadla v prostředí solné mlhy. Nýtový spoj je tvořen nýtem z materiálu AlCu4Mn, úhelníkem ze slitiny hliníku typu AlCu4Mg1 a plechy z téhož materiálu opatřené vrstvou hliníku o čistotě 99,5 %.

V práci jsou sledovány parametry korozního napadení v místech nýtových spojů a v oblastech styčných ploch mezi plechy. Jedná se o vyhodnocení typu koroze, četnosti výskytu a rozsahu korozního napadení. Soubor naměřených dat byl matematicky zpracován a následně z něj byla vyhodnocena kritická místa konstrukce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Hliník, slitina hliníku, nýtový spoj, koroze, korozní napadení, kritická místa konstrukce.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis focuses on the corrosion study of part aircraft at the side of riveted joints in the salt spray environment. Riveted joint is made of rivet aluminium alloy AlCu4Mn, square shape is made of aluminium alloy AlCu4Mg1 and sheets are made of the same material coated with aluminium of purity of 99,5 %.

The thesis deals with corrosion characteristics at the site of riveted joints and in the area of contact between sheets. It deals with character of corrosion, frequency of occurrence and range of corrosive attack. From the data files were detected critical places of construction.

## **KEYWORDS**

Aluminium, aluminium alloy, riveted joint, corrosion, corrosive attack, critical places of construction.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JEČMÍNKA, M. *Studium koroze v místě nýtovaných spojů materiálů rozdílných dílů panelu letadla v prostředí solné mlhy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 108 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Studium koroze v místě nýtovaných spojů materiálově rozdílných dílů panelu letadla v prostředí solné mlhy“ vypracoval samostatně s použitím literatury a informačních zdrojů uvedených v příloženém seznamu.

V Brně dne .....

.....  
Marek Ječmínka

### *Poděkování*

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu práce doc. Ing. Bohumilu Pacalovi, CSc. za vhodné a užitečné návrhy i připomínky, které mi v průběhu zpracování mé bakalářské práce poskytoval.

Také bych chtěl velice poděkovat Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP za její rady, pomoc a ochotu při zpracování a vyhodnocování experimentální části a Ing. Lence Klakurkové, Ph.D., Ing. Pavlovi Doležalovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Gejdošovi za pomoc při vykonávání experimentu.

Speciální poděkování bych rád věnoval Evě Němčíkové za vynikající spolupráci, ochotu a trpělivost v průběhu vykonávání a zpracování experimentu.

# OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. HLINÍK A JEHO SLITINY.....</b>	<b>11</b>
2.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin .....	11
2.2 Základní rozdělení slitin hliníku .....	11
2.2.1 Slitiny určené k tváření .....	11
2.2.2 Slévárenské slitiny hliníku .....	14
2.3 Vliv přísadových prvků na vlastnosti slitin hliníku .....	14
2.4 Značení slitin hliníku .....	15
2.4.1 Značení slitin hliníku podle ČSN EN .....	15
2.4.2 Značení slitin hliníku podle ČSN .....	16
2.5 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin .....	16
2.5.1 Žihání hliníku a jeho slitin .....	16
2.5.2 Vytvrzování (precipitační zpevnění).....	17
<b>3. KOROZE KOVŮ A JEJICH SLITIN .....</b>	<b>19</b>
3.1 Definice koroze.....	19
3.2 Rozdělení koroze .....	19
3.2.1 Chemická koroze.....	19
3.2.2 Elektrochemická koroze.....	19
3.3 Vliv korozního prostředí.....	20
3.3.1 Atmosférická koroze .....	20
3.3.2 Koroze ve vodách.....	20
3.3.3 Půdní koroze.....	20
3.4 Druhy korozního napadení.....	20
3.5 Hlavní činitelé ovlivňující korozi .....	21
3.6 Volba ochrany proti korozi .....	22
3.6.1 Volba materiálu a ovlivnění jeho odolnosti úpravou složení.....	22
3.6.2 Úprava korozního prostředí.....	22
3.6.3 Úpravy konstrukce a výrobní technologie .....	23
3.6.4 Elektrochemické ochrany.....	23
3.6.5 Ochranné povlaky .....	23
3.6.6 Kombinace metod ochrany proti korozi.....	24
<b>4. KOROZE HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN.....</b>	<b>25</b>
4.1 Korozní charakteristika .....	25
4.2 Vliv chemického složení.....	26
4.3 Druhy koroze u hliníkových slitin .....	26
4.3.1 Bodová koroze.....	26
4.3.2 Mezikrystalická koroze .....	27
4.3.3 Koroze po vrstvách.....	27
4.3.4 Korozní praskání .....	28
4.3.5 Korozní únava .....	28
4.3.6 Vibrační koroze .....	28

4.3.7 Kontaktní koroze .....	29
4.4 Vliv prostředí .....	29
4.4.1 Atmosféra .....	29
4.4.2 Voda .....	29
4.4.3 Půda .....	29
4.4.4 Roztoky solí.....	29
4.5 Vliv koroze na mechanické vlastnosti .....	29
4.6 Protikorozi ochrany hliníkových slitin .....	30
4.6.1 Fosfátové povlaky .....	30
4.6.2 Chromátové povlaky .....	30
4.6.3 Anodické oxidové povlaky.....	30
4.6.4 Chemické oxidové povlaky .....	30
<b>5. METODIKA ZKOUŠENÍ KOROZE .....</b>	<b>31</b>
<b>6. HODNOCENÍ KOROZE .....</b>	<b>32</b>
6.1 Hodnocení hmotnostních změn .....	32
6.2 Hodnocení rozměrových změn .....	32
6.3 Hodnocení změn mechanických vlastností.....	32
6.4 Hodnocení vzhledových změn.....	32
6.5 Metalografické hodnocení .....	33
<b>7. CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>34</b>
<b>8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>35</b>
8.1 Experimentální materiál.....	35
8.2 Postup provedení experimentu.....	35
8.2.1 Značení metalografických vzorků .....	39
8.3 Hodnocení výsledků experimentu .....	39
8.4 Zpracování výsledků experimentu.....	41
8.4.1 Značení povrchů napadených korozí.....	41
8.4.2 Experimentálně zjištěné hodnoty .....	41
8.4.3 Zpracování experimentálních výsledků .....	48
<b>9. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>51</b>
<b>10. ZÁVĚRY .....</b>	<b>57</b>
<b>11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>58</b>
<b>12. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>59</b>
<b>13. SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>60</b>

## 1. ÚVOD

Hliník patří mezi lehké kovy s hustotou  $2698 \text{ kg/m}^3$ . Pevnostní vlastnosti čistého hliníku jsou relativně malé ( $R_m = 70 \text{ MPa}$ ), které se mohou zvýšit tvářením ( $R_m = 130 \text{ MPa}$ ). Tvrdost se pohybuje kolem 15 HB, tažnost mezi 70–90 %. Hliník dobře odolává korozi po vzniku tenké ochranné vrstvy oxidu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Dále se vyznačuje dobrou tvárností, obrobitelností, vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí a zdravotní nezávadností.

U slitin hliníku se dosahuje přísadou legujících prvků vysokých pevnostních vlastností ( $R_m$  až 560 MPa, u slitin typu AlMgCu – tzv. duraly) a také vyšších tvrdostí např. u vytvrditelných slitin typu AlMgZnCu až 150 HB [1, 7, 8].

V současnosti je největší nárůst a použití hliníku a jeho slitin co do objemu a samotného sortimentu v oblasti dopravy (letecké, automobilové, kolejové, lodní, kosmonautiky). Dále je používán v oblasti stavebnictví, strojírenského a hutnického průmyslu, energetiky a elektrotechnického průmyslu, potravinářského průmyslu, chemického průmyslu (potrubí, výměníky), rekreačního průmyslu a sportu a jiných oblastí použití (klenotnictví).

Největší podíl použití hliníku a jeho slitin v dopravě připadá na letecký průmysl. Díky dobrým mechanickým vlastnostem při nízkých teplotách pod bodem mrazu a nízké hmotnosti je při výrobě letadel nenahraditelným kovem. Při výrobě letadla jsou z celkového množství použitých materiálů přibližně 2/3 slitiny hliníku. I kdybychom chtěli hliník nahradit jinými lehčími materiály např. na bázi hořčíku, uhlíkovými nebo skleněnými vlákny, přesto zůstává hliník nejlepší volbou, co se týče součástí namáhaných při vyšších napětích, jakými jsou křídla a trup letadla. Nejčastější hliníkové slitiny používané pro výrobu plechů a součástí pro křídla a trupy letadel jsou: AlMgSiCu (AA6013), AlMgSc, AlMgLi (1424) a AlCuMg2 (AA 2024) [1].

Koroze je chemický nebo chemickofyzikální proces interakce materiálu s prostředím, který zapříčiňuje tvorbu korozních zplodin a důsledkem je ovlivnění spolehlivosti materiálu. Náklady způsobené všemi druhy korozního poškození jsou odhadovány mezi 3-5 % hrubého národního produktu průmyslových zemí. Z hlediska bezpečnosti je tedy nutné věnovat pozornost studiu korozních dějů u chemicky heterogenních materiálů [2, 5].

## 2. HLINÍK A JEHO SLITINY

### 2.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník je stříbrně zbarvený lesklý kov, nepolymorfní a nemagnetický. Hliník a jeho slitiny mají v důsledku kubické plošně centrované mřížky (FCC) dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena. Některé fyzikální vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Vlastnosti hliníku [1]

Vlastnosti	Hodnoty
Mřížka	FCC
Parametr mřížky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Hustota	$2,6989 \text{ g/cm}^3$ (při 20 °C)
Teplota tavení	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivost	247 W/m (při 25 °C)

Hliník je v čistém stavu velice reaktivní a okamžitě se na vzduchu pokrývá tenkou vrstvou oxidu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Vytvořením ochranné vrstvy o tloušťce 5-20 nm velice dobře odolává korozi [1].

U hliníku a jeho slitin je velmi často používána metoda měření tvrdosti podle Brinella. Tvrdost v případě čistého hliníku se pohybuje kolem 15 HB až k hodnotě 140 HB u vysokopevných vytvrzovatelných slitin typu AlZnMgCu. Pevnost se pohybuje v širokém rozmezí v závislosti na přísadových prvcích a technologii zpracování od meze pevnosti 70 MPa u čistého hliníku až po mez pevnosti 560 MPa v případě slitin AlMgCu [1, 7].

### 2.2 Základní rozdělení slitin hliníku

Základní rozdělení hliníkových slitin se provádí podle těchto kritérií:

- způsob zpracování,
- chemické složení,
- mechanické vlastnosti.

#### 2.2.1 Slitiny určené k tváření

Podle EN 573-1 jsou hliníkové slitiny k tváření děleny do devíti skupin podle typu přísadového prvku, označení slitin je uvedeno v tabulky 2.2.1.1 [1].

Tabulka 2.2.1.1 Slitiny hliníku k tváření [1]

Hlavní legující prvek	Označení série
Hliník čistoty minimálně 99,00 %	1000
Měď (Cu)	2000
Mangan (Mn)	3000
Křemík (Si)	4000
Hořčík (Mg)	5000
Hořčík a křemík (Mg, Si)	6000
Zinek (Zn)	7000
Jiné prvky	8000
Nepoužitá skupina	9000

Mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti slitin všech sérií mohou být v širokém rozsahu měněny přesným chemickým složením, tepelným zpracováním a technologickými parametry [1].

### **Série 1000**

Využití především v oblastech vyžadujících dobré fyzikální vlastnosti, jakými jsou vysoká elektrická a tepelná vodivost a vysoká odolnost proti korozi. Aplikují se v chemickém, elektrochemickém a energetickém průmyslu, architektuře a obalové technice [1].

### **Série 2000**

Hlavním legujícím prvkem je Cu, vedlejším je Mg. Maxima pevnostních vlastností lze docílit tepelným zpracováním těchto slitin. Vyznačují se špatnou odolností proti korozi. Může nastat interkrystalická koroze. Pro lepší odolnost proti korozi jsou tyto slitiny plátovány fóliemi buď z hliníku vysoké čistoty, nebo některou ze slitin série 6000 [1].

### **Série 3000**

Tyto slitiny jsou tepelně nezpracovatelné. Zvýšení pevnostních vlastností o cca 20 % proti sérii 1000 lze dosáhnout do obsahu cca 1,5 % Mn. Uplatňují se především v architektuře a v oblasti výměníků tepla [1].

### **Série 4000**

Většinou tepelně nezpracovatelné slitiny s vysokým obsahem Si (do 12 %). Aplikují se při sváření – svářecí dráty. Eloxováním dosáhneme tmavě šedivé barvy povrchu [1].

### **Série 5000**

U slitin série 5000 je hlavním legujícím prvkem Mg, který je z hlediska substitučního zpevnění  $\alpha$  matrice mnohem efektivnější než Mn (cca 0,8 % Mg odpovídá cca 1,25 % Mn). Používají se v architektuře, zařízeních pro kryogenní techniku, potravinářském průmyslu, lodní dopravě a v komponentech pro dopravu [1].

### **Série 6000**

Z hlediska pevnostních vlastností je důležité množství intermetalické fáze  $Mg_2Si$ , díky níž lze tyto slitiny tepelně zpracovávat. Mají jistou podobnost se samokalitelnými oceli – jsou samokalitelné. Jsou to slitiny s výbornou schopností ke tváření, svařitelnosti, odolnosti proti korozi a mechanické obrobitelnosti při středních pevnostních vlastnostech. Využívají se v oblasti sportovních výrobků, jakými jsou rámy jízdních kol, v architektuře, komponentech pro dopravu a segmentech mostních konstrukcí [1].

### **Série 7000**

Hlavním legujícím prvkem je Zn s obsahem v rozmezí od 1 do 8 %. Nejvyšších pevnostních vlastností ze všech hliníkových slitin lze dosáhnout tepelným zpracováním díky přítomnosti Mg. Sekundárními legujícími prvky jsou Cu a Cr. Nevýhodou při dosažení vysokých pevnostních vlastností je špatná odolnost proti korozi. Odolnost proti korozi lze zlepšit tepelným zpracováním a přestárnutím, ale za cenu poklesu pevnostních vlastností.

Hlavní oblastí použití je zatím automobilový a letecký průmysl [1].

V tabulce 2.2.1.2 jsou uvedeny nejpoužívanější slitiny hliníku v leteckém průmyslu [7].

*Tabulka 2.2.1.2 Slitiny hliníku používané v leteckém průmyslu [7]*

<b>Značení dle ČSN</b>	<b>Značení dle EN</b>	<b>Mez pevnosti [MPa]</b>	<b>Vlastnosti a použití</b>
ČSN 42 4200.5	-	100-130	technický hliník, plechy do 5 mm
ČSN 42 4201.65	-	180-430	dural, plechy, tyče, lisované profily, vidlice, páky
ČSN 42 4203.65	AW-2024	450-480	superdural, více namáhané dílce pro závěsy, plechy, přepážky
ČSN 42 4222.7	AW-7075	200-580	pro silně namáhané díly, ale citlivé na koncentrace napětí
ČSN 42 4251.15	-	260-560	plátovaný dural - potahové plechy
ČSN 42 4400.15	AW-6082A	270-560	pantal, dobře svařitelná a tvárná slitina na nádrže
ČSN 42 4232.15	AW-3103	130-220	slitina s podobnými vlastnostmi jak pantal, trubky, pro málo namáhané části
ČSN 42 4400.15	AW-6082A	320-340	siluminy, slitiny k odlévání složitých odlitků
VAD 23	AW-2024	260-560	vysokopevnostní slitina vhodná pro části namáhané tlakem, dobré pevnostní vlastnosti do 150 – 170 °C, citlivá na koncentraci napětí

### 2.2.2 Slévárenské slitiny hliníku

Všechny slévárenské slitiny hliníku se proti slitinám pro tváření vyznačují vyšším obsahem legujících prvků. Z hlediska struktury se jedná o heterogenní slitiny s přítomností eutektika.

Podle obsahu legujících prvků dělíme slévárenské slitiny hliníku do těchto skupin:

#### *Slitiny Al - Cu*

Obsah Cu v rozmezí 4-5 %. Vůči litému stavu je možné zvýšit pevnostní vlastnosti tepelným zpracováním. Dále se používají slitiny s 9-11 % Cu, které jsou odolné proti otěru a mají dobré pevnostní vlastnosti za vyšších teplot [1].

#### *Slitiny Al - Cu - Si*

Často používané materiály, u kterých se vůči prvnímu typu slitin zlepšili slévárenské vlastnosti legováním Si. Slitiny obsahují buď větší množství Cu, nebo Si [1].

#### *Slitiny Al - Si*

Vyznačují se dobrou odolností proti korozi a dobrou slévatelností. Obsah Si v rozmezí 5-13 % [1].

#### *Slitiny Al - Mg*

Velmi dobře odolávají korozi v mořské vodě, přičemž největší odolnost mají slitiny vyrobené z vysoce čistých surovin. Jsou svařitelné a dobře se mechanicky obrábí. Při použití v architektuře se u odlitku provádí eloxování. Nevýhodou je náchylnost Mg k oxidaci při tavení [1].

#### *Slitiny Al - Zn - Mg*

Jedná se o slitiny s dobrými pevnostními vlastnostmi již v litém stavu a dobrou odolností proti korozi (neplatí pro korozi pod napětím). Maximum pevnostních vlastností se projeví po 20-30 dnech přirozeným stárnutím. Nevýhodou těchto slitin je sklon k tvorbě trhlin za tepla a špatná slévatelnost [1].

#### *Slitiny Al - Sn*

Slitiny s obsahem přibližně 6 % Sn a malým množstvím Cu a Ni (pro zvýšení pevnostních vlastností). Používají se speciálně pro výrobu kluzných ložisek [1].

### 2.3 Vliv přísadových prvků na vlastnosti slitin hliníku

Aplikace fyzikální metalurgie u hliníku a jeho slitin spočívá ve znalosti a využití možnosti vlivu chemického složení, tváření a tepelného zpracování na mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti.

Zlepšení původních vlastností hliníku lze dosáhnout pomocí změny chemického složení nalegováním jednoho nebo více prvků. Tímto můžeme zlepšit:

- *pevnostní vlastnosti* – přidáním legur Cu a Mg – tzv. duraly,

- *chemické vlastnosti* – legováním, např. Ag – výrazně se zlepšuje odolnost některých slitin vůči korozi pod napětím,
- *technologické vlastnosti* – zlepšení slévárenských vlastností pomocí Si – tzv. siluminy, pro zlepšení svařitelnosti se používá prvek Sc,
- *fyzikální vlastnosti* – přidáním B se zlepšuje elektrická vodivost technicky čistého hliníku [1].

Hliník o vyšší čistotě než 99,999 % má v žíhaném stavu  $R_m = 40\text{--}50$  MPa,  $A = 70\text{--}90$  %. Skutečnost, že čistý hliník má nízké pevnostní vlastnosti, znesnadňuje jeho větší použití.

Pomineme-li deformační zpevnění, máme tyto možnosti zvýšení pevnostních vlastností:

- substituční zpevnění mřížky Al vytvořením tuhého roztoku  $\alpha$ ,
- precipitační zpevnění (Guinier-Prestonovy zóny – GP zóny, koherentní precipitáty),
- disperzní zpevnění (nekoherentní precipitáty) [1].

## 2.4 Značení slitin hliníku

Značení hliníku a jeho slitin se řídí podle norem ČSN EN i ČSN, přičemž v technické praxi mají přednost normy ČSN EN [1].

### 2.4.1 Značení slitin hliníku podle ČSN EN

#### *I. Značení slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3*

Značení slitin hliníku podle této normy platí pro tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření. Označují se písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Jedná se o číselné značení, které může být doplněno i chemickým značením, např. EN AW-2024 [AlCu4Mg1].

Číselné značení se skládá:

- z předpony EN a mezery,
- písmene A označující hliník,
- písmene W označující tvářené výrobky,
- spojovací čárky,
- a čtyř číslic označující chemické složení [1].

#### *II. Značení slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706*

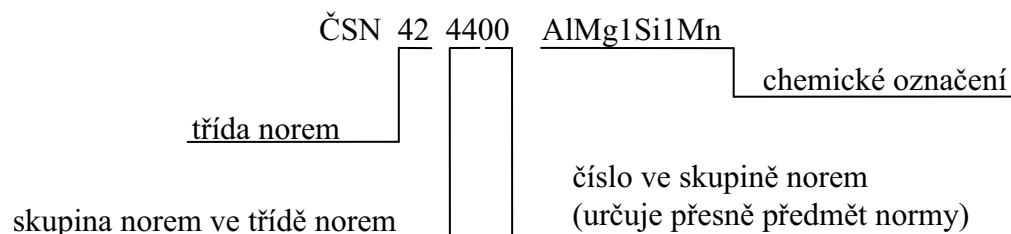
Značení slitin hliníku podle této normy platí pro odlitky. Označují se písmeny EN AC a pěti číslicemi. Číselné označení je možné stejně jako u slitin hliníku pro tváření doplnit i chemickým označením, např. EN AC-21000 [AlCu4MgTi].

Číselné značení se skládá:

- z předpony EN a mezery,
- písmene A označující hliník,
- písmene C označující odlitky,
- spojovací čárky,
- a pěti číslic označující chemické složení [1].

## 2.4.2 Značení slitin hliníku podle ČSN

Jednotlivé typy hliníku a jeho slitin se v normách ČSN označují vždy samostatnou normou ČSN a šestimístným číslem.



Šestimístné číslování za značkou ČSN: třída norem 42 označuje hutnictví, skupina norem 40-45 značí, že jde o hliník nebo slitiny hliníku na odlitky nebo pro tvářené výrobky. Číselné značení můžeme rovněž doplnit chemickým označením [1].

### **Rozbor značky ČSN 42 4203.61:**

#### I. Základní číslo: 42 4203

- *první dvojčíslí* základního čísla je 42 a vyjadřuje třídu norem hutnictví,
- *třetí číslice*: 4 – určuje lehké kovy a jejich slitiny,
- *čtvrtá číslice*: rozlišuje slitiny podle výrobní technologie, 2 – sudé číslo, vyjadřuje slitiny pro tváření,
- *dvojčíslí* ze 4. a 5. číslice určuje zároveň skupinu těžkých a lehkých kovů a jejich slitin,
- *trojčíslí* ze 4., 5. a 6. číslice určuje těžké a lehké kovy a jejich slitiny z hlediska chemického složení a z hlediska výrobního.

#### II. Doplnkové číslo: .61

- stav vytvrzený za studena – stav získaný tepelným zpracováním výrobku, které sestává z rozpouštěcího žíhání a přirozeného stárnutí,
- jakost zaručena [10].

## 2.5 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin se dělí do dvou základních skupin:

- žíhání,
- vytvrzování [1].

### 2.5.1 Žíhání hliníku a jeho slitin

#### **Rekrytalizační žíhání**

Rekrytalizační žíhání je tepelné zpracování za studena tvářeného kovu, kdy z původně deformované struktury materiálu po předchozím tváření za studena vytvoříme novou nedeformovanou (rekrytalizovanou) strukturu materiálu. Proti původní deformované

struktura dojde tímto tepelným zpracováním ke snížení pevnostních vlastností a zvýšení plastických vlastností. Teploty rekrytalizačního žhání se pohybují v rozmezí 250-500 °C [1].

### ***Stabilizační žhání***

Provádí se za účelem stabilizace struktury, mechanických, chemických, fyzikálních vlastností a rozměrů výrobku. Stabilizační žhání se používá u součástí, které mají v provozu pracovat za zvýšených teplot, nebo u kterých v důsledku např. tření dochází k ohřevu součástí. Teplota stabilizačního žhání musí být vyšší než teplota, při které bude součást v provozu pracovat. Pohybuje se v rozmezí 240-350 °C [1].

### ***Žhání ke snížení pnutí***

Je to tepelné zpracování, které se skládá z ohřevu pod teplotu rekrytalizace, výdrže na této teplotě a následného řízeného ochlazování. Teplota žhání bývá v rozmezí 300-400 °C [1].

### ***Žhání s částečnou rekrytalizací***

Jde o tepelné zpracování za studena tvářených součástí, při kterém dochází k částečné rekrytalizaci struktury. Žhací teploty se pohybují v rozmezí 250-500 °C. Setrvání na žhací teplotě musí být krátké, aby nedošlo k úplné překrytalizaci [1].

### ***Homogenizace***

Homogenizace je tepelné zpracování za vysokých teplot (blízkých teplotě solidu), které se provádí za účelem úplného odstranění nebo snížení chemické heterogenity pomocí difúzních procesů. Doba žhání závisí na chemickém složení slitiny a její struktura [1].

## **2.5.2 Vytvrzování (precipitační zpevnění)**

Precipitační vytvrzování je proces, kterým měníme mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitin. Vytvrzovat lze pouze slitiny, které mají výraznou změnu rozpustnosti v tuhém stavu. Základní podmínkou pro vznik přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$  je tedy změna rozpustnosti v tuhém roztoku  $\alpha$ .

Precipitační vytvrzování se skládá ze dvou pochodů, které na sebe navazují a tvoří konečný výsledek:

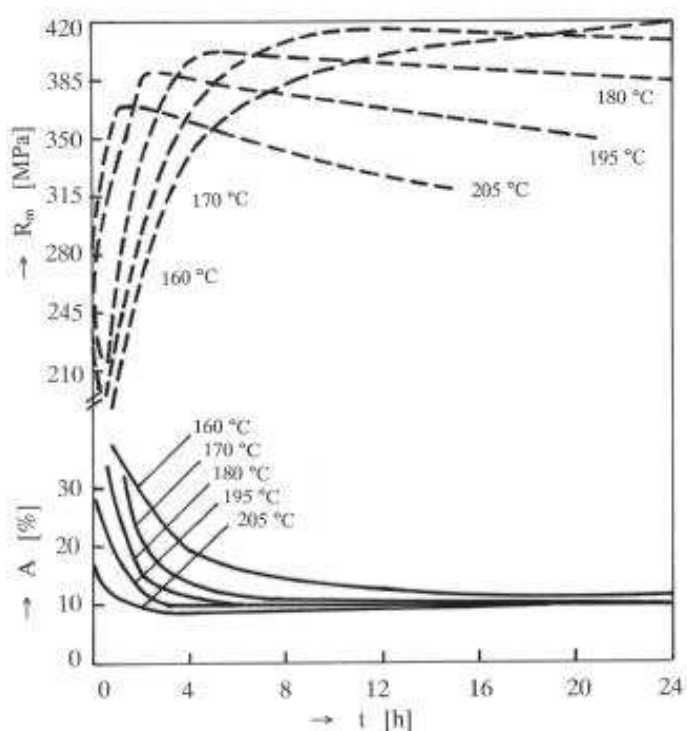
- **rozpouštěcí žhání** – skládá se z ohřevu na rozpouštěcí teplotu, výdrže na této teplotě za účelem rozpuštění intermetalických fází v tuhém roztoku a následného rychlého ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ . Kritická rychlost ochlazování je nejmenší rychlost, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku,
- **stárnutí** – pomocí změny struktury dochází ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností. Provádí se buď za pokojové teploty – přirozené stárnutí (např. u slitin typu AlCuMg), nebo za zvýšených teplot – umělé stárnutí (např. u slitin AlZnMg) [1].

Po rozpouštěcím žhání následuje stárnutí, tj. rozpad přesyceného tuhého roztoku. Stárnutím je dosaženo maximálních možných pevnostních vlastností. Doba, za kterou dojde k rozpadu přesyceného tuhého roztoku závisí především na chemickém složení slitiny.

V časovém úseku od počátku vzniku přesyceného tuhého roztoku až po získání požadovaných vlastností dochází nepřetržitě k vnitřním změnám a tím i ke změnám mechanických, fyzikálních, korozních i technologických vlastností. Tyto trvalé změny jsou nazývány kinetikou rozpadu [1].

Z křivek umělého stárnutí zobrazených na obrázku 2.5.2 lze určit zákonitosti, které platí pro všechny hliníkové slitiny podrobené precipitačnímu zpevnění:

- čím vyšší je teplota umělého stárnutí, tím dříve se dosahuje maximálních pevnostních vlastností při této konstantní teplotě a naopak,
- čím vyšší je teplota umělého stárnutí, tím nižší jsou maximálně dosažitelné pevnostní vlastnosti [1].



Obr. 2.5.2 Umělé stárnutí slitin AlCuMg [1]

Rychlost ochlazování z teploty rozpouštěcího žhání má vliv na korozní vlastnosti. Záleží na tom, zda v procesu ochlazování dojde k vyloučení precipitátu na hranicích nebo uvnitř zrn [1].

## 3. KOROZE KOVŮ A JEJICH SLITIN

### 3.1 Definice koroze

Téměř všechny materiály ve styku s okolním prostředím podléhají více či méně rychlému rozrušování, které je způsobeno chemickými, fyzikálními nebo biologickými vlivy prostředí na materiál. Koroze materiálu je souhrn těchto vlivů vedoucí k jeho rozrušování, přičemž největší význam mají vlivy chemické. Mezi fyzikální vlivy vedoucí k rozrušování patří eroze, abraze a opotřebení. K mechanickému rozrušování dochází při překročení meze pevnosti nebo meze únavy. Koroze je tedy znehodnocení materiálu způsobené chemickým nebo fyzikálně chemickým působením prostředí.

Korozi jsou napadeny nejen kovy, ale také plasty, silikátové stavební materiály, přírodní materiály či textil.

Prostředí způsobující korozi jsou různá. Nejrozšířenějším je zemská atmosféra, která působí na převážnou část výrobků. Neméně významným prostředím jsou různé půdy, do kterých jsou uloženy různé zařízení jako kabelové spoje, dálkovody či základy budov. Dále se jedná o působení vody (říční, mořské), prostředí s vysokou korozní agresivitou v chemickém, energetickém a potravinářském průmyslu (kyseliny, zásady, soli), plynná prostředí působící za vysokých teplot a tlaků (spaliny, prázdné plyny) nebo působení páry. Jednotlivá korozní prostředí se od sebe liší mechanismem i intenzitou působení [4].

### 3.2 Rozdělení koroze

Z hlediska chemické podstaty rozdělujeme korozi:

- chemickou,
- elektrochemickou [9].

#### 3.2.1 Chemická koroze

Chemická koroze vzniká v plynných prostředích za normálních a zvýšených teplot a v elektricky nevodivých kapalných prostředích. Produkty chemické koroze vytvářejí vrstvy zpravidla na těch místech, kde k reakci došlo. Charakter těchto vrstev určuje kinetiku korozního procesu. Jestliže jsou produkty korozních procesů plynné nebo kapalné, anebo nemají-li tuhé korozní produkty ochranný charakter, pak koroze probíhá při konstantní teplotě stejnou rychlostí [9].

#### 3.2.2 Elektrochemická koroze

Jedná se o proces znehodnocení materiálu za vzniku elektrického proudu. Podmínkou elektrochemické reakce je přítomnost elektricky vodivého prostředí – elektrolytu (roztoky kyselin, zásad a solí). Elektrochemická koroze probíhá dvěma na sobě závislými oxidačně-redukčními reakcemi, a to anodickou a katodickou reakcí. Zdrojem elektronů je anodická (oxidační) reakce. Katodická (redukční) reakce, tyto elektrony spotřebovává vybíjením iontů vodíkem, nebo redukcí kyslíku rozpuštěného v elektrolytu. Tyto reakce také nazýváme jako vodíková nebo kyslíková depolarizace.

Pokud během korozního děje vznikne vrstva stabilních oxidů (ochranná vrstva), pak se jedná o tzv. pasivitu. Je to stav vysoké korozní odolnosti materiálu, který vzniká zbrzděním anodového děje. Kov pak nekoroduje. Kovy schopné pasivace jsou především chrom, titan, hliník a některé další kovy [4].

### **3.3 Vliv korozního prostředí**

#### **3.3.1 Atmosférická koroze**

Vzhledem ke skutečnosti, že většina kovových výrobků vykonává svou práci v atmosféře, je atmosférická koroze nejčastěji se vyskytujícím druhem koroze. Je založena na principu, při kterém přecházejí ionty kovu z krystalové mřížky do korozního prostředí nebo zůstávají na povrchu materiálu ve formě zplodin. Intenzita koroze závisí na teplotě, vlhkosti a znečištění vzduchu. Kondenzací vodních par obsažených ve vzduchu se tvoří vodní film o tloušťkách 50-150  $\mu\text{m}$ . Atmosférická koroze má elektrochemický charakter právě díky této velmi tenké vrstvě vody. Vodní vrstva obsahuje složky atmosféry, jakými jsou oxid siřičitý, oxid uhelnatý, amoniak, kyselina chlorovodíková a aerosoly [11].

#### **3.3.2 Koroze ve vodách**

Největší vliv z oblasti koroze v kapalinách má koroze ve vodách. Tento typ koroze má elektrochemický charakter. Rychlost korozního děje je ovlivňována množstvím kyslíku ve vodě, které lze snížit uzavřením vodních systémů, odplyňováním nebo chemickými činidly. Dále je rychlost koroze závislá na mnoha neelektrochemických vlivech, jakými jsou kavitace, chemické děje v kapalinách a vliv mechanických nečistot a mikroorganismů [11].

#### **3.3.3 Půdní koroze**

Koroze v půdách patří mezi zvláštní druhy koroze v roztocích elektrolytů z důvodu, že půda je tvořena jak fází tuhou, tak i plynou a kapalnou. Z korozního hlediska má největší význam kapalná fáze obsahující vodný roztok elektrolytů s různým množstvím rozpuštěných plynů [11].

### **3.4 Druhy korozního napadení**

Koroze je dělena z hlediska korozního napadení na porušení celé hmoty kovu nebo slitiny, anebo porušení jejich struktury. U materiálů, které se porušují korozí nezávisle na struktuře kovu, rozdělujeme vzhledem ke stupni rovnoměrnosti rozpouštění povrchu na korozi rovnoměrnou, skvrnitou, bodovou (důlkovou), štěrbinovou a nitkovou. Další druhy korozního napadení jsou mezikrystalová koroze, korozní praskání, korozní únava, kavitace a extrakční koroze [3].

#### ***Rovnoměrná koroze***

Rovnoměrná koroze se vyznačuje rovnoměrným rozpouštěním kovu po celém povrchu. Lze ji vyčíslit ztrátou hmotnosti v  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$  nebo úbytkem tloušťky v mm za rok a další [3].

### ***Bodová koroze***

Tento typ koroze je zvláště nebezpečný u materiálů odolných proti rovnoměrné korozi, u kterých může docházet i při malém úbytku materiálu k rychlému proděravění přes celou tloušťku materiálu. Nastává hlavně v prostředí s přítomností chloru, bromu nebo jodu, jejich solí, zejména halogenidů těžkých kovů nebo chlornanů. Ionty chloru, bromu a jodu pronikají ochrannou vrstvičkou oxidů snadněji než ionty jiných prvků. Stejný proces nastává u pasivních korozivzdorných ocelí. V místech porušení povrchové vrstvičky dochází k rychlému postupu koroze do hloubky. Následně může dojít i k úplnému proděravění poměrně tlustého plechu nebo trubky [3].

### ***Mezikrystalová koroze***

Probíhá přednostně mezi krystaly podél jejich rozhraní. Mezikrystalové korozi podléhají zejména slitiny, u kterých dochází na hranicích zrn ke stárnutí, ohřevu při zpracování nebo tepelnému ovlivnění (např. při svařování). Napadá hlavně korozivzdorné oceli a slitiny niklu a hliníku v závislosti na jejich chemickém složení, struktuře a tepelném zpracování. Probíhá výhradně podél hranic zrn do značné hloubky. Tím slitina postupně ztrácí pevnost a houževnatost [3].

## **3.5 Hlavní činitelé ovlivňující korozi**

### ***Stav materiálu***

Mezi hlavní vlastnosti materiálu, které skutečně rozhodují o výsledné korozní odolnosti, patří obsah nečistot, struktura materiálu a stav jeho povrchu.

Mezi nečistoty patří např. síra v oceli, železo ve slitinách hořčíku, povrchové vměstky, zavalčované okraje nebo zbytky pomocných prostředků po svařování či pájení.

Na reakci kovu s prostředím má význam i orientace jednotlivých krystalů kovu nebo energetické poměry v krystalové mřížce. Dále je to vliv různých fází ve struktuře a to jejich charakter, složení a někdy i počet fází silně závisí na jejich tepelném zpracování a na vyváženosti přítomných prvků včetně nečistot.

Průběh koroze ovlivňuje také drsnost povrchu. Hladké povrchy reagují s prostředím pomaleji než povrchy drsné, avšak korozi nezabrání, ale pouze ji oddálí. Drsný povrch má větší aktivní plochu, při atmosférické korozi se na něm snadněji udrží vrstva vlhkosti a déle se na něm udrží [3].

### ***Stav korozního prostředí***

Korozní prostředí ovlivňuje korozi nejen svým chemickým složením, ale také teplotou, tlakem a relativním pohybem kolem povrchu kovového materiálu. Zvyšováním teploty prostředí dochází k urychlení vlastní korozní reakce. U difúzně řízených dějů se může koroze zvýšit urychlováním difúze. Zvyšování teploty korozního prostředí je zvláště nebezpečné u procesů s vodíkovou depolarizací a při korozi v plynech [3].

## **Konstrukce výrobku**

Z hlediska konstrukce výrobku má na korozi vliv kontakt dvou rozdílných materiálů, konstrukční uspořádání některých částí zařízení (štěrbiny, místní rozdíly v rychlosti proudění nebo teplotě média apod.) nebo mechanické namáhání [3].

### **3.6 Volba ochrany proti korozi**

Znalosti o mechanismu a kinetice korozních dějů napomáhají k postupům jak zabránit nebo alespoň zmírnit korozi kovů. Pokud se ale jedná o technická hlediska metod ochrany proti korozi, lze tyto metody rozdělit na:

1. volbu materiálu a ovlivnění jeho odolnosti úpravou složení,
2. úpravy korozního prostředí,
3. úpravy konstrukce a výrobní technologie,
4. elektrochemické ochrany,
5. ochranné povlaky,
6. kombinací metod ochrany proti korozi [4].

#### **3.6.1 Volba materiálu a ovlivnění jeho odolnosti úpravou složení**

U volby materiálu, které mají odolávat korozi lze využít různých specifických vlastností různých kovů a jejich slitin, jako je:

- termodynamická stálost (např. platina, zlato, měď, nikl, molybden v neoxidujících kyselinách),
- schopnost snadné a účinné pasivace (chróm a slitiny obsahující chróm, titan, hliník),
- vytváření tlustších vrstev korozních zplodin s dobrými ochrannými schopnostmi (měď, zinek, olovo).

Z důvodu vysoké ceny některých korozně odolných materiálů se používají tzv. plátované materiály, které kombinují výhody dobrých mechanických vlastností a dostupnosti nosného materiálu s dobrou odolností plátovací vrstvy.

Známe-li hlavní kombinaci faktorů některých specifických forem koroze, lze navrhnout takové materiály, které za daných podmínek mají nejmenší sklon k nebezpečným typům koroze (mezikystalická koroze, korozní praskání, bodová koroze) [4].

#### **3.6.2 Úprava korozního prostředí**

Víme-li, které součásti korozního prostředí mají zásadní vliv na průběh koroze, je možné často dosáhnout účinné protikorozní ochrany záměrnou změnou složení korozního prostředí. Úprava korozního prostředí se provádí dvěma rozdílnými principy, a to odstraněním korozně aktivní složky ze systému nebo přísadou takových látek, které průběh koroze podstatně zpomalí.

V prvním případě se jedná o ochranu proti atmosférické korozi například vysoušením pod mez tzv. kritické vlhkosti nebo o ochranu proti koroznímu působení stop sirovodíku v atmosféře.

V případě druhém jde o přítomnost látek (inhibitory koroze), které v prostředí výrazně brzdí průběh koroze. Tato aplikace patří k nejvýznamnějším metodám protikorozi ochrany [4].

### 3.6.3 Úpravy konstrukce a výrobní technologie

Při konstrukci strojů a zařízení je nutno počítat se změnou průřezu i mechanických vlastností materiálu během koroze. Aby nedocházelo ke změnám průřezu a mechanických vlastností, používají se materiály, které těmto změnám nepodléhají. U materiálů podléhajícím těmto změnám se vhodně dimenzují průřezy součástí a zařízení. Dimenzování spočívá ve zvětšení průřezu materiálu o průřez, který bude znehodnocen korozi během provozu zařízení. Toto zvětšení průřezu materiálu je označováno jako přídavek na korozi [4].

### 3.6.4 Elektrochemické ochrany

Existují tři způsoby elektrochemické ochrany:

- a) katodická ochrana: probíhá katodickou polarizací na potenciály, při kterých je koroze silně potlačena,
- b) anodická ochrana: probíhá anodickou polarizací na potenciály, při nichž je kov pasivní,
- c) elektrickými drenážemi, kterými se snižují korozní účinky bludných proudů, zejména v půdě.

Katodickými elektrochemickými reakcemi dochází k ovlivnění složení korozního prostředí, které je v těsné blízkosti katodického polarizovaného kovu. Tím může dojít k brzdění koroze nebo naopak účinnost ochrany snižovat či úplně rušit.

Anodická ochrana je výhodná především u kovů, které jsou používány v pasivním stavu (antikorozi oceli, titan, v některých případech i uhlíková ocel). Anodická ochrana využívá oxidačního účinku anodické polarizace. Pasivitu je možno vyvolat nebo stabilizovat anodickou polarizací. Tento způsob ochrany je používán v prostředích, kde by použité pasivní materiály svými oxidačními vlastnostmi nedosáhly stabilní nebo trvalé pasivity. Používá se rovněž jako náhrada dražších, snadněji pasivovatelných materiálů levnějšími, které obsahují méně legur zajišťující korozi [4].

### 3.6.5 Ochranné povlaky

Ochranné povlaky jsou nečastější protikorozi ochranou kovů. Jako ochranné vrstvy se využívají různé kovové, nekovové organické i anorganické povlaky vytvářené nejrůznějšími způsoby. Ochrana proti korozi není založena pouze na izolaci chráněného kovu od korozního prostředí. Je velmi rozmanitá od možnosti změny ochranných vlastností korozních zplodin přes elektrochemickou účinnost až po schopnost inhibovat korozi změnou složení pronikajícího prostředí [4].

### **3.6.6 Kombinace metod ochrany proti korozi**

Pro většinu korozních systémů je téměř pravidlem použití kombinace dvou i více protikorozních ochranných povlaků. Důležitá je hlavně kombinace metody ochrany volbou vhodného materiálu a ochranným povlakem. Tento způsob ochrany je používán z rozměrových a tvarových důvodů, kdy pro některé součásti je obtížné vytvořit vhodné ochranné vrstvy. Za takových okolností se kombinují díly chráněné povlakem s díly vyrobenými přímo z korozně odolnějšího materiálu [4].

## 4. KOROZE HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN

### 4.1 Korozní charakteristika

Hliník je elektronegativní kov se standardním rovnovážným potenciálem  $-1,67$  V. Přes vysokou zápornou hodnotu potenciálu má hliník dostatečně vysokou korozní odolnost ve vodě, neutrálních a slabě kyselých roztocích a atmosféře v důsledku velké schopnosti pasivovat se [5].

Přestože je hliník velice reaktivní a lehce oxidovatelný prvek, chová se často jako korozně odolný prostřednictvím účinku ochranné oxidové vrstvy. Tloušťka ochranné vrstvy závisí na prostředí, na přítomnosti aniontů a kationtů, množství kyslíku, teplotě, proudění, pH a může dosáhnout až  $10^{-6}$  m.

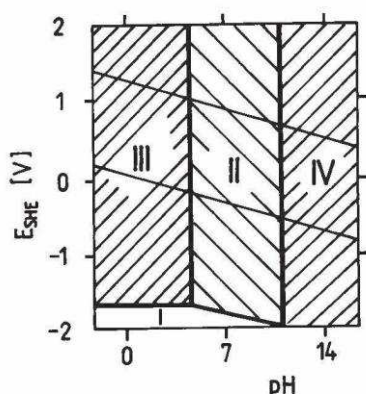
Přirozený ochranný film je ovlivňován rozpuštěnými legovacími kovy a heterogenitou struktury. Některé legovací prvky působí pozitivně na růst vrstvy (především Mg a Cu), jiné způsobují vznik poruch ve vrstvě nebo nijak nemění její růst [1, 3].

Přestože se hliník vyznačuje dobrou korozní odolností, má řadu omezení, při nichž dochází k výrazné korozní degradaci.

Hliník je neušlechtilý kov. Ponorem do elektrolytu dochází k anodovému rozpouštění Al, vzniku  $\text{Al}^{3+}$  a současně vzniká i  $\text{Al}^+$ , který následně reaguje s vodou.

Termodynamickým principem koroze je termodynamická nestálost kovu v různých prostředích, spojená s jejich přechodem do stálejšího stavu korozních zplodin. Praktický význam termodynamiky spočívá v určení podmínek, za kterých je koroze možná.

Významným příkladem použití termodynamických výpočtů koroze jsou tzv. diagramy potenciál – pH podle Pourbaixe. Diagram se skládá z oblastí imunity, kde koroze z termodynamického hlediska není možná, oblasti pasivity výrazně zpomalující vznik stabilních korozních zplodin a oblasti aktivity a transpasivity, ve kterých dochází k intenzivnímu koroznímu poškození [1].



Obr. 4.1 Pourbaix diagram pro systém Al – H<sub>2</sub>O

I – oblast imunity, II – oblast pasivity, III – oblast aktivity, IV – oblast transpasivity [1]

Termodynamika určuje, zda bude docházet ke koroznímu napadení, ale neurčuje rychlost koroze, protože mezi termodynamickou pravděpodobností a rychlostí koroze není téměř žádná souvislost. V praxi se proto opírá o praktické zkoušky a empirické zkušenosti [1].

## 4.2 Vliv chemického složení

Korozní odolnost hliníku roste s jeho čistotou. Vliv nečistot na chemickou stálost závisí především na prostředí, dále pak na tom, zda jsou nečistoty vyloučeny v tuhém roztoku nebo ve formě heterogenních částic [3].

Na odolnost proti korozi příznivě působí mangan tvořící  $MnAl_6$ , který váže železo na intermetalid  $(MnFe)Al_6$ . Ten vytvoří při tavení strusku a při jeho odstranění nedochází k nepříznivému vlivu na korozi [1].

Z hlediska korozní odolnosti je důležité, zda jde o slitiny s Cu, nebo bez Cu. Slitiny hliníku bez mědi mají téměř stejnou korozní odolnost jako čistý hliník Al 99.5. Jedná se o slitiny typu AlMn, AlMgMn, AlMg, AlMgSi a AlZnMg. Slitiny AlZnMg s obsahem zinku a hořčíku nad 6 % jsou používány speciálně v letectví [1, 3].

Slitiny obsahující měď mají nízkou korozní odolnost. Proto se například slitiny AlCuMg, AlCuMgSi, AlCuMn, AlCuMg, legované Fe a Ni, AlMgCuSi a AlZnMgCu při vysokých nárocích na odolnost proti korozi plátují čistým hliníkem, nebo slitinou Al-Zn [1].

## 4.3 Druhy koroze u hliníkových slitin

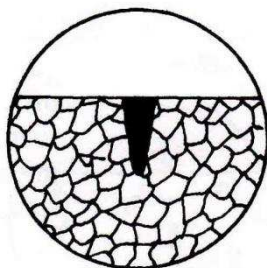
### 4.3.1 Bodová koroze

Bodová koroze je spjata s lokálním porušením oxidické vrstvy při dosažení potenciálu jejího průrazu. Odolnost hliníkových slitin proti bodové korozi závisí na stabilitě pasivního stavu. To souvisí se složením slitin a obsahem aniontů v elektrolytu, které tuto korozi vyvolávají.

Aktivátory bodové koroze jsou anionty halogenidů  $Cl^-$ ,  $B^-$ ,  $J^-$ . Tyto halogenidy pronikají vrstvou přes defektní místa a porušují elektrochemickou heterogenitu jejího povrchu. Díky tomu vznikají lokální mikroanody obklopené řádově většími katodami zapasivovaného kovu. Vysokou intenzitou anodické reakce dochází ke vzniku korozních poruch pittingů.

Výskyt bodových poruch závisí také na krystalografické orientaci matrice a na rozložení anodických a katodických sekundárních fází a může probíhat na různých heterogenitách, jakými jsou katodické fáze  $FeAl_3$ ,  $CuAl_2$  nebo podél hranic zrn.

Bodová koroze je nejrozšířenější typ lokální koroze u hliníkových slitin. Na jejím základě se rozvíjí další specifické formy koroze [1].



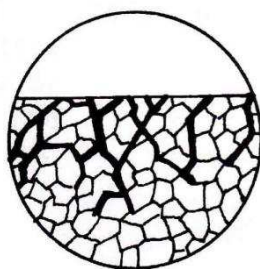
Obr. 4.3.1 Bodová koroze [16]

### 4.3.2 Mezikrystalická koroze

Je to jedna z forem napadení s možností iniciace bodovou korozí. Uplatňuje se pouze u rekrystalizovaných struktur. U nerekrystalizovaných struktur probíhá koroze po malouhlových hranicích subzrn s vysokou koncentrací dislokací.

Souvislost mezikrystalické koroze se strukturou slitin se opírá o pasivaci zrn tuhého roztoku a aktivní stav jejich hranic, který souvisí s existencí anodických sekundárních fází, např.  $MgAl_3$  a katodických fází, např.  $CuAl_2$ .

Také čistý hliník je napadán mezikrystalickou korozí a to ve vodě při teplotách nad  $160\text{ }^\circ\text{C}$  a souvisí s adsorpcí příměsí na hranicích zrna. Jejich katodický charakter vyvolává vznik  $OH^-$  iontů porušující pasivní stav hranic [1].



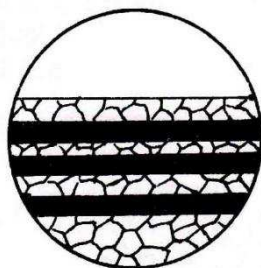
Obr. 4.3.2 Mezikrystalická koroze [16]

### 4.3.3 Koroze po vrstvách

Jde o podpovrchovou korozi u výkovků a vývalků z hliníkových slitin probíhající rovnoběžně s deformovaným povrchem za vzniku trhlin v tomto směru. Koroze může probíhat po hranicích zrn, po deformovaných hranicích dendritů i transkrystalicky.

Hlavní příčiny vzniku této koroze souvisí s orientací krystalitů tuhého roztoku a sekundárních fází ve směru deformace a s tepelným zpracováním. Je typická pro slitiny s vysokou koncentrací legur nebo příměsí a s jejich nerovnovázným rozdělením. Vyznačuje se prakticky konstantní rychlostí průběhu. Probíhá i za atmosférických podmínek za přítomnosti  $Cl^-$  iontů a vede k úplné degradaci pevnostních vlastností.

Koroze po vrstvách závisí na složení a tepelném zpracování Al slitin. Je podporována legurami Fe a Cr. Nejnižší korozní odolnost ze strukturního hlediska vykazují čerstvě zakalené slitiny, protože se v nich projevuje anodický charakter tuhého roztoku matrice okolo nerozpuštěných intermetalických katodických částic [1].



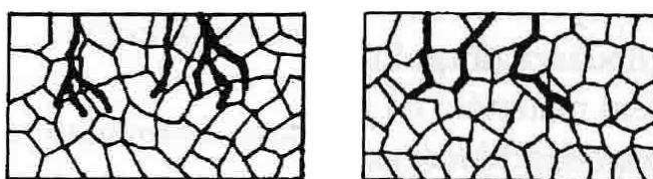
Obr. 4.3.3 Koroze po vrstvách [16]

#### 4.3.4 Korozní praskání

Korozní praskání je způsobeno současně metalurgickými, mechanickými a chemickými vlastnostmi. To zapříčiňuje vznik trhlin orientovaných kolmo na směr působícího tahového napětí s transkrystalickým, interkrystalickým nebo smíšeným lomem.

Čistý hliník není ke koroznímu praskání náchylný. Naopak slitiny AlCuMg nejsou odolné. Citlivost ke koroznímu praskání se zvyšuje tepelným zpracováním. Stárnutím při 160-205 °C získáme vysoké pevnostní vlastnosti, ale také maximální náklonnost k poškození korozním praskáním. Dokonale vystárnutý materiál odolává tomuto druhu koroze lépe, než materiál vystárnutý nedostatečně.

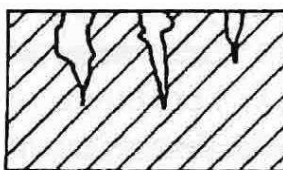
Koroznímu praskání podléhají hliníkové slitiny se Zn (4-20 %) už ve stopové přítomnosti vody v porušené povrchové oxidické vrstvě [1].



*Obr. 4.3.4 Transkrystalické korozní praskání (vlevo), interkrystalické korozní praskání (vpravo) [9]*

#### 4.3.5 Korozní únava

Vzniká ve všech elektrolytech při cyklickém zatížení. Projevuje se vznikem transkrystalických a interkrystalických trhlin. K porušení kovu únavou dochází při cyklickém zatížení při napětí menším, než je mez pružnosti. Čím menší je napětí, tím více zatěžovacích cyklů materiál do svého porušení vydrží [1].



*Obr. 4.3.5 Korozní únava [9]*

#### 4.3.6 Vibrační koroze

Vzniká při vzájemném kmitavém pohybu s různou amplitudou (max 0,075 mm) a frekvenci a při proměnlivém zatížení povrchů, které jsou v bodovém, čárovém, anebo plošném styku (tzv. fretting). Probíhá vždy v oxidačním prostředí. Hlavním znakem je kombinace oxidace, adheze a abraze. Často se vyskytuje na šroubových, nýtovaných a čepových spojích konstrukcí z hliníku a jeho slitin [1].

### 4.3.7 Kontaktní koroze

Při vodivém spojení hliníku s jinými kovy, které jsou elektrochemicky ušlechtilejší, je koroze zintenzivněna v důsledku výrazně negativního korozního potenciálu hliníku. Vliv spojení se projevuje rovněž při atmosférické korozi především při spojení do cca 5 mm [1].

## 4.4 Vliv prostředí

### 4.4.1 Atmosféra

Čistý hliník a většina hliníkových slitin neobsahující Zn, Cu a Ni patří k odolným kovům. V mírně agresivních prostředích se pokrývají pasivní, elektricky nevodivou korozní vrstvou. V silně znečištěných prostředích může probíhat důlková koroze s větším objemem korozních zplodin. Jde o mělkou bodovou korozi, která i po dlouhé době nepronikne hluboko do materiálu [1].

### 4.4.2 Voda

Hliník je v čisté vodě odolný až do bodu varu. Při teplotě vyšší než 100 °C se tvoří tlustá vrstva korozních produktů a dochází k mezikrystalovému napadení, vedoucímu až k praskání. Nad 200 °C podléhá napadení i vysoce čistý hliník. V přibližně neutrálních vodách má hliník a jeho slitiny nízkou ztrátu hmotnosti, a to i za přítomnosti H<sub>2</sub>S a CO<sub>2</sub>. V mořské vodě mají tyto materiály relativně větší odolnost než jiné konstrukční kovové materiály [1].

### 4.4.3 Půda

Protože je půdní koroze determinována složením půdního výluhu, platí zde stejné závislosti jako ve vodě. Těmi jsou vliv pH a aniontů a kationtů půdního elektrolytu. K napadení hliníku dochází především v rašelinistích (nízký obsah pH), ve vápenitých půdách a v půdách kontaminovaných výluhy ze stavebních materiálů (vysoký obsah pH). Nejčastějšími škodlivými ionty v půdách jsou chloridy [1].

### 4.4.4 Roztoky solí

Korozní vlastnosti Al a jeho slitin ve vodních roztocích solí jsou ovlivněny jejich pH a charakterem přítomných aniontů a kationtů. Z aniontů jsou nejagresivnější chloridy, které mají malé molekulární rozměry a snadno pronikají oxidovou vrstvou. Čím více se nachází porů a poškozených míst v tenké nesouvislé vrstvě, tím větší je vliv těchto chloridů [1].

## 4.5 Vliv koroze na mechanické vlastnosti

Koroze způsobuje zhoršení některých mechanických vlastností kovových materiálů, jakými jsou především mez kluzu, pevnost, odolnost proti tečení, plasticita a odolnost proti únavě. Mez kluzu, pevnost a odolnost proti tečení jsou ovlivňovány vyhoříváním legujících prvků, zatímco vnitřní oxidace a nauhličování způsobuje zhoršení plasticity a odolnosti proti únavě, která je rovněž snižována mezikrystalickou korozí [12].

## **4.6 Protikorozi ochrany hliníkových slitin**

### **4.6.1 Fosfátové povlaky**

Podstatou fosfátových povlaků je vytvoření vrstvy nerozpustných fosforečnanů na povrchu kovu, které se dosáhne procesem fosfátování použitím činidla obsahujícího kyselinu fosforečnou anebo fosforečnany. Fosfátové povlaky jsou nejrozšířenějším typem konverzních povlaků. Používají se k povrchovým úpravám oceli, litiny, hliníku, zinku a kadmia.

Fosfátové roztoky jsou nanášeny ponorem nebo postřikem podle počtu, velikosti a tvaru zpracovávaných dílů. Fosfátové povlaky musí být jemně krystalické, musí pokrývat povrch kovu rovnoměrně a nesmí na nich být skvrny, stíratelný povlak, korozní zplodiny ani otisky prstů [13].

### **4.6.2 Chromátové povlaky**

Chromátové povlaky vznikají vytvářením chromitového konverzního povlaku (chromátováním) na povrch kovu pomocí roztoků obsahujících sloučeniny šestimocného chromu. Chromátové povlaky se získají ponorem, stříkáním, naválcováním nebo rozetřením. Tato povrchová úprava je používána především na hliníkové díly v letectví ke zvýšení přilnavosti nátěrů a k ochraně proti korozi [13].

### **4.6.3 Anodické oxidové povlaky**

Tyto povlaky vznikají anodickou oxidací kovů (tzv. eloxování). Je to proces elektrolytické oxidace povrchu, při kterém se povrchová vrstva kovu mění na oxidový povlak. Takto vytvořený povlak má ochranné, dekorativní nebo funkční vlastnosti. Používají se v letectví, kosmonautice, ve strojírenství pro zvýšení korozní odolnosti, odolnosti proti oděru a opotřebení [13].

### **4.6.4 Chemické oxidové povlaky**

Povlaky vznikají chemickou oxidací, při které se na kovovém povrchu působením chemických oxidačních činidel vytváří oxidové vrstvy. Na hliníku a jeho slitinách se tyto povlaky používají pro vytvoření protikorozi ochrany drobných výrobků, tam, kde je požadován nízký elektrický odpor nebo jako podklad před nanášením nátěrů, laků a vosků [13].

## 5. METODIKA ZKOUŠENÍ KOROZE

Korozní zkoušky v umělých atmosférách jsou prováděny v laboratořích ve vzdušném prostředí obsahujícím činitele, které zesilují korozi kovových materiálů a jejich slitin. Tyto činitele jsou např. teplota, relativní vlhkost atmosféry, kondenzace vlhkosti a korozní činidla (oxid siřičitý, chloridy, kyseliny, amoniak, sirovodík atd.).

Zkoušky se dělí na zkoušky se zesíleným působením prostředí (předpovídají dlouhodobé korozní chování kovů), krátkodobé korozní zkoušky (porovnávají protikorozní odolnosti obdobných ochranných) a rychlé zkoušky pro kontrolu jakosti (umožňují rychlé zjištění vad a slabých míst protikorozní ochrany).

Všechny vzorky musí mít stejný povlak, tvar, velikost a drsnost povrchu. Tloušťka vzorku se pohybuje v rozmezí 0,5-3 mm a musí být taková, aby se vzorky nedeformovaly. Plocha povrchu vzorku musí být co největší, nejméně však 25 cm<sup>2</sup>. Povrch vzorku nesmí obsahovat vady, např. trhliny, póry, vměstky, jamky a škrábance.

Zkouška je prováděna ve zvláštních komorách zajišťujících homogenní a stabilní podmínky. Předepsané zkušební podmínky musí být dodrženy v celém pracovním prostoru po celou dobu trvání zkoušky a musí se průběžně kontrolovat.

Před zkouškou musí být vzorky s povlakem i bez něj prohlédnuty a odmaštěny inertní látkou. Pak jsou vzorky umístěny do komory takovým způsobem, aby si vzájemně nemohly stínit proti působení prostředí. Celková plocha povrchu zkoušených vzorků nesmí být větší než 0,75 m<sup>2</sup> na každý krychlový metr objemu komory. Vzorky jsou umístěny svisle nebo pod úhlem 15° až 30° ke svislici.

Celková zkušební doba závisí na zkušební metodě. Doporučené doby expozice jsou 24, 48, 96, 240, 480, 720 a 2016 hodin. Doba trvání zkoušky se počítá od vložení vzorku do komory a provedení všech předepsaných podmínek. Nezapočítává se čas při přerušení, vyjímání vzorků a periodických prohlídkách.

Během zkoušky musí být všechny vzorky prohlédnuty a některé i vyjmuty. Po zkoušce musí být vzorky umístěny do exsikátoru s vysoušedlem, který zabrání dalšímu vzniku a pokračování koroze [14].

## **6. HODNOCENÍ KOROZE**

Korozní charakteristiky kovových konstrukčních materiálů usnadňují výběr těchto materiálů ať již samotných nebo ve formě ochranných vrstev, avšak nejsou dostačující k rozhodnutí, zda pro určitý konkrétní případ bude využití některého z těchto materiálů skutečně optimální.

Z celospolečenského hlediska nebývá optimální ani použití nejodolnějšího materiálu či maximální dimenzování protikorozní ochrany ve výrobě, ani řešení, při němž se ve výrobě zvolí určitá jednodušší a výrobně schůdnější a méně nákladná varianta ochrany. Při návrhu optimálního řešení protikorozní ochrany se proto musí vzít v úvahu nejen korozní podmínky, jejichž působení bude výrobek vystaven, ale i požadavek na jeho životnost, na přípustný stupeň jeho korozního znehodnocení, možnosti provedení protikorozní ochrany, její údržbu, výměnu poškozených dílů včetně nákladů s tím spojených a řada dalších hledisek [3].

### **6.1 Hodnocení hmotnostních změn**

Rychlost koroze je určena z rozdílu hmotnosti před a po expozici. Citlivost změny hmotnosti roste s dobou expozice a se vzrůstem poměru povrchu vzorku k jeho hmotnosti. Tvar, velikost a povrch vzorku jsou před expozicí upraveny tak, aby vyhovovaly účelu a typu zkoušky. Korozní produkty vzniklé během expozice jsou ze vzorků zbavovány nejčastěji chemickými postupy, které nenarušují základní kovový materiál [15].

### **6.2 Hodnocení rozměrových změn**

Hodnotí se změna tloušťky vzorku nebo stěny zařízení mechanickými měřidly, postupy běžnými v defektoskopii (ultrazvuk, radiační a indukční metoda) nebo odporovými metodami. V případě nerovnoměrné koroze lze měřit hloubku napadení. K určení kritického zeslabení na provozním zařízení slouží i záměrné zeslabení v místech, kde bývá korozní přírůstek tloušťky vyčerpán nejdříve [15].

### **6.3 Hodnocení změn mechanických vlastností**

Hodnotí se změny mechanických vlastností vzorků, samostatně exponovaných vzorků, případně zhotovených z částí exponovaného výrobního zařízení, po expozici v korozním prostředí [15].

### **6.4 Hodnocení vzhledových změn**

Zkorodovaný povrch je hodnocen vizuálně jak s korozními produkty, tak po jejich odstranění. Trhliny a jiné nerovnoměrné napadení lze zviditelnit barevnými nebo fluorescenčními látkami, magnetickými prášky nebo otisky. Tímto způsobem může být v některých případech určen i kvantitativně rozsah a četnost korozního napadení. Hodnotí se prostým okem, při zvětšení pod lupou nebo mikroskopem [15].

## **6.5 Metalografické hodnocení**

Jedná se o hodnocení po zvětšení na mikroskopu k určení charakteru a hloubky korozního napadení na exponovaných vzorcích nebo vzorcích odebraných z částí korodovaného provozního zařízení. Tato metoda je vhodná pro kvalitativní a kvantitativní hodnocení nerovnoměrné koroze a kvality povlaků [15].

## **7. CÍLE PRÁCE**

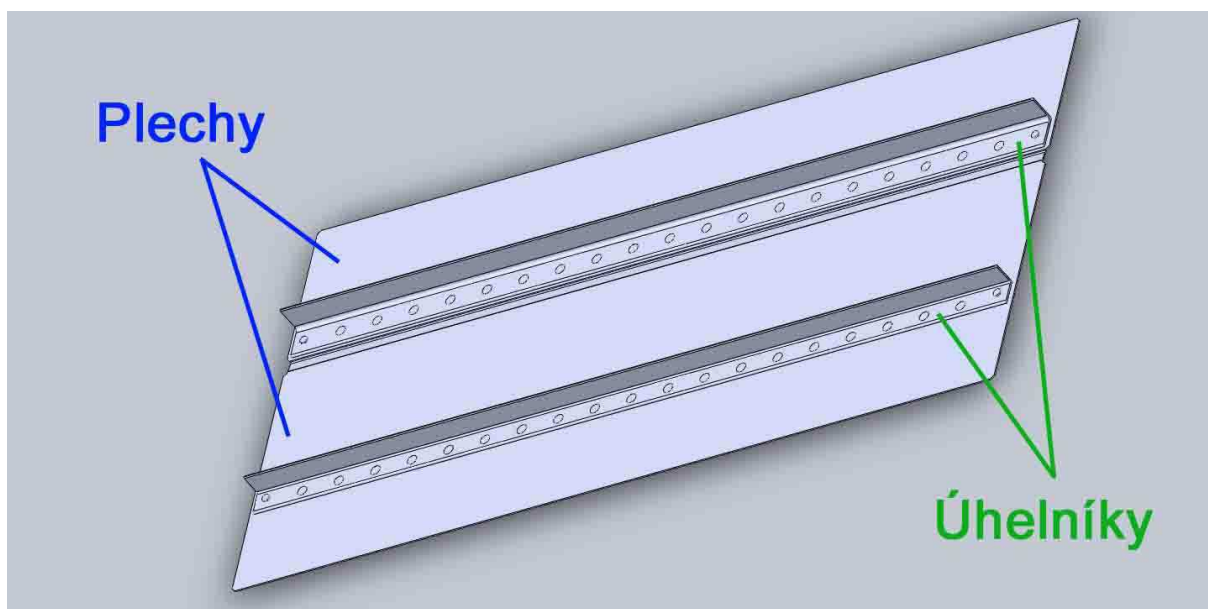
Cílem teoretické části bakalářské práce je popis chemického složení, tepelného zpracování, struktury a vlastností hliníkové slitiny používané na panel letadla a popis metodiky zkoušení a hodnocení korozního napadení.

V experimentální části této práce je cílem provedení zkoušky v korozní komoře se solnou mlhou na vzorcích bez povrchové ochrany a vyhodnocení korozního napadení vzorků v místě nýtových spojů a určení kritických míst konstrukce.

## 8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### 8.1 Experimentální materiál

Experimentálními materiály byly panely používané v konstrukci letadla, které byly složeny z plechů a úhelníků vyrobených z hliníkové slitiny AlCu4Mg1, přičemž plechy byly technologií naplátování za tepla opatřeny vrstvou hliníku o čistotě 99,5 %. Panely letadla mají rozměry 500 x 251 mm, které jsou složeny ze dvou plechů o shodné tloušťce 0,7 mm a rozměrech 500 x 180 mm a 500 x 91 mm a dvou úhelníků s profilem ve tvaru písmene L o shodné délce 494 mm a rozměrech 15 x 15 mm a 20 x 18 mm. Plechy a úhelníky byly dohromady složeny fixačními nýty z materiálu AlCu4Mn na koncích úhelníků a bodovými svary o rozteči přibližně 24 mm. Panely použité pro experiment nebyly ošetřeny žádnými ochrannými povlaky a štěrby mezi plechy, případně mezi plechy a úhelníky, nebyly kryty tmelem. Schéma panelu letadla je na obr. 8.1.



Obr. 8.1 Schéma panelu letadla

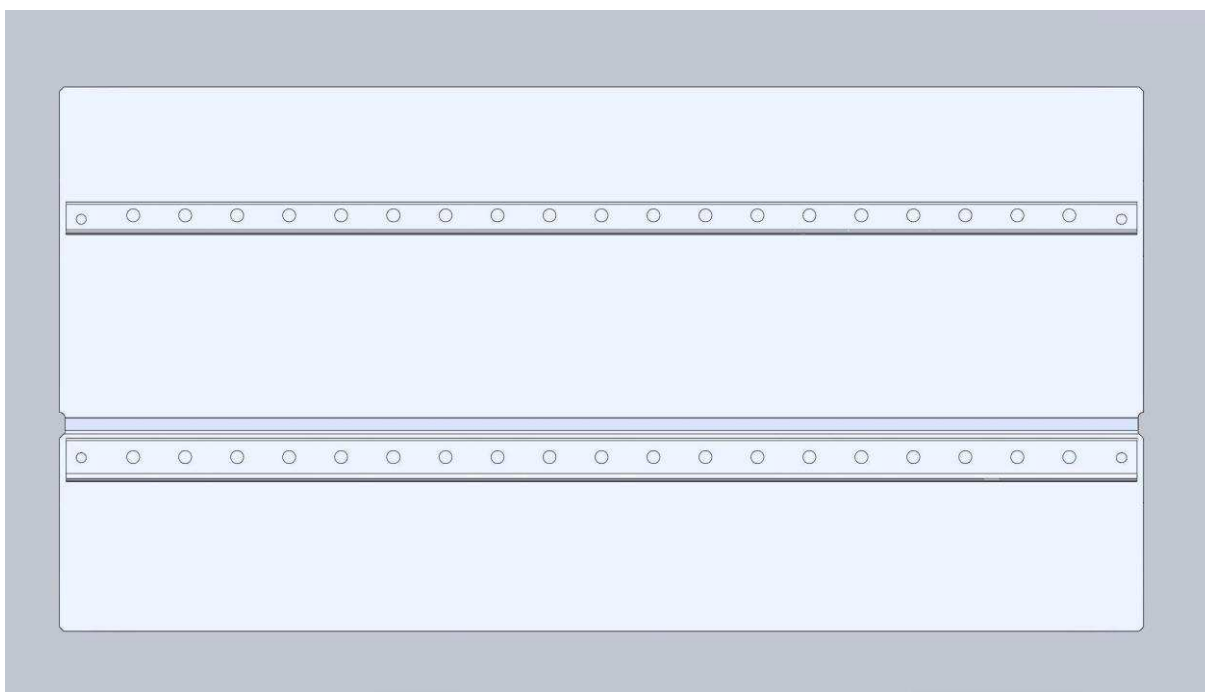
### 8.2 Postup provedení experimentu

Pro hodnocení korozního chování hliníkových slitin v mlze neutrálního roztoku chloridu sodného byla použita zkušební zařízení známá pod pojmem korozní komory. V nich se provádí korozní zkouška v umělé atmosféře podle normy ČSN EN ISO 9227 – Zkouška solnou mlhou neutrálního roztoku chloridu sodného [6].

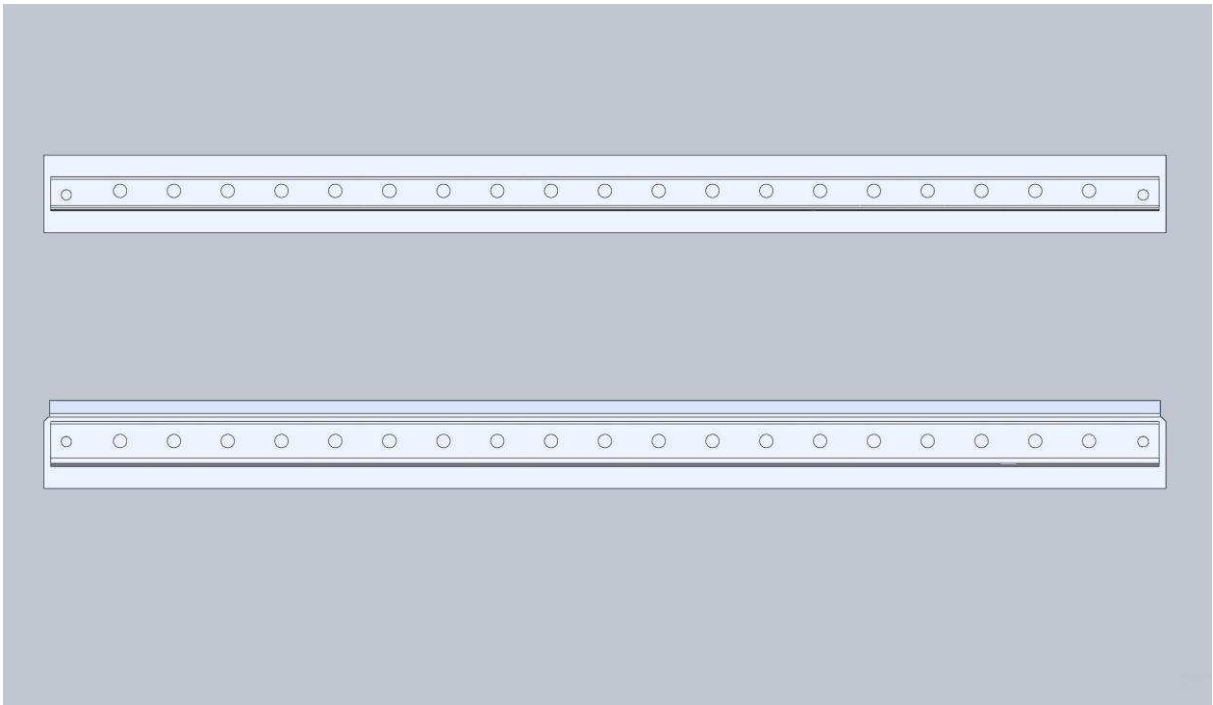
K provedení experimentu byla použita solná komora DCTC 600P firmy Angelantoni Industrie S.p.a. Zkouška byla prováděna s dobou expozice 480 a 1000 hodin. Zkušební cykly probíhaly v prostředí 5 % roztoku NaCl s koncentrací 50/l při teplotě  $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  a pH nahromaděného solného roztoku 6,5 až 7,2. Při činnosti zařízení byla vytvořena neutrální mlha roztoku chloridu sodného. Panely byly umístěny do korozní komory tak, aby na panely umístěné níže nestékala zkondenzovaná kapalina ani zkušební roztok z panelů umístěných výše, případně z horní části komory. Panely byly rozmístěny tak, aby si navzájem nemohly

stínit proti působení korozního prostředí. Z důvodu zajištění homogenního působení korozní atmosféry byly panely periodicky po 24 hodinách otáčeny o 90°. Doba expozice byla 480 a 1000 hodin. Po vyjmutí panelů z korozní komory byly oplachem odstraněny zbytky korozní atmosféry a panely byly osušeny horkým vzduchem.

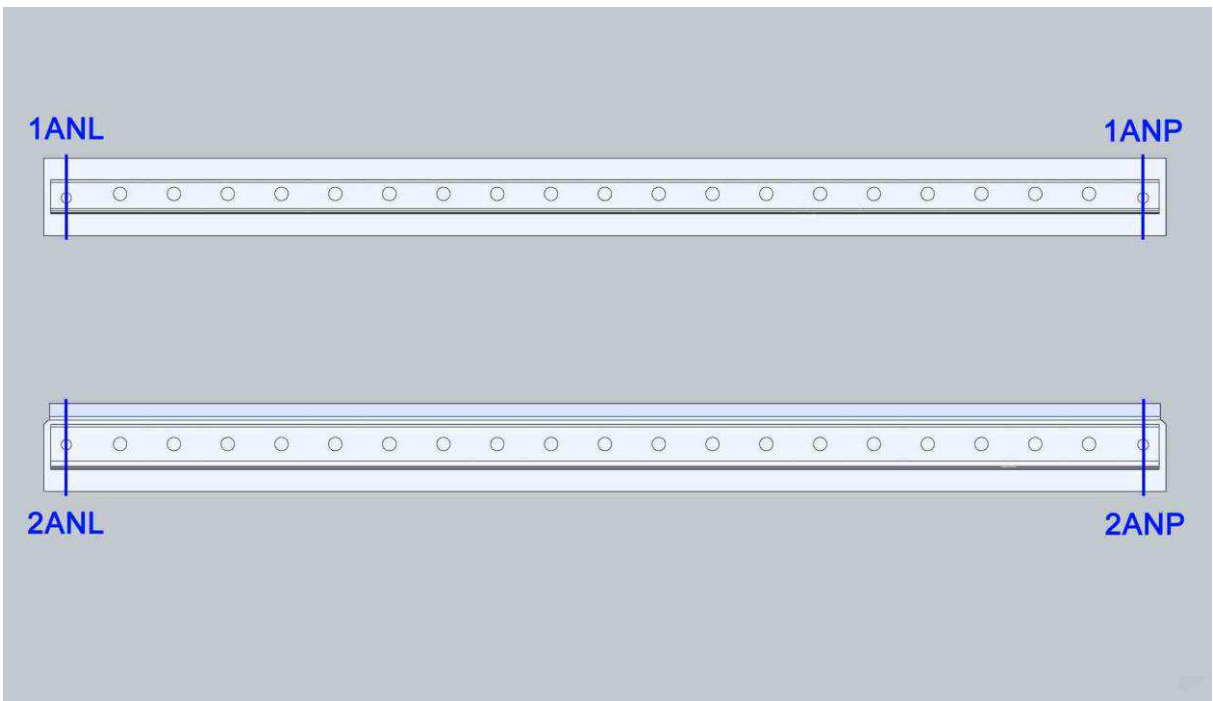
Následně byly zkorodované panely rozřezány na zařízení pro automatické dělení metalografických vzorků (stolní rozbrušovačka) MSX250 firmy LECO (schéma panelu před rozřezáním je vidět na obr. 8.2.1). Nejprve byly provedeny podélné řezy ve vzdálenosti 10 mm od dlouhé hrany úhelníku (obr. 8.2.2) a poté osové řezy v místě nýtů (obr. 8.2.3 pro expozici 480 hodin a obr. 8.2.4 pro expozici 1000 hodin).



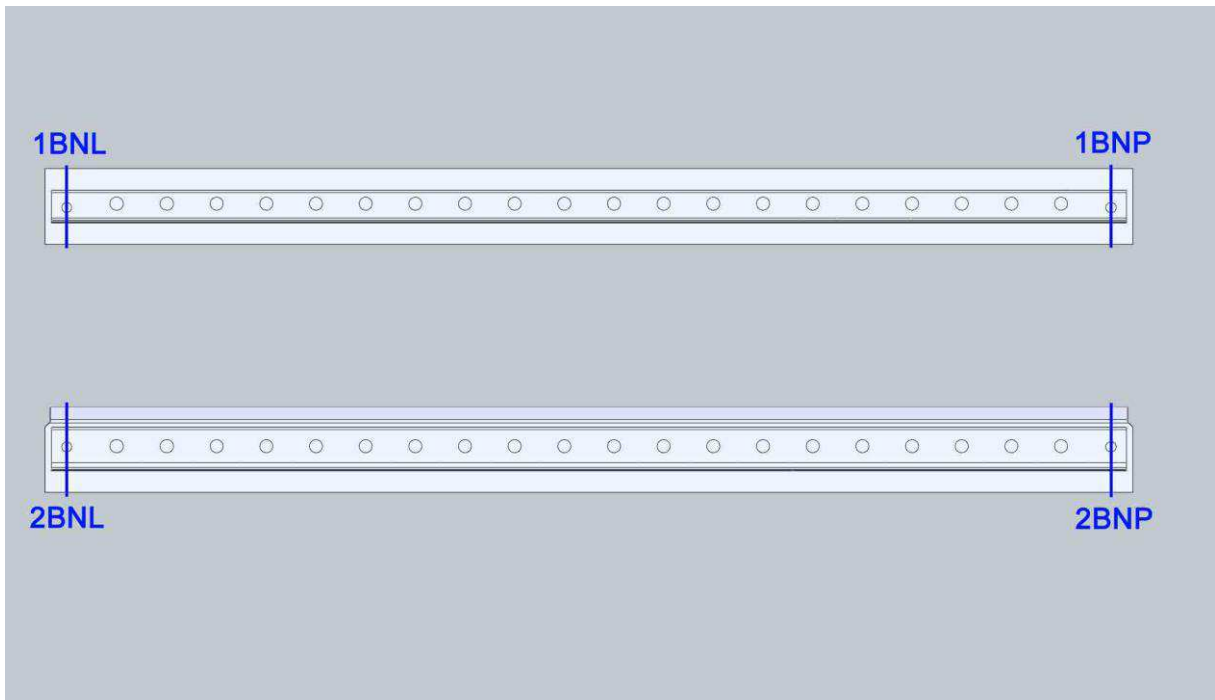
*Obr. 8.2.1 Schéma panelu před rozřezáním*



*Obr. 8.2.2 Schéma panelu po rozřezání – podélné řezy*

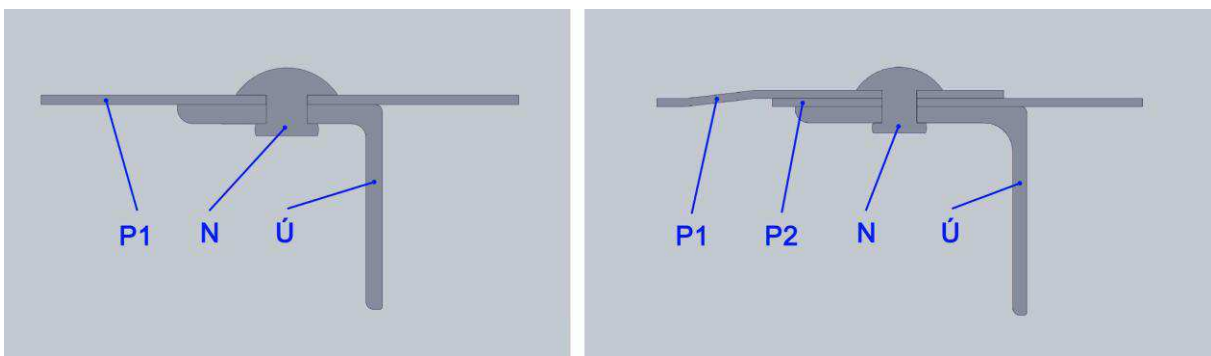


*Obr. 8.2.3 Osově řezy v místě nýtů, expozice 480 hodin*



*Obr. 8.2.4 Osové řezy v místě nýtů, expozice 1000 hodin*

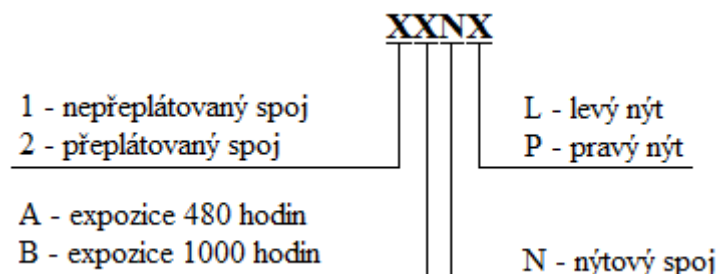
Vzorky vzniklé rozřezáním (obr. 8.2.5) byly po dobu 30 minut při teplotě 180 °C a tlaku 29 MPa zalisovány do preparační vytvrditelné hmoty ClaroFast na zařízení pro automatické lisování vzorků PR-4X firmy LECO a označeny gravírovacím zařízením firmy STRUERS. Poté byly vybroušeny na metalografické brusce GPX200 firmy LECO s použitím brusných papírů o zrnitosti 600, 800, 1200, 2400 a 4000, vyleštěny na metalografické leštičce GPX200 firmy LECO pomocí diamantové pasty o zrnitosti 3 a 0,7 μm a chemicko-mechanickým leštěním pomocí suspenze OP-S od firmy STRUERS. Následně byly vzorky naleptány leptadlem FUSS a pozorovány na světelném mikroskopu Olympus PMG-3. Místa napadená korozí byla zdokumentována digitální kamerou DP 20 a posléze vyhodnocena pomocí obrazové analýzy v programu Stream Motion.



*Obr. 8.2.5 Rozřezané vzorky připravené k zalisování, nepřeplátovaný spoj (vlevo), přeplátovaný spoj (vpravo), P1 – plech 1, P2 – plech 2, N – nýt, Ú - úhelník*

### 8.2.1 Značení metalografických vzorků

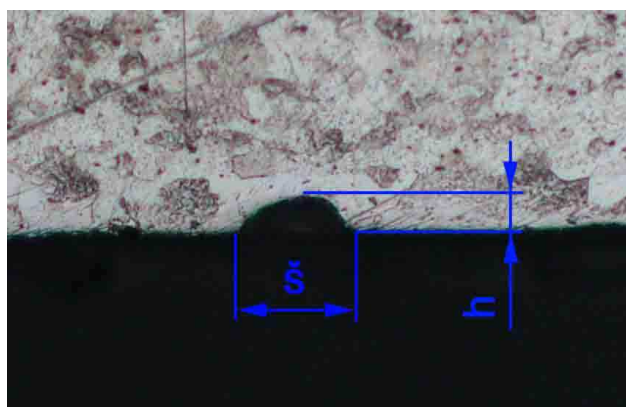
System značení metalografických vzorků rozlišuje typ spoje, čas expozice a umístění nýtu na panelu podle následujícího schématu:



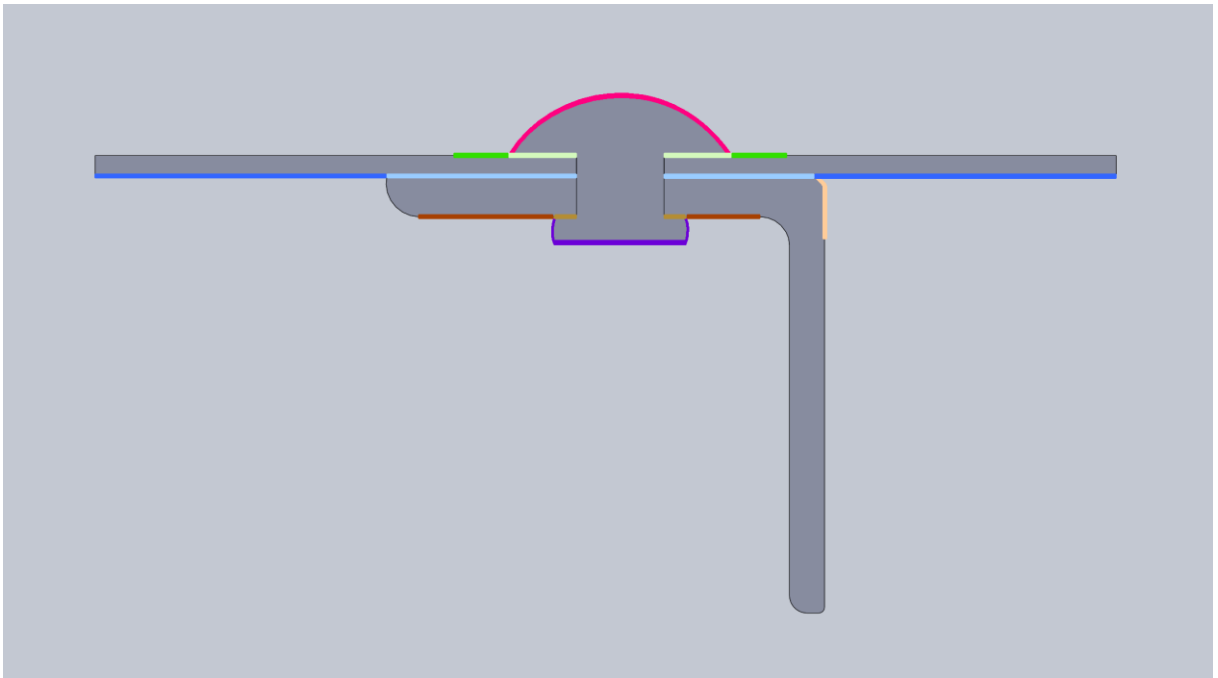
Např. metalografický vzorek s názvem 1ANL udává, že se jedná o nepřepřátovaný spoj po expozici 480 hodin a nýtem umístěným na levé straně panelu.

### 8.3 Hodnocení výsledků experimentu

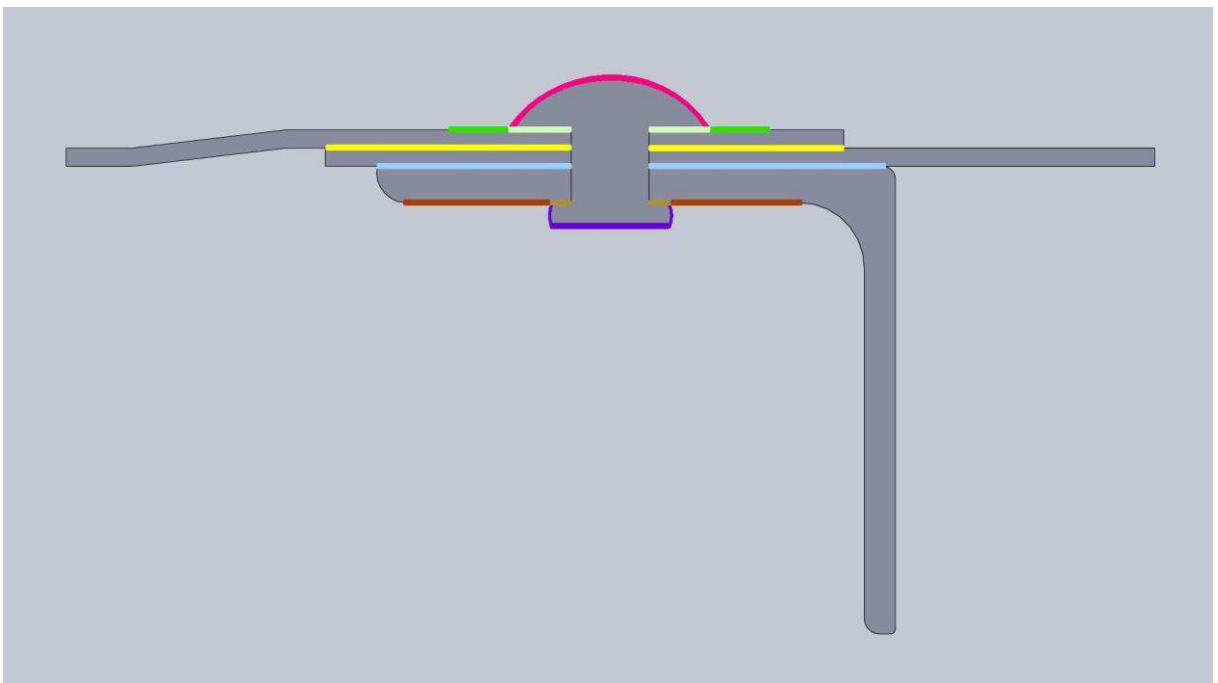
Při hodnocení koroze byly měřeny šířky a hloubky míst korozního napadení (obr. 8.3.1) na jednotlivých površích plechů, úhelníků, příp. i nýt. Schémata hodnocených povrchů jsou uvedena a barevně rozlišena na obr. 8.3.2 (nepřepřátovaný spoj) a obr. 8.3.3 (přepřátovaný spoj). Naměřené hodnoty byly zpracovány tabelárně. Byly tak získány velmi obsáhlé soubory údajů o rozsahu napadení materiálu plechů a úhelníků i o rozložení napadení podél konstrukce. Získané kvantitativní údaje byly poté matematicky zpracovány, přičemž byly kromě jiného nalezeny maximální hodnoty šířky a hloubky napadení. Podle umístění těchto maximálních napadení na panelu byla označena kritická místa konstrukce.



Obr. 8.3.1 Šířka a hloubka korozního napadení



*Obr. 8.3.2 Schéma hodnocených povrchů pro nepřekládaný spoj*



*Obr. 8.3.3 Schéma hodnocených povrchů pro překládaný spoj*

## 8.4 Zpracování výsledků experimentu

### 8.4.1 Značení povrchů napadených korozi

Podle místa korozního napadení rozlišujeme různé druhy povrchů, které mohou být v kontaktu nebo mimo kontakt a jsou označeny následovně:

- **N hlava:** korozní napadení na hlavě nýtu
- **N – P1**
  - **N:** korozní napadení mezi nýtem  $N$  a plechem  $P1$ , přičemž koroduje nýt  $N$
  - **P1:** korozní napadení mezi nýtem  $N$  a plechem  $P1$ , přičemž koroduje plech  $P1$
  - **P1 mimo kontakt u hlavy:** korozní napadení do plechu  $P1$  těsně vedle hlavy nýtu  $N$  mimo kontakt mezi nýtem  $N$  a plechem  $P1$
- **P1 – P2**
  - **P1:** korozní napadení mezi plechem  $P1$  a plechem  $P2$ , přičemž koroduje plech  $P1$
  - **P2:** korozní napadení mezi plechem  $P1$  a plechem  $P2$ , přičemž koroduje plech  $P2$
- **P2 – Ú**
  - **P2:** korozní napadení mezi plechem  $P2$  a úhelníkem  $Ú$ , přičemž koroduje plech  $P2$
  - **Ú:** korozní napadení mezi plechem  $P2$  a úhelníkem  $Ú$ , přičemž koroduje úhelník  $Ú$
- **Ú – N**
  - **Ú:** korozní napadení mezi úhelníkem  $Ú$  a nýtem  $N$ , přičemž koroduje úhelník  $Ú$
  - **N:** korozní napadení mezi úhelníkem  $Ú$  a nýtem  $N$ , přičemž koroduje nýt  $N$
- **Ú:** korozní napadení na volném povrchu úhelníku  $Ú$
- **Ú mimo kontakt z boku ohybu:** korozní napadení do úhelníku  $Ú$  z boku ohybu
- **N pata:** korozní napadení na volném povrchu paty nýtu

### 8.4.2 Experimentálně zjištěné hodnoty

Naměřené hodnoty šířky a hloubky míst korozního napadení pro nepřepřátovaný a přeplátovaný spoj s expozicí 480 a 1000 hodin byly zapsány do tabulek 8.4.2.1 až 8.4.2.4. Tyto tabulky obsahují rozložení napadení podél konstrukce, výpočet plochy korozního napadení a čísla fotografií, která přísluší jednotlivým místům korozního napadení. Fotografie míst napadených korozi jsou uvedeny v příloze. Barevné označení tabulek rozlišující místa napadení podél konstrukce koresponduje s barevným označením povrchů vzorků uvedených na obr. 8.3.2 a obr. 8.3.3. Hodnoty šířky a hloubky míst korozního napadení v tabulkách jsou uvedeny v  $\mu\text{m}$ , plocha korozního napadení v  $\mu\text{m}^2$ . V případě, že se v tabulce vyskytuje nulová hodnota, jedná se o místo nenapadené korozi.



Tab. 8.4.2.2 Naměřené hodnoty míst korozního napadení pro nepřelátovaný spoj po expozici 1000 hodin

vzorek	N - P1										P1 mimo kontakt u hlavy													
	N hlava					N					P1			P1 mimo kontakt u hlavy										
	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.				
1BNL	189,96	44,31	8417,13	P2.1	-	0	0	0	-	-	25,28	5,65	142,83	P2.2	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	44,93	8,92	400,78	P2.3	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
1BNP	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	652,97	17,84	11648,98	P2.4	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
1BNL	1221,33	20,22	24695,29	P2.5	P2.5	1457,95	46,38	67619,72	P2.5	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	39,25	14,52	569,91	P2.6	P2.6	110,60	14,87	1644,62	P2.18	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	210,20	20,51	4311,20	P2.6	P2.6	552,00	23,81	13143,12	P2.9	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	43,42	16,35	709,92	P2.7	P2.7	305,67	13,38	4089,86	P2.10	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	26,17	13,08	342,30	P2.7	P2.7	471,00	21,70	10220,70	P2.12	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	115,05	19,32	2222,77	P2.7	P2.7	52,37	19,34	1012,84	P2.13	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	51,44	17,54	902,26	P2.8	P2.8	123,57	26,62	3289,43	P2.14	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	490,15	16,65	8161,00	P2.9	P2.9	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	305,67	5,95	1818,74	P2.10	P2.10	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
	209,36	15,77	3301,61	P2.11	P2.11	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-				
347,78	13,38	4653,30	P2.12	P2.12	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-					
71,65	11,59	830,42	P2.13	P2.13	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-					
164,41	17,24	2834,43	P2.14	P2.14	0	0	0	-	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-					
75,81	24,38	1848,25	P2.15	P2.15	832,43	26,46	22026,10	P2.19	P2.21	249,44	88,30	22025,55	P2.21	0	0	0	0	0	-					
102,94	20,83	2144,24	P2.16	P2.16	380,78	16,35	6225,75	P2.16	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-					
420,41	31,24	13133,61	P2.17	P2.17	420,41	15,49	6512,15	P2.17	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-					
0	0	0	-	-	1854,11	68,97	127877,97	P2.20	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-					
vzorek	P1										P1 mimo kontakt						Ú - N							
	P1					Ú					P1 mimo kontakt			Ú			Ú			Ú				
	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.	š	h	š.h	čí.s. obr.	čí.s. obr.	š	h	š.h	čí.s. obr.



Tab. 8.4.2.3 Naměřené hodnoty míst korozního napadení pro přepřátovaný spoj po expozici 480 hodin

vzorek	N - P1																								
	N hlava					N					P1					P1 mimo kontakt u hlavy									
	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.
2ANL	0	0	0	0	-	304,08	39,41	11983,79	P3.2	P3.2	1676,91	40,43	67797,47	P3.4	P3.4	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	268,76	35,68	9589,36	P3.3	P3.3	541,04	22,63	12243,74	P3.2	P3.2	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	602,98	29,73	17926,60	P3.3	P3.3	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
2ANP	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	331,79	24,97	8284,80	P3.5	P3.5	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	283,64	27,05	7672,46	P3.6	P3.6	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	1099,12	49,96	54912,04	P3.7	P3.7	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	327,05	11,89	3888,62	P3.8	P3.8	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
vzorek	P1 - P2										P2 - Ú														
	P1					P2					P2					Ú									
	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.
2ANL	680,30	48,76	33171,43	P3.2	P3.2	680,30	42,83	29137,25	P3.2	P3.2	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
2ANP	641,03	15,46	9910,32	P3.5	P3.5	387,72	20,22	7839,70	P3.5	P3.5	1262,38	30,94	39058,04	P3.10	P3.10	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	236,65	36,86	8722,92	P3.5	P3.5	278,29	19,03	5295,86	P3.5	P3.5	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	324,02	14,32	4639,97	P3.9	P3.9	493,08	16,69	8229,51	P3.9	P3.9	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
vzorek	Ú - N										Ú mimo kontakt z boku ohybu														
	Ú					N					Ú mimo kontakt					Ú mimo kontakt z boku ohybu									
	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.
2ANL	0	0	0	0	-	176,77	60,29	10657,46	P3.11	P3.11	237,88	60,46	14382,22	P3.12	P3.12	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	156,68	106,14	16630,02	P3.13	P3.13	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	349,23	36,71	12820,23	P3.14	P3.14	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
2ANP	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
	0	0	0	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-
vzorek	N pata																								
	š	h	š.h	čís. obr.	čís. obr.																				
	70,08	100,09	7014,31	P3.15	P3.15																				
2ANL	0	0	0	0	-																				
2ANP	0	0	0	0	-																				
	0	0	0	0	-																				
	0	0	0	0	-																				

Tab. 8.4.2.4 Naměřené hodnoty míst korozního napadení pro přelátovaný spoj po expozici 1000

vzorek	N - P1												P1 mimo kontakt u hlavy							
	N hlava						N						P1							
	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.
2BNL	0	0	0	-	0	0	0	-	212,75	11,93	2538,11	P4.3	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	471,74	26,16	12340,72	P4.4	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2BNP	314,22	83,31	26177,67	P4.1	476,34	11,89	5663,88	P4.2	1033,47	16,65	17207,28	P4.2	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	408,56	30,33	12391,62	P4.5	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	72,25	19,03	1374,92	P4.6	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	344,58	9,51	3276,96	P4.7	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	259,90	16,39	4259,76	P4.8	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
vzorek	P1 - P2												P2 - Ú							
	P1						P2						Ú							
	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.	š	h	š.h	čís. obr.
2BNL	317,98	15,80	5024,08	P4.9	121,33	11,93	1447,47	P4.11	400,79	20,29	8132,03	P4.23	360,79	13,14	4740,78	P4.23	400,79	20,29	8132,03	P4.23
	0	0	0	-	80,88	9,59	775,64	P4.11	409,36	21,44	8776,68	P4.24	1285,53	27,35	35159,25	P4.31	409,36	21,44	8776,68	P4.24
	0	0	0	-	152,78	17,01	2598,79	P4.12	370,19	16,99	6289,53	P4.25	374,62	15,46	5791,63	P4.32	370,19	16,99	6289,53	P4.25
	0	0	0	-	137,45	18,77	2579,94	P4.13	93,90	20,95	1967,21	P4.26	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	147,83	16,99	2511,63	P4.14	294,96	20,22	5964,09	P4.27	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	179,75	11,91	2140,82	P4.15	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2BNP	733,85	29,73	21817,36	P4.10	596,33	13,08	7800,00	P4.17	447,21	21,70	9704,46	P4.28	266,71	13,98	3728,61	P4.33	447,21	21,70	9704,46	P4.28
	0	0	0	-	390,10	26,16	10205,02	P4.18	196,53	19,62	3855,92	P4.29	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	164,20	26,77	4395,63	P4.19	1186,84	21,41	25410,24	P4.30	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	297,89	21,41	6377,82	P4.20	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	337,43	33,30	11236,42	P4.21	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
	0	0	0	-	685,00	24,97	17104,45	P4.10	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
0	0	0	-	224,73	12,61	2833,85	P4.22	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	



### 8.4.3 Zpracování experimentálních výsledků

Pro každé jednotlivé vzorky a pro každé rozložení podél konstrukce (barevné označení) byly z tabulek 8.4.2.1 až 8.4.2.4 vypočteny aritmetické průměry a nalezeny maximální hodnoty šířky, hloubky a plochy koroze napadených míst. Pro dvojici vzorků, které se vyznačují stejným typem spoje (přepřátovaný spoj, nepřepřátovaný spoj) a expozicí (480 hodin, 1000 hodin), např. 1ANL a 1ANP apod. byly vypočteny jejich průměrné hodnoty a nalezeny jejich maximální hodnoty. Tyto hodnoty jsou uvedeny v souhrnných tabulkách 8.4.3.1 až 8.4.3.4.

Dále byly určeny průměrné hodnoty z původních průměrných hodnot pro jednotlivé dva vzorky a maximální hodnoty z původních maximálních hodnot pro jednotlivé dva vzorky pro daný spoj a danou expozici. V tabulce byly oranžovým rámečkem označeny maximální hodnoty šířky, hloubky a plochy korozního napadení ze všech průměrných hodnot napadení podél konstrukce a červeným rámečkem označeny maximální hodnoty šířky, hloubky a plochy korozního napadení ze všech maximálních hodnot napadení podél konstrukce – udávají tedy místa nejvíce napadená koroze, která nazýváme tzv. **kritickými místy konstrukce**. Je-li v tabulkách za hodnotou maximální hloubky napadení písmeno P, jedná se o úplné zkorodování celé hliníkové vrstvy na potahovém plechu až do základního materiálu AlCu4Mg1.

Tab. 8.4.3.1 Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot míst korozního napadení pro nepřepřátovaný spoj po expozici 480 hodin

Nepřepřátovaný spoj		480 h (1ANL + 1ANP)							
		š [μm], h [μm], š.h [μm <sup>2</sup> ]							
		Ø				max			
		Ø (Ø š)	Ø (Ø h)	Ø (Ø (š.h))	poč.měř.	max (max š)	max (max h)	max (max (š.h))	poč.měř.
N hlava	N	107,64	14,57	529,10	2	186,05	27,81	812,61	2
N - P1	N	0	0	0	2	0	0	0	2
	P1	1143,75	14,87	16931,51	2	1261,95	15,46	18008,03	2
	P1 mimo kontakt u hlavy	136,65	21,12	3089,16	2	189,40	24,98	4731,21	2
P1 - Ú	P1	667,86	22,77	15853,04	3	922,95	25,31	23359,86	3
	Ú	440,38	15,49	6593,73	3	692,31	16,38	10100,80	3
	P1 mimo kontakt	0	0	0	2	0	0	0	2
Ú - N	Ú	243,31	63,74	15508,58	3	243,31	63,74	15508,58	3
	N	108,41	30,92	3352,04	3	108,41	30,92	3352,04	3
Ú	Ú	0	0	0	2	0	0	0	2
Ú mimo kontakt z boku ohybu		0	0	0	2	0	0	0	2
N pata	N pata	0	0	0	2	0	0	0	2

Tab. 8.4.3.2 Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot míst korozního napadení pro nepřepřátovaný spoj po expozici 1000 hodin

Nepřepřátovaný spoj		1000h (1BNL + 1BNP)							
		š [μm], h [μm], š.h [μm <sup>2</sup> ]							
		∅				max			
		∅ (∅ š)	∅ (∅ h)	∅ (∅ (š.h))	poč.měř.	max (max š)	max (max h)	max (max (š.h))	poč.měř.
N hlava	N	189,96	44,31	8417,13	2	189,96	44,31	8417,13	2
N - P1	N	0	0	0	2	0	0	0	2
	P1	344,04	12,56	5960,39	3	652,97	17,84	11648,98	3
	P1 mimo kontakt u hlavy	0	0	0	2	0	0	0	2
P1 - Ú	P1	226,62	20,52	4983,32	16	1221,33	31,24 P	24695,29	16
	Ú	655,48	27,77	27545,98	11	1854,11	68,97	127877,97	11
	P1 mimo kontakt	249,44	88,30	22025,55	2	249,44	88,30 P	22025,55	2
Ú - N	Ú	0	0	0	2	0	0	0	2
	N	0	0	0	2	0	0	0	2
Ú	Ú	784,54	26,16	24178,14	4	1202,28	35,68	42897,35	4
Ú mimo kontakt z boku ohybu		275,06	81,50	22417,39	2	275,06	81,50	22417,39	2
N pata	N pata	0	0	0	2	0	0	0	2

Tab. 8.4.3.3 Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot míst korozního napadení pro přepřátovaný spoj po expozici 480 hodin

Přepřátovaný spoj		480 h (2ANL + 2ANP)							
		š [μm], h [μm], š.h [μm <sup>2</sup> ]							
		∅				max			
		∅ (∅ š)	∅ (∅ h)	∅ (∅ (š.h))	poč.měř.	max (max š)	max (max h)	max (max (š.h))	poč.měř.
N hlava	N hlava	304,70	77,63	23653,86	2	304,70	77,63	23653,86	2
N - P1	N	286,42	37,55	10786,57	3	304,08	39,41	11983,79	3
	P1	1450,71	59,40	51345,41	7	1676,91	49,96 P	67797,47	7
	P1 mimo kontakt u hlavy	0	0	0	2	0	0	0	2
P1 - P2	P1	540,43	35,49	20464,58	4	680,30	48,76 P	33171,43	4
	P2	533,33	30,74	18129,47	4	680,30	42,83 P	29137,25	4
P2 - Ú	P2	1262,38	30,94	39058,04	2	1262,38	30,94 P	39058,04	2
	Ú	0	0	0	2	0	0	0	2
Ú - N	Ú	0	0	0	2	0	0	0	2
	N	176,77	60,29	10657,46	2	176,77	60,29	10657,46	2
	Ú mimo kontakt	247,93	67,77	14610,82	4	349,23	106,14	16630,02	4
Ú mimo kontakt z boku ohybu		0	0	0	2	0	0	0	2
N pata	N pata	70,08	100,09	7014,31	2	70,08	100,09	7014,31	2

Tab. 8.4.3.4 Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot míst korozního napadení pro přepřátovaný spoj po expozici 1000 hodin

Přepřátovaný spoj		1000h (2BNL+ 2BNP)							
		š [μm], h [μm], š.h [μm <sup>2</sup> ]							
		Ø				max			
		Ø (Ø š)	Ø (Ø h)	Ø (Ø (š.h))	poč.měř.	max (max š)	max (max h)	max (max (š.h))	poč.měř.
N hlava	N hlava	314,22	83,31	26177,67	2	314,22	83,31	26177,67	2
N - P1	N	476,34	11,89	5663,68	2	476,34	11,89	5663,68	2
	P1	383,00	18,71	7570,76	7	1033,47	30,33 P	17207,28	7
	P1 mimo kontakt u hlavy	0	0	0	2	0	0	0	2
P1 - P2	P1	525,92	22,77	13420,72	2	733,85	29,73	21817,36	2
	P2	269,98	18,57	5435,81	14	685,00	33,30 P	17104,45	14
P2 - Ú	P2	462,02	20,44	9608,06	8	1186,84	21,70	25410,24	8
	Ú	470,18	16,32	9479,58	4	1285,53	27,35	35159,25	4
Ú - N	Ú	0	0	0	2	0	0	0	2
	N	0	0	0	2	0	0	0	2
	Ú mimo kontakt	148,81	35,54	5289,71	3	153,12	35,98	5509,26	3
Ú mimo kontakt z boku ohybu		0	0	0	2	0	0	0	2
N pata	N pata	0	0	0	2	0	0	0	2

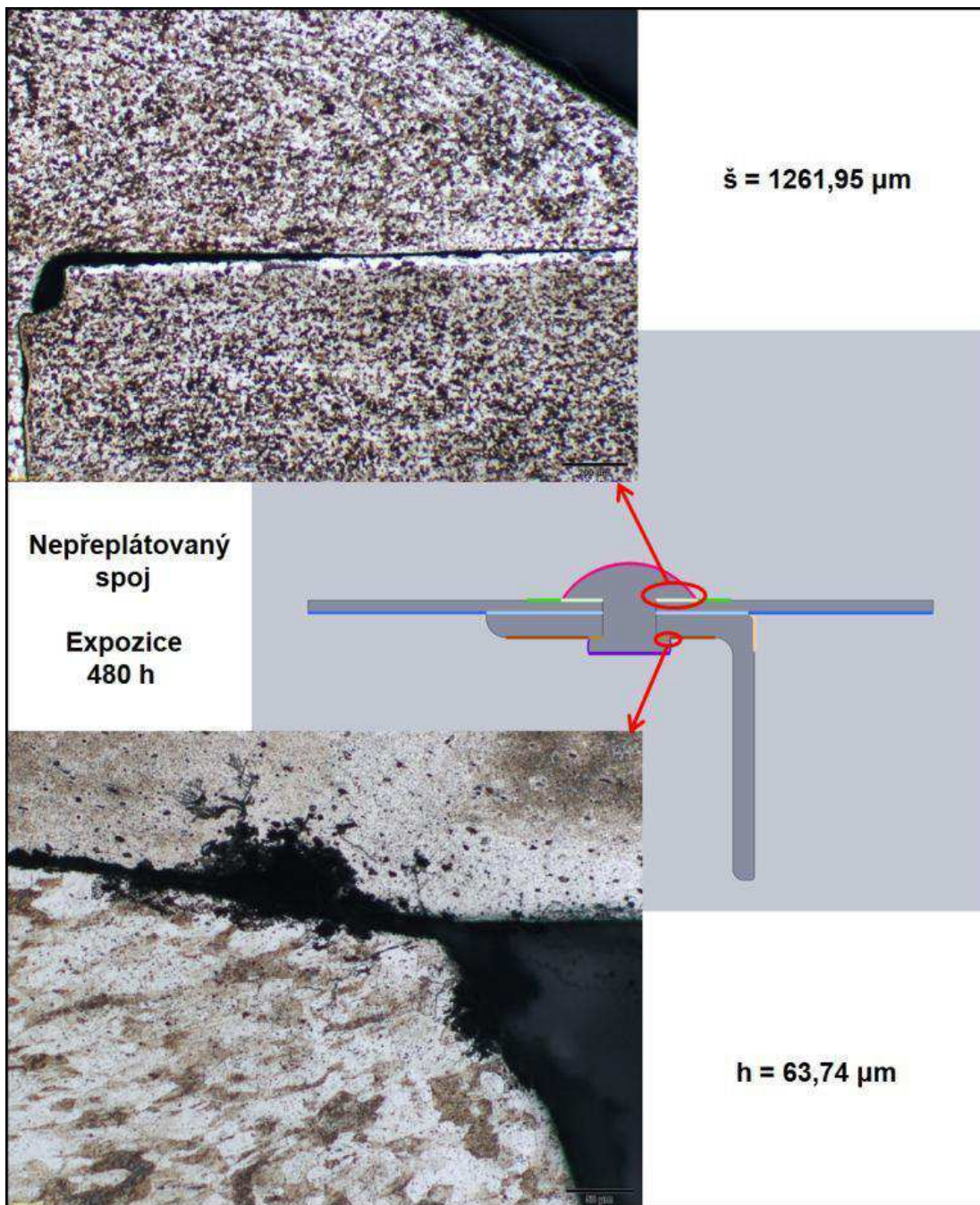
## 9. DISKUZE VÝSLEDKŮ

### *Maximální hodnoty hloubky a šířky korozního napadení*

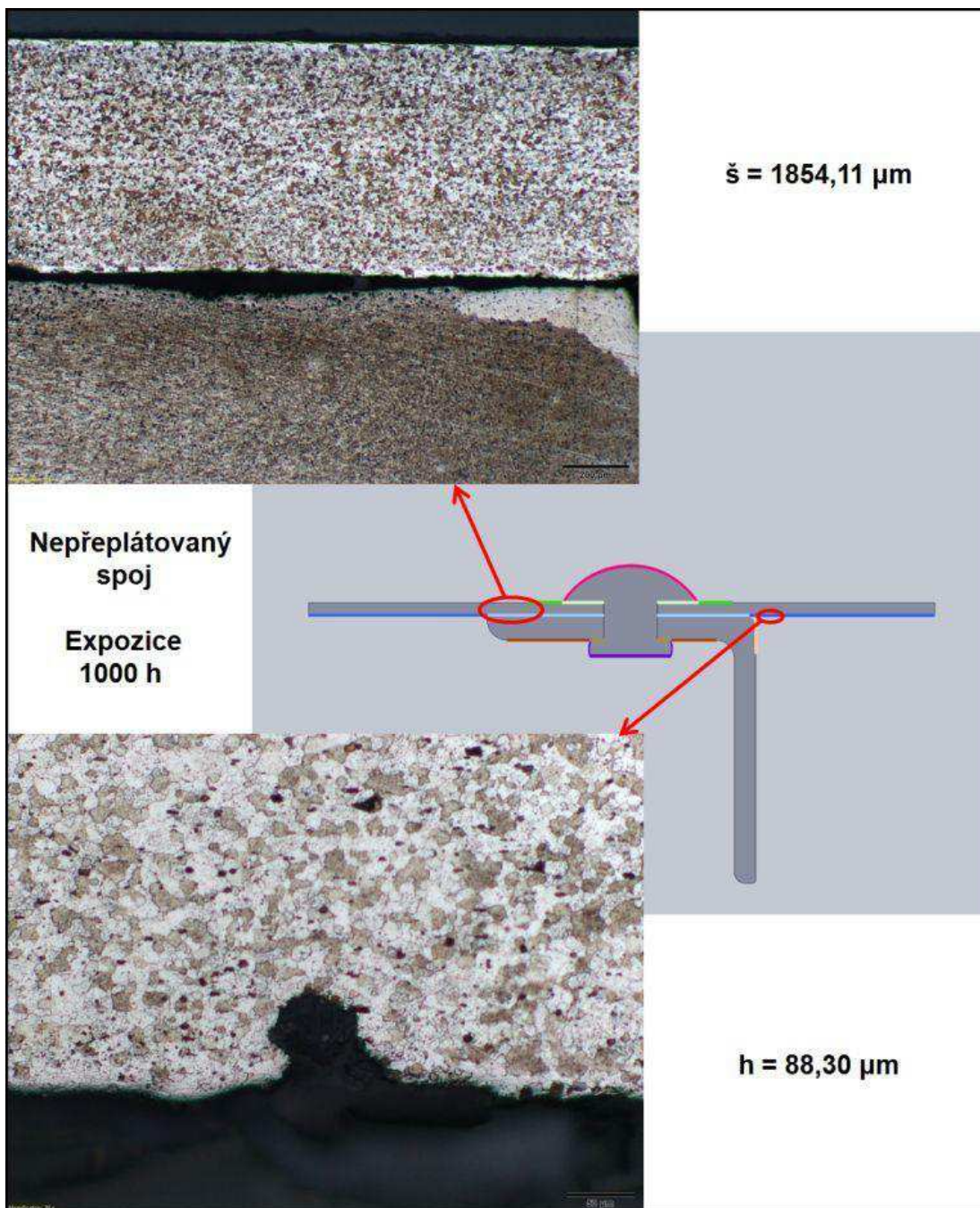
Z hlediska pevnostních vlastností a tudíž i bezpečnosti materiálu jsou kritickými hodnotami maximální hloubky korozního napadení, které zeslabují nosný průřez materiálu a tím i jeho pevnost. Maximální šířky korozního napadení s malou hloubkou jsou sice informací o velikosti korozního napadení, avšak oproti maximální hloubce korozního napadení jsou rozloženy na větší ploše a tím lokálně méně zeslabují nosný průřez materiálu. Pozornost je tedy soustředěna na maximální hodnoty hloubky korozního napadení, které jsou označovány jako kritické, ale jsou zde uvedeny také maximální hodnoty šířky korozního napadení.

Po naměření kvantitativních údajů a jejich matematickém zpracování uvedených v kapitole 8.4 byla nalezena kritická místa konstrukce o těchto maximálních hodnotách hloubky a šířky napadení:

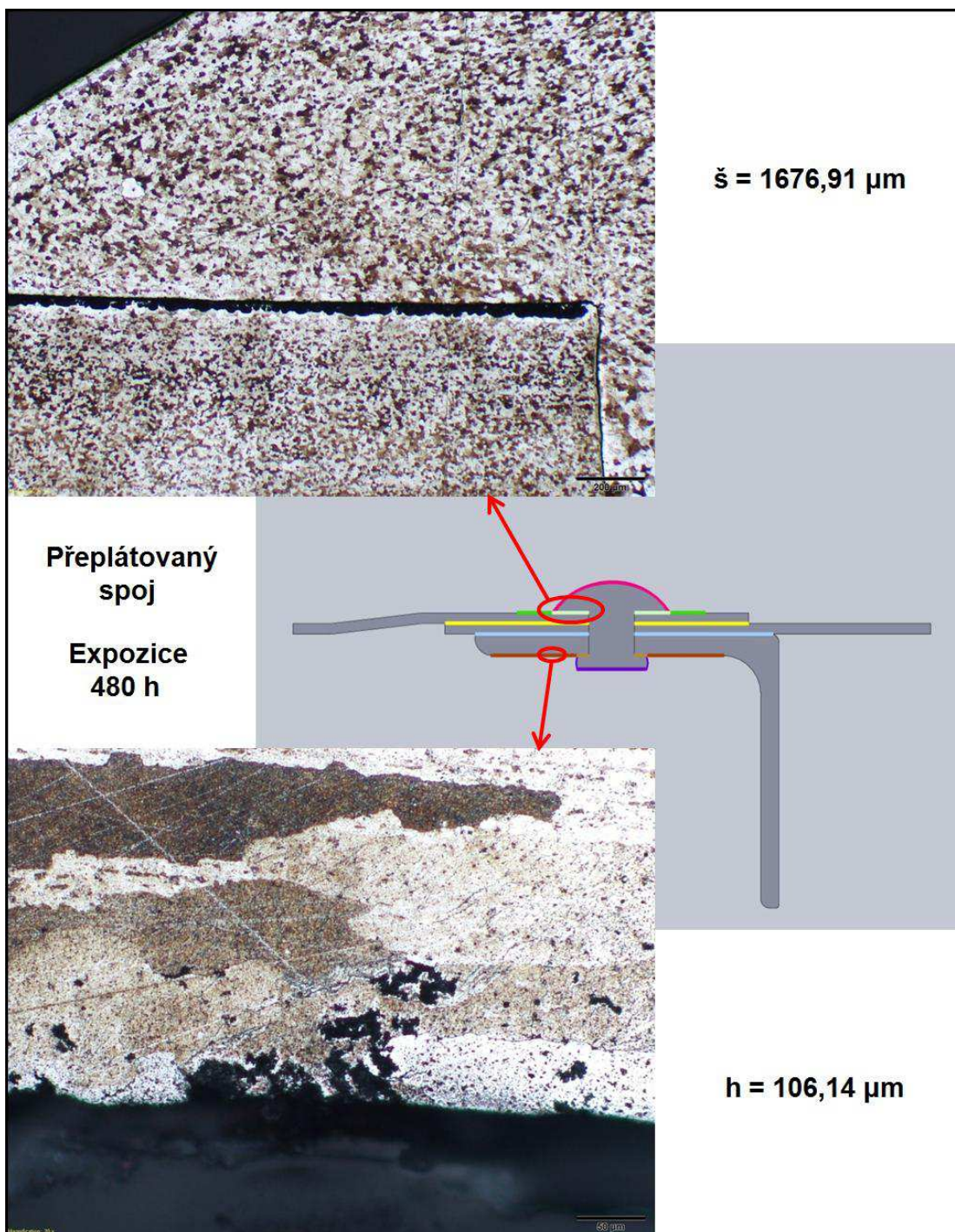
1. U nepřelátovaného spoje po expozici 480 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla nalezena maximální hloubka napadení hloubka  $h = 64 \mu\text{m}$  směrem do povrchu úhelníku pro kontakt mezi úhelníkem a patou nýtu a maximální šířka napadení šířka  $\check{s} = 1262 \mu\text{m}$  směrem do povrchu plechu *PI* pro kontakt mezi hlavou nýtu a plechem *PI* (obr. 9.1),
2. U nepřelátovaného spoje po expozici 1000 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla nalezena maximální hloubka napadení hloubka  $h = 88 \mu\text{m}$  mimo kontakt na volném povrchu plechu *PI* a maximální šířka napadení šířka  $\check{s} = 1854 \mu\text{m}$  směrem do povrchu úhelníku pro kontakt mezi plechem *PI* a úhelníkem (obr. 9.2),
3. U přelátovaného spoje po expozici 480 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla nalezena maximální hloubka napadení hloubka  $h = 106 \mu\text{m}$  na volném povrchu úhelníku a maximální šířka napadení šířka  $\check{s} = 1677 \mu\text{m}$  směrem do povrchu plechu *PI* pro kontakt mezi hlavou nýtu a plechem *P1* (obr. 9.3),
4. U přelátovaného spoje po expozici 1000 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla nalezena maximální hloubka napadení hloubka  $h = 83 \mu\text{m}$  na hlavě nýtu a maximální šířka napadení šířka  $\check{s} = 1286 \mu\text{m}$  směrem do povrchu úhelníku pro kontakt mezi plechem *P2* a úhelníkem (obr. 9.4).



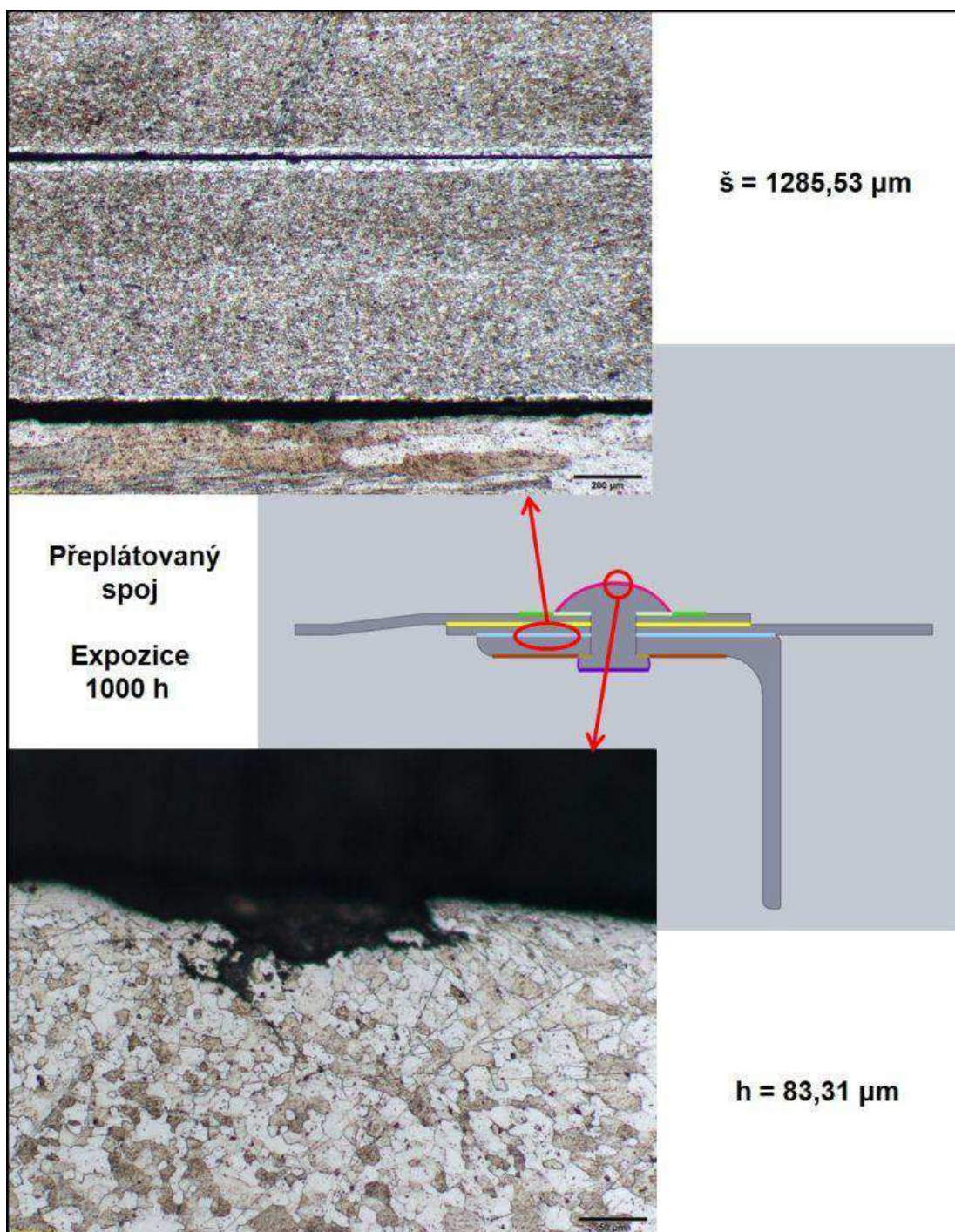
*Obr. 9.1 Maximální hloubka a šířka korozního napadení pro nepřekládaný spoj po expozici 480 hodin*



*Obr. 9.2 Maximální hloubka a šířka korozního napadení pro nepřeklátovaný spoj po expozici 1000 hodin*



*Obr. 9.3 Maximální hloubka a šířka korozního napadení pro překlátovaný spoj po expozici 480 hodin*



*Obr. 9.4 Maximální hloubka a šířka korozního napadení pro překlátovaný spoj po expozici 1000 hodin*

### ***Průměrné hodnoty hloubky a šířky korozního napadení***

Pro nepřepřátovaný spoj po expozici 480 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla zjištěna maximální průměrná hloubka napadení hloubka  $h = 64 \mu\text{m}$  směrem do povrchu úhelníku pro kontakt mezi úhelníkem a patou nýtu, která je rovněž maximální hloubkou napadení a maximální průměrná šířka napadení šířka  $\check{s} = 1144 \mu\text{m}$  směrem do povrchu plechu *P1* pro kontakt mezi hlavou nýtu a plechem *P1*.

Pro nepřepřátovaný spoj po expozici 1000 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla zjištěna maximální průměrná hloubka napadení hloubka  $h = 88 \mu\text{m}$  mimo kontakt na volném povrchu plechu *P1*, která je rovněž maximální hloubkou napadení a maximální průměrná šířka napadení šířka  $\check{s} = 785 \mu\text{m}$  na volném povrchu úhelníku.

Pro přepřátovaný spoj po expozici 480 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla zjištěna maximální průměrná hloubka napadení hloubka  $h = 100 \mu\text{m}$  na patě nýtu a maximální průměrná šířka napadení šířka  $\check{s} = 1451 \mu\text{m}$  směrem do povrchu plechu *P1* pro kontakt mezi hlavou nýtu a plechem *P1*.

Pro přepřátovaný spoj po expozici 1000 hodin byla po zaokrouhlení na celá čísla zjištěna maximální průměrná hloubka napadení hloubka  $h = 83 \mu\text{m}$  na hlavě nýtu, která je rovněž maximální hloubkou napadení a maximální průměrná šířka napadení šířka  $\check{s} = 526 \mu\text{m}$  směrem do povrchu plechu *P1* pro kontakt mezi plechem *P1* a plechem *P2*.

### ***Vyhodnocení typu korozního napadení***

Ve všech styčných plochách materiálů, ať už mezi hlavou nýtu a plechem, mezi plechy nebo mezi plechem a úhelníkem, se vyskytovala štěrbinová koroze. V případě výskytu korozního napadení plechů potažených hliníkovou vrstvou s dalšími materiály docházelo současně k částečnému i k úplnému zkorodování celé hliníkové vrstvy štěrbinovou či důlkovou korozi. Na volných površích plechů a úhelníku docházelo k důlkové a nerovnoměrné korozi, v případě nýtů ke korozi důlkové.

## 10. ZÁVĚRY

Z výsledků provedených experimentů bylo možno vyslovit následující závěry:

- K největšímu zeslabení nosného průřezu materiálu pro nepřepátovaný spoj po expozici 480 hodin došlo na kontaktu mezi úhelníkem a patou nýtu směrem do povrchu úhelníku. Pro tentýž spoj po expozici 1000 hodin došlo k tomuto zeslabení mimo kontakt na volném povrchu plechu *PI*.
- K největšímu zeslabení nosného průřezu materiálu pro přepátovaný spoj po expozici 480 hodin došlo na volném povrchu úhelníku. Pro tentýž spoj po expozici 1000 hodin došlo k tomuto zeslabení na hlavě nýtu.
- Jedny z největších hodnot hloubek korozních napadení byly v několika případech korozní napadení v materiálu nýtů, nikoliv v materiálu plechů či úhelníku. Otázkou je vhodnost materiálu spojovacích nýtů. Možnost jejich změny však není možná, protože jiné materiály nýtů se v leteckých konstrukcích nepoužívají.
- Druhým nejvíce korozně napadeným materiálem byl úhelník, u kterého došlo ke korozi na obou plochách. Je to způsobeno pravděpodobně tím, že materiál úhelníku AlCuMg není povlakován vrstvou hliníku o čistotě 99,5 %, který by tvořil ochranu proti korozi, jak je tomu u materiálu plechů.
- V mnoha případech byla hloubka korozního napadení plechů větší než 30  $\mu\text{m}$ . Došlo tedy k úplnému zkorodování celé hliníkové vrstvy na potahovém plechu až do základního materiálu AlCu4Mg1, který je korozně méně odolný. Hrozí tudíž rychlejší šíření korozního napadení a tím i větší poškození konstrukce.
- V místě kontaktu mezi hlavou nýtu a plechem *PI* dochází převážně ke koroznímu napadení plechu z materiálu AlCu4Mg1 opatřeného hliníkovou vrstvou, místo do hlavy nýtu z materiálu AlCu4Mn bez ochranné vrstvy, případně dochází přibližně ke stejnému koroznímu napadení obou materiálů.
- Provedený experiment nepotvrdil kumulativní nárůst korozního napadení. Místa největšího korozního napadení po expozici 480 hodin nebyla stejná jako nejvíce napadená místa po expozici 1000 hodin.
- Vyhodnocením typu korozního napadení byly zjištěny tři druhy korozního napadení. Ve styčných plochách všech materiálů docházelo ke štěrbinové a důlkové korozi, na volných plochách plechů a úhelníku k důlkové a nerovnoměrné korozi a v případě nýtů ke korozi důlkové.

## 11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A., a kol., Encyklopedie hliníku, Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4.
- [2] ROBERGE, R. PIEREE, Handbook of corrosion engineering, USA: McGraw-Hill, 1999, 1129 s, ISBN 0-07-076516-2.
- [3] ČERNÝ, M. a kol., Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů, 1. vydání, Praha SNTL, 1984, 264 s, DT 620.193:669.018.
- [4] BARTONÍČEK, R. a kol., Koroze a protikorozi ochrana kovů, 1. vydání, Praha: Academia, 1966, 720 s.
- [5] TULKA, J. Povrchové úpravy materiálů. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 136 s. ISBN 80-214-3062-1.
- [6] ČSN EN ISO 9227 (03 8132): Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Praha, Český normalizační institut, 2007. 24 s.
- [7] ČALKOVSKÝ, A., PÁVEK, J., DANĚK, V., Konstrukce a pevnost letadel, 1. vydání, 1984, tisk VA AZ, Pořadové číslo tisku U-1165/I.
- [8] Hliník a jeho slitiny, dostupné na: [http://www.benjamin.ic.cz/hlinik\\_slitiny.pdf](http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf).
- [9] PTÁČEK, L. a kolektiv, Nauka o materiálu II., Brno: CERM, 1999. 350 s. ISBN 80 – 7204 – 130 – 4.
- [10] ČSN 42 0055 (42 0055): Neželezné kovy. Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů. Praha, Český normalizační institut, 1977. 12 s.
- [11] Koroze a ochrana materiálů, Učební text určený pro prezenční studium, Fakulta výrobních technologií a managementu Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, [PDF dokument]. Ústí nad Labem. [cit. 2010-12-27]. [http://www.stefanmichna.com/download/opory/koroze\\_a\\_ochrana\\_materialu.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/opory/koroze_a_ochrana_materialu.pdf).
- [12] GRÖBNER, P., Koroze ocelí a litin v plynném prostředí za vysokých teplot, svazek 9. Praha: SNTL, 1964. 224 s. DT 620.193.01.
- [13] Nekovové anorganické povlaky pro součásti vojenské techniky, Český obranný standard, Vojenský technický ústav ochrany Brno, 2005, 86 s.
- [14] ČSN ISO 7384 (03 8120): Korozní zkoušky v umělé atmosféře. Všeobecné požadavky. Praha, Český normalizační institut, 1994. 8 s.
- [15] UK MKI, Korozní inženýrství, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [online]. [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni\\_inzenyrstvi\\_se/index.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/index.htm).

## 12. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČSN	česká technická norma
ČSN EN	evropská technická norma
$R_m$	mez pevnosti [MPa]
$A$	tažnost [%]
$a$	parametr mřížky
HB	tvrdost podle Brinella
$K_C$	součinitel lomové houževnatosti [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ]
FCC	kubická plošně středěná mřížka
GP zóny	Guiner-Prestonovy zóny
pH	záporný dekadický logaritmus molární koncentrace rozpuštěných hydroniových iontů
$\text{Al}_2\text{O}_3$	oxid hlinitý
HCl	kyselina chlorovodíková
NaCl	chlorid sodný
$\text{H}_2\text{SO}_4$	kyselina sírová
$\text{CO}_2$	oxid uhličitý
$\text{H}_2\text{S}$	sulfan (sirovodík)
OP-S	koloidní roztok $\text{SiO}_2$
FUSS	hliníkový substrát (7,5 ml HF, 8 ml $\text{HNO}_3$ , 25 ml HCl a 1000 ml $\text{H}_2\text{O}$ )
$t$	čas [h]

## **13. SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha 1:** Obrazová dokumentace korozního napadení pro nepřepřátovaný spoj po expozici 480 hodin.

**Příloha 2:** Obrazová dokumentace korozního napadení pro nepřepřátovaný spoj po expozici 1000 hodin.

**Příloha 3:** Obrazová dokumentace korozního napadení pro přepřátovaný spoj po expozici 480 hodin.

**Příloha 4:** Obrazová dokumentace korozního napadení pro přepřátovaný spoj po expozici 1000 hodin.