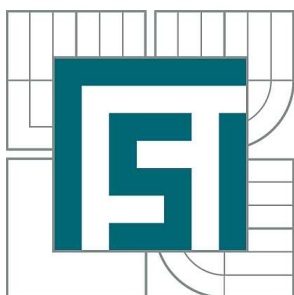


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

STUDIUM KOROZE PANELU LETADLA V MÍSTĚ BODOVÝCH SVARŮ V PROSTŘEDÍ SOLNÉ MLHY

THE CORROSION STUDY OF PART AIRCRAFT AT THE SITE OF SPOT WELDS IN THE SALT
SPRAY ENVIRONMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

EVA NĚMČÍKOVÁ

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): Eva Němčíková

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 panelu letadla v místě bodových svarů v prostředí solné mlhy

v anglickém jazyce:

The corrosion study of part aircraft at the site of spot welds in the salt spray environment

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá kvalitativním i kvantitativním posouzením korozního děje v prostředí solné mlhy v místech bodového svaru 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 bodových svarů.

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. Ivó Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu




prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na studium koroze svarových spojů panelu letadla v prostředí solné mlhy. Panel se skládá z plechů vyrobených z hliníkové slitiny AlCu4Mg1, které jsou na povrchu opatřeny vrstvou hliníku o čistotě 99,5 % a z úhelníků slitiny AlCu4Mg1 bez povrchové ochranné vrstvy, které tvoří výztuhu.

V průběhu experimentu byly sledovány parametry korozního napadení v místech bodových svarů a v oblastech styčných ploch mezi nimi. V práci je uvedeno vyhodnocení typu koroze, četnosti výskytu a rozsahu korozního napadení. Po vyhodnocení získaných experimentálních údajů byla určena kritická místa konstrukčního uzlu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hliník, slitiny hliníku, koroze, korozní napadení, kritická místa konstrukce.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on the corrosion study of part aircraft at the site of spot welds in the salt spray environment. The panel is made of sheet of aluminium alloy AlCu4Mg1, with surface coated with aluminium of purity 99,5 %, and of square shapes of alloy AlCu4Mg1, without coating. Square shapes are an angle cleat.

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

KEY WORDS

Aluminium, aluminium alloys, corrosion, corrosive attack, critical places of construction.

NĚMČÍKOVÁ, E. *Studium koroze panelu letadla v místě bodových svarů v prostředí solné mlhy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 109 s.
Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně dle pokynů vedoucího bakalářské práce a použila jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne

Eva Němčíková

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Bohumilu Pacalovi, CSc. za ochotu a věcné připomínky, které mi během zpracování mé práce poskytoval.

Také bych chtěla poděkovat paní Ing. Evě Novotné Ph.D., Paed IGIP, panu Ing. Pavlu Doležalovi, paní Ing. Lence Klakurkové, Ph.D. a panu Ing. Pavlu Gejdošovi a Marku Ječmínkovi za trpělivost, ochotu, pomoc a věcné připomínky v průběhu experimentu.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. HLINÍK A JEHO SLITINY	11
2.1 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin	11
2.2 Technologické vlastnosti hliníku	13
2.3 Chemické vlastnosti hliníku a jeho odolnost proti korozi	15
2.4 Rozdělení slitin hliníku	15
2.5 Značení slitin hliníku	16
2.6 Tepelné zpracování slitin hliníku	17
3. KOROZE KOVŮ A JEJICH SLITIN	19
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	19
3.3.1 Atmosférická koroze	20
3.3.2 Koroze ve vodě	20
3.3.3 Koroze v půdách	20
3.3.4 Koroze v roztocích solí	20
3.4 Druhy korozního napadení	20
3.5 Hlavní činitelé ovlivňující korozi	23
3.6 Volba ochrany proti korozi	24
4. KOROZE HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN	26
4.1 Korozní charakteristika	26
4.2 Mechanismus koroze	26
4.2.1 Destabilizace vrstvy oxidů	26
4.2.2 Vznik mikrogalvanického článku	26
4.3 Vliv chemického složení	27
4.3.1 Slitiny neobsahující měď	27
4.3.2 Slitiny obsahující měď	27
4.4 Vliv koroze na mechanické vlastnosti	27
4.5 Protikorozní ochrany hliníkových slitin	27
5. METODIKA ZKOUŠENÍ KOROZE	29
6. HODNOCENÍ KOROZE	30
6.1 Zkoušky v laboratoři	30
6.2 Zkoušky v provozu	30
7. CÍLE PRÁCE	31
8. EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL	32
9. METODIKA EXPERIMENTU	33
9.1 Korozní znehodnocení experimentálního materiálu	33
9.2 Rozřezání panelu a výroba metalografických vzorků	33
9.3 Hodnocení korozního napadení	36
9.3.1 Systém značení vzorků	36
9.3.2 Systém označování kontrolovaných povrchů	36
9.3.3 Metodika hodnocení korozního napadení	39

9.3.4	Tabulky experimentálně zjištěných hodnot	39
9.3.5	Souhrn průměrných a maximálních hodnot korozního napadení	46
10.	DISKUZE VÝSLEDKŮ	48
10.1	Maximální rozsah korozního napadení konstrukčních uzlů	48
10.1.1	Maximální šířky napadených míst	48
10.1.2	Maximální hloubky napadených míst	48
10.2	Průměrné hodnoty korozního napadení konstrukčních uzlů	52
10.2.1	Průměrné šířky napadených míst	52
10.2.2	Průměrné hloubky napadených míst	52
10.3.	Hodnocení typu korozního napadení	53
11.	ZÁVĚR	54
12.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
13.	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
14.	SEZNAM PŘÍLOH	58

1. ÚVOD

Hliníkové slitiny dobře kombinují technologické, mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Jsou často používány pro dobrou pevnost v tahu, tažnost, hustotu, tvárnost, svařitelnost (v ochranné atmosféře), zpracovatelnost a korozní odolnost. Hliník a jeho slitiny mají poměrně nízkou teplotu tání [1].

Hliník je zdravotně nezávadný, což umožňuje jeho použití v různých oblastech našeho života. Má výbornou elektrickou vodivost. Na vzduchu je poměrně stálý, protože se pasivuje tenkou vrstvičkou Al_2O_3 , která zabraňuje pronikání kyslíku ke kovu. Hliník je poměrně lehký a levný. Ve srovnání s oceli však mají jeho slitiny mnohem nižší pevnostní charakteristiky.

Komerčně se začal využívat přibližně před sto lety. V počátcích jeho výroby byl velmi drahý, a proto se využíval převážně v klenotnictví. S jeho rostoucí výrobou však cena klesla a rozšířila se také oblast jeho použití. V dnešní době se hliník a jeho slitiny vyskytují především v dopravě, kde tvoří asi 60% výroby (v automobilovém průmyslu je využíván na výrobu skříní motorů, hlavy válců, profily pro výplně dveří, pouzdra tlumičů, hnací komponenty, části klimatizace, hlavice řadicí páky, hliníkové volanty, někdy i celé karoserie; v leteckém průmyslu; v kolejové dopravě; v lodním průmyslu; v kosmonautice). Dále se hliník a jeho slitiny využívají ve stavitelství, strojírenství, hutnictví, energetice, elektrotechnice, potravinářském průmyslu, chemickém průmyslu, sportu, klenotnictví a v dalších odvětvích [1].

Světová produkce hliníku roste, zejména díky jeho spotřebě v oblasti automobilového a leteckého průmyslu, kde je využívána jak jeho nízká cena, tak jeho nízká hmotnost. Pomocí nahrazení oceli hliníkem a jeho slitinami se sníží váha celé konstrukce, čímž klesnou emise a spotřeba paliva [1].

Ale aby bylo použití hliníku a jeho slitin nadále výhodné, musí se brát v úvahu také koroze použitých materiálů a snažit se jí zabránit nebo ji alespoň zpomalit. Proto je nutná aplikace materiálů odolných proti korozi nebo povlaků proti korozi chránících, protože množství zkorodovaného materiálu odpovídá 3 až 5% HDP vyspělých států. Použití těchto materiálů sníží celkovou cenu přibližně o jednu třetinu [2].

Použití korozivzdorných materiálů nebo povlaků je důležité nejen z hlediska ekonomického, protože výběr vhodného materiálu může zachránit mnohé lidské životy. Aby nedošlo ke katastrofě, musí být všechny součásti strojů a zařízení se pravidelně kontrolovány. Také je potřeba se věnovat studiu koroze chemicky heterogenních materiálů [1].

V letectví je největší část celé konstrukce vyrobena právě z hliníku a jeho slitin, díky dobrým mechanickým vlastnostem při teplotách pod bodem mrazu a nízké hmotnosti. Existuje sice snaha nahradit některé hliníkové součásti materiály lehčími, jako je například hořčík nebo uhlíková či skleněná vlákna, hliník však nemůže být nahrazen v oblastech velkého namáhání, jako jsou trup a křídla letadla [1].

Na výrobu plechů a namáhaných součástí (trup a křídla letadla) jsou v letectví používány zejména tvářené slitiny mající lepší pevnostní vlastnosti. Např. AlMgSiCu (AA6013), AlMgSc , AlMgLi (1424) a AlCuMg_2 (AA 2024), které jsou spojovány nýtováním nebo svařováním. Mezi nejčastěji používané metody svařování patří bodové, laserové a třecí svařování. Některé součásti se vyrábějí do konečného tvaru protlačováním. Součásti ze slitin AlMgSiCu , AlMgSc nebo AlMgLi se vyrábějí protlačováním a svařují se třecím a laserovým svařováním (slitina AlMgSiCu svařená laserem byla poprvé použita na panel trupu letadla A318). Slitiny AlCuMg_2 jsou převážně nýtové nebo svařované [1].

2. HLINÍK A JEHO SLITINY

Hliník je třetí nejrozšířenější prvek v zemské kůře. Je stříbrně bílý a lesklý. Hliník má nízkou měrnou hmotnost (při 20°C má hustotu $2,6989 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), díky které ho řadíme mezi lehké kovy. Jeho dobrá elektrická a tepelná vodivost se využívá v oblasti elektroniky a elektrotechniky. Protože má kubickou plošně středěnou mřížku (FCC), má dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena, je paramagnetický. Teplota tavení čistého hliníku je $660,4 \text{ }^\circ\text{C}$ [1].

2.1 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin

Pevnostní vlastnosti jsou u čistého hliníku velmi nízké (ve vyžáhaném stavu má mez pevnosti $R_m = 40 - 50 \text{ MPa}$, tažnost $A = 70 - 90 \%$). Pevnost hliníkových slitin, která se pohybuje od 40 MPa (čistý hliník) až po 570 MPa (slitina AlZnMgCu1.5), se dá zlepšit deformačním, precipitačním (= vytvrzováním), substitučním nebo disperzním zpevněním. Tažnost hliníkových slitin je v rozmezí od 40 % (čistý hliník) po 6 % (slitina AlMn1Mg1) [1].

Pevnostní charakteristiky závisí jak na typu slitiny, tak na způsobu tepelného zpracování. U velkých odlitků, převážně u vytvrzovaných slitin, jsou pevnostní charakteristiky anizotropní a také nehomogenní v průřezu. Obecně platí, že se zvyšujícím se obsahem legujícího prvku roste pevnost slitin. Slévárenské slitiny mají horší pevnostní charakteristiky než slitiny tvářené, které mají homogennější strukturu, nevyskytují se v nich póry a mají menší zrna [1].

Se zvyšující se teplotou klesá pevnost, zatímco tažnost a kontrakce rostou. Při výdrži na zvýšené teplotě může dojít ke změně struktury materiálu a pevnost zůstane snižena i při návratu na pokojovou teplotu, dojde k tzv. odpevňování [1].

Při teplotách pod bodem mrazu jsou vlastnosti hliníku dokonce lepší než za pokojových teplot. Při teplotě $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje čistý hliník meze pevnosti 170 MPa s tažností stále 40 % a slitiny Al – Zn – Mg – Cu meze pevnosti až 700 MPa při tažnosti 9 %. Tvrdost čistého hliníku je asi 15 HB, nejtvrďší slitiny jsou vytvrzené typu Al – Zn – Mg – Cu o tvrdosti až 140 HB [1].

Vlastnosti slitin hliníku můžeme ovlivnit legujícími prvky. Pevnostní vlastnosti se dají zlepšit legováním mědi (Cu) a hořčíkem (Mg). Chemické vlastnosti se zlepšují např. legováním stříbrem (Ag), čímž se zlepší odolnost proti elektrochemické korozi. Technologické vlastnosti jako např. slévateľnost příznivě ovlivní přísada křemíku (Si), svařitelnost přísada skandia (Sc). Fyzikální vlastnosti jako je např. elektrická vodivost čistého Al se zlepšuje legování borem (B) [1].

Vliv legujících prvků a příměsí na vlastnosti slitin hliníku

Železo (Fe) – běžná nečistota, vyskytuje se jako intermetalická fáze, u slitin Al – Cu vytváří sloučeninu Al_7FeCu_2 , která ochuzuje tuhý roztok α o měď, což snižuje pevnost. Disperzně vyloučené částice bohaté na Fe zabraňují růstu zrna. U slitin Al – Cu – Ni zvyšuje pevnostní charakteristiky za zvýšených teplot a odolnost proti creepu.

Měď (Cu) – vytvrzováním sice zvyšuje pevnostní charakteristiky, ale snižuje odolnost proti korozi.

Hořčík (Mg) – hlavní legující prvek u slitin série 5xxx (Al – Mg). Vyloučení precipitátů typu $\text{Mg}_5\text{Al}_{13}$ nebo $\text{Mg}_5\text{Al}_{18}$ na hranicích zrn způsobuje náchylnost slitin k interkystalickému

porušení a interkrystalické korozi. U slitin Al – Cu – Mg a Al – Mg – Si zvyšuje pevnostní charakteristiky.

Antimon (Sb) – zvyšuje odolnost proti korozi v mořské vodě, snižuje náchylnost slitin Al – Mg ke vzniku trhlin za tepla.

Chrom (Cr) – snižuje náchylnost k růstu zrn u slitin Al – Mg, zhoršuje proces rekrystalizace u slitin Al – Mg – Si a Al – Mg – Zn, u vytvrditelných slitin zlepšuje jejich kalitelnost.

Stříbro (Ag) – u slitin Al – Zn – Mg zvyšuje pevnostní charakteristiky a zvyšuje odolnost proti elektrochemické korozi.

Mangan (Mn) – hlavní legující prvek u slitin 3xxx (Al – Mn). Zvyšuje pevnostní charakteristiky, zvyšuje teploty rekrystalizace, zjemňuje zrno, pokud je vyloučen ve formě disperzních precipitátů, zabraňuje růstu zrna, zvyšuje citlivost ke kalení, potlačuje vylučování Fe ve formě destiček tvorbou intermetalických částic (Fe, Mn)Al₆.

Nikl (Ni) – u slitin Al – Cu a Al – Si se přidává pro zvýšení pevnostních charakteristik za zvýšených teplot, snížení koeficientu teplotní roztažnosti a zlepšení odolnosti proti korozi. U slitin pro jadernou energetiku je jeho přítomnost nežádoucí, protože dokáže pohltit velké množství neutronů.

Křemík (Si) – hlavní legující prvek slévarenských slitin Al – Si (siluminů), u slitin série 6xxx (Al – Si – Mg) tvoří precipitáty Mg₂Si, které umožňují vytvrzování.

Fosfor (P) – u slitin Al – Si se používá jako modifikátor.

Stroncium (Sr) – používá se jako modifikátor u slitin Al – Si.

Kobalt (Co) – u některých slitin na bázi Al – Si s přítomností Fe se přidává, aby fáze β změnila tvar z jehlic na kouli, tím se zvýší pevnost a plastické vlastnosti.

Cín (Sn) – hlavní legující prvek u slitin Al – Sn (ložiskové slitiny). U slitin jeho koncentrace do 0,05 % zrychluje proces stárnutí za vyšších teplot a zvyšuje pevnost, koncentrace nad 0,05 % způsobuje vznik trhlin za tepla a snižuje odolnost proti korozi.

Bor (B) – zjemňuje strukturu, zvyšuje elektrickou vodivost čistého hliníku.

Titan (Ti) – přidává se spolu s borem pro zjemnění struktury tvorbou jemných intermetalických částic TiB₂ v průběhu krystalizace.

Bismut (Bi) – zlepšuje obrobitelnost.

Indium (In) – jeho malé množství zrychluje proces stárnutí u slitin Al – Cu.

Olovo (Pb) – toxické, zlepšuje obrobitelnost, pokud u slitin Al – Cu – Mg dojde k jeho vyloučení při krystalizaci, může vyvolat vznik trhlin za tepla.

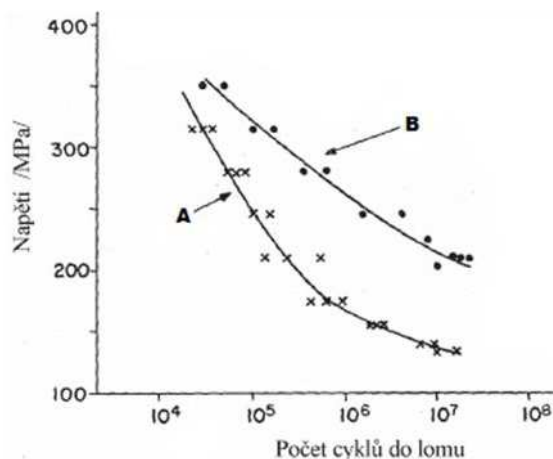
Lithium (Li) – se přidává např. do slitin Al – Cu – Mg – Li, ve kterých se pak tvoří koherentní precipitáty LiAl₃ zvyšující pevnost a modul pružnosti v tahu (E). Má nízkou měrnou hmotnost, proto jsou jím legovány tzv. „lehčí“ slitiny.

Zinek (Zn) – legující prvek slitin série 7xxx (Al – Zn). Spolu s hořčíkem vytváří intermetalickou sloučeninu MgZn₂.

Zirkonium (Zr) – tvoří jemné precipitáty, které blokují procesy zotavení a rekrystalizace, přidává se do slitin Al – Zn – Mg, za účelem získání jemné struktury u odlitků. U slitin s efektem superplasticity se přidává pro udržení jemnozrné struktury [1].

Únavové vlastnosti slitin hliníku

Obecně je horní mez únavy hliníkových slitin 10^8 cyklů. Mez únavy se zvyšuje např. zvýšením čistoty výchozího hliníku. Snížením obsahu železa a křemíku se dá výrazně zlepšit únavové vlastnosti hliníkových slitin. Na obr. 2.1. lze vidět vliv těchto prvků na slitinu AlZn6MgCu, kde slitina A obsahuje méně než 0,9 % Fe + Si a slitina B méně než 0,22 % Fe + Si, při vysokocyklové únavě. Snížení obsahu Fe a Si má pozitivní vliv, jak na únavové chování materiálu, tak na lomové chování a parametry šíření únavové trhliny. Takto vysoká čistota materiálu je požadována zejména v leteckém průmyslu. Kromě mikročistoty a tahových pnutí na únavové chování slitin hliníku také působí spoje (nýtované, šroubové i svarové) [1].



Obr. 2.1 Vliv obsahu Fe a Si na vysokocyklovou únavu slitiny AlZn6MgCu [1]

Lomové vlastnosti slitin hliníku

Lomová houževnatost slitin hliníku silně závisí na chemickém složení slitin a na podmínkách jejich zatěžování. Hliníkové slitiny nízké pevnosti mají součinitel lomové houževnatosti $K_C = 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ s kritickou délkou trhliny $a_{kr(\sigma=\sigma_y)} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Hliníkové slitiny vysoké pevnosti mají součinitel lomové houževnatosti $K_C = 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ s kritickou délkou trhliny $a_{kr(\sigma=\sigma_y)} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ [3].

2.2 Technologické vlastnosti hliníku

K nejdůležitějším technologickým vlastnostem patří slévatelnost, obrobitelnost, svařitelnost a tvařitelnost. Tyto vlastnosti materiálu posuzujeme podle speciálních technologických zkoušek [1].

Svařitelnost hliníkových slitin

Svařování je základní metodou spojování hliníkových slitin. Svarový spoj ovlivňuje únavové a mechanické vlastnosti a korozní odolnost. Metoda svařování a typ svařovaných materiálů ovlivňuje výslednou změnu struktury materiálu. Hliníkové slitiny jsou svařovány v ochranné atmosféře [1].

Nejčastější metody svařování používané zejména v letectví jsou bodové, laserové a třecí svařování.

1) Bodové svařování

Svarový spoj vzniká po zahřátí spojovaných materiálů teplem vznikajícím působením elektrického přechodového odporu a jejich následným přiblížením na vzdálenost působení meziatomových sil pomocí přitlačné síly. Při bodovém odporovém svařování nevzniká ve svarovém kovu lící struktura [4].

2) Laserové svařování

Použitím této techniky je docíleno přímého svarového švu. Díky nižší energii potřebné ke svařování se zmenší pokrivení svařovaného materiálu a také se zmenší tepelně ovlivněná oblast. Lze svařovat vysokou rychlostí [5].

3) Třecí svařování

Svařovaný materiál je ohříván třením a míchán rotujícím trnem. Výhodou tohoto způsobu svařování je teplota pod teplotou solidu, není nutný žádný přídavný materiál ani ochranná atmosféra, nevznikají trhliny za tepla, póry, distorze je minimální. Nevýhodou je, že tímto způsobem lze svařovat pouze jednoduché svary, převážně tupé spoje [6].

Obrobitelnost hliníkových slitin

Hliníkové slitiny jsou ve srovnání s oceli lépe obrobitelné, řezné rychlosti u hliníkových slitin jsou mnohem menší než u ocelí stejné pevnosti. Obrobitelnost závisí na struktuře. Čistý hliník se dá obrábět obtížně, u jeho slitin je však obrobitelnost dobrá, a to vlivem precipitátů, měkkých částic, konstrukčních fází i stupně deformačního zpevnění [1].

Slitiny hliníku můžeme rozdělit do tří skupin v závislosti na možnosti obrábění na slévárenské, tvářené a automatové.

1) Slévárenské

Dobře obrobitelné jsou slitiny, jejichž hlavními legujícími prvky jsou měď, hořčík nebo zinek. Jejich obrobitelnost je obdobná jako u tvářených slitin. Opotřebení obráběcích nástrojů je mimo jiné dána velikostí zrn obrobku. Jemnozrnné struktury opotřebovávají obráběcí nástroje méně. Může docházet k nalepování materiálu na obráběcí nože, což také vede k jejich opotřebení [1].

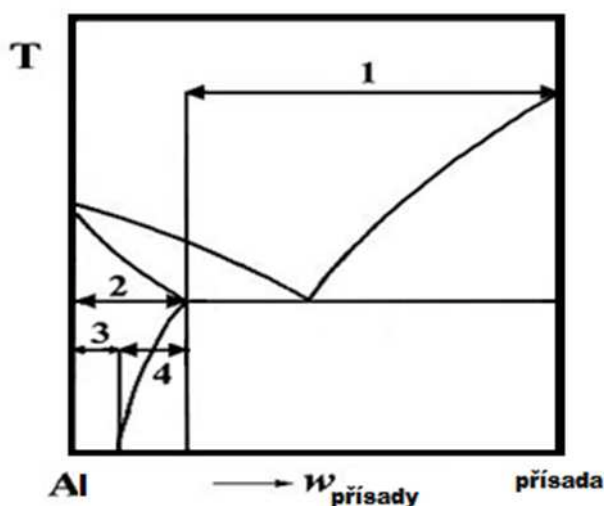
2) Tvářené

Obrobitelnost tvářených slitin se zlepšuje tvářením za studena. Vytvrzené slitiny mají velmi dobrou obrobitelnost, tvoří dlouhou stočenou třísku, která se u některých slitin velmi dobře láme. Špatnou obrobitelnost mají slitiny nevytvrzené, stejně jako nevytvrditelné, u kterých se tvoří dlouhá nelámavá tříška, jež se musí odstraňovat [1].

3) Automatové (speciálně určené pro obrábění) [1]

Slévateľnost hliníkových slitin

Teplota tavení většiny slitin klesá s rostoucím obsahem přísady. Výjimku tvoří např. titan a zirkonium, jejichž přidáním teplota tavení roste spolu s jejich obsahem [1].



Obr. 2.2 Binární diagram Al – přísada [1]

1 - slévárenské slitiny, 2 - slitiny ke tváření, 3 - nevytvrditelné slitiny, 4 – precipitačně vytvrditelné slitiny

Tvařitelnost hliníkových slitin

U hliníkových slitin je požadována dobrá tvařitelnost za tepla i za studena. Podle toho, zda můžeme zvýšit jejich pevnost tepelným zpracováním, se dělí na slitiny precipitačně vytvrditelné a slitiny nevytvrditelné, jak je vidět na obr. 2.2 [1].

2.3 Chemické vlastnosti hliníku a jeho odolnost proti korozi

Hliník je neušlechtilý kov, který v roztoku tvoří ionty Al^{3+} . Afinita hliníku ke kyslíku se využívá k redukci při výrobě některých kovů. Na vzduchu se pokrývá vrstvou Al_2O_3 , jež lze dále zvětšovat eloxováním, dojde tak ke zvýšení ochrany a zvýší se tvrdost povrchu. Díky povrchové vrstvičce je hliník stabilní i ve vodě. Oxid hlinitý je polymorfní a vyskytuje se ve dvou různých modifikacích ($\alpha-Al_2O_3$ = korund, $\gamma-Al_2O_3$) [1].

2.4 Rozdělení slitin hliníku

Slitiny hliníku se dělí podle:

- 1) způsobu dalšího zpracování
- 2) chemického složení
- 3) mechanických vlastností a použití

Podle způsobu výroby se dělí na slévárenské slitiny a slitiny ke tváření. Slitiny určené ke tváření se dělí na slitiny precipitačně vytvrditelné a slitiny nevytvrditelné, jak je již uvedeno výše. Rozdělení je znázorněno na obr. 2.2 [1].

Vlastnosti slitin hliníku ke tváření

Slitiny Al – Cu a Al – Cu – Mg (duraly) mají velmi nízkou korozní odolnost, jsou náchylné k interkrystalické korozi, proto jsou pokrývány vrstvou čistého Al nebo slitinami na bázi Al – Si – Mg. Dají se precipitačně vytvrzovat. Tento proces velmi zvýší jejich pevnostní charakteristiky, ale dojde ke snížení charakteristik deformačních [1].

Slitiny Al – Mn se nedají tepelně zpracovávat. Pokud obsahují do 1,5 % Mn, mají asi o pětinu lepší pevnostní vlastnosti než čistý hliník. Používají se jako výměníky tepla a v architektuře. Slitiny Al – Mg zpevňují matici lépe než slitiny Al – Mn, protože 0,8 % Mg nahradí 1,25 % Mn. Tyto slitiny se používají v potravinářském průmyslu, v lodní dopravě, architektuře a zařízeních pro kryogenní techniku [1].

Slitiny Al – Si většinou nejsou tepelně zpracované a při obsahu Si do 12 % se používají jako svářecí dráty [1].

Slitiny Al – Mg – Si se dají tepelně zpracovávat díky intermetalické fázi Mg_2Si , na jejímž množství závisí pevnostní vlastnosti. Tyto slitiny jsou samokalitelné, mají velmi dobrou korozní odolnost, svařitelnost, dají se velmi dobře tvářet a jsou obrobitelné při středních pevnostních vlastnostech. Používají se jako části mostních konstrukcí, v architektuře, jako rámy jízdních kol v oblasti sportu apod. [1].

Slitiny Al – Zn obsahující 1-8 % Zn a také Mg mají po tepelném zpracování nejlepší pevnostní vlastnosti ze všech hliníkových slitin. Dosáhnou-li svých nejlepších pevnostních vlastností, mají velmi špatnou odolnost proti korozi. Korozní odolnost můžeme zvýšit přestárnutím, sníží se tak ale pevnostní vlastnosti. Využívají se především v letectví a automobilovém průmyslu [1].

Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny hliníku dělíme do šesti základních skupin podle obsahu legujícího prvku nebo legujících prvků. Rozlišujeme slitiny typu Al – Cu, Al – Cu – Si, Al – Si, Al – Mg, Al – Zn – Mg a slitiny typu Al – Sn [1].

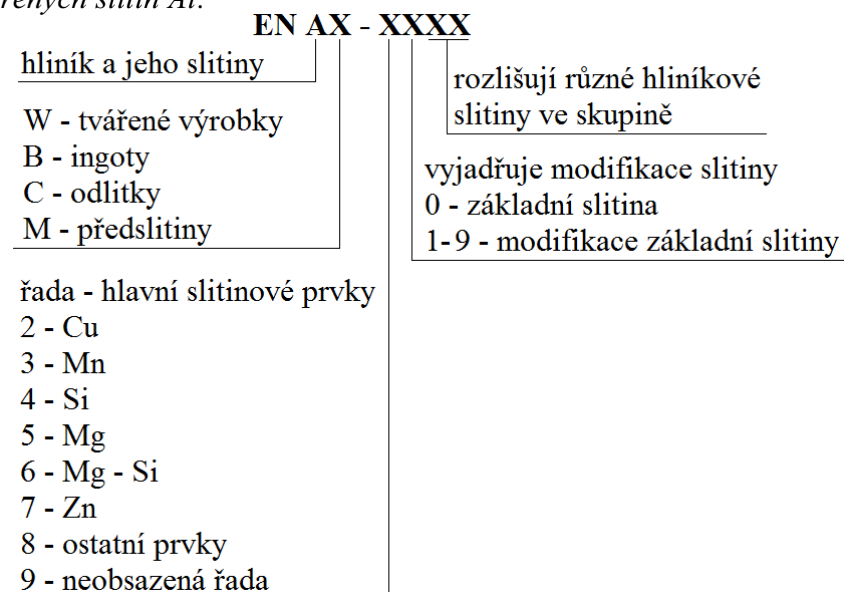
2.5 Značení slitin hliníku

V současné době jsou slitiny hliníku značeny českou normou ČSN 42 0055 nebo evropskou ČSN EN 573-1, která má v praxi přednost. V české normě je za označením ČSN 6 číslic, evropská ČSN EN obsahuje 4 až 5 číslic. Číselné označení může být doplněno chemickým označením, které se skládá s chemických značek, za nimi jsou číslice, které značí buď čistotu hliníku, nebo jmenovitý obsah daného prvku [6, 7].

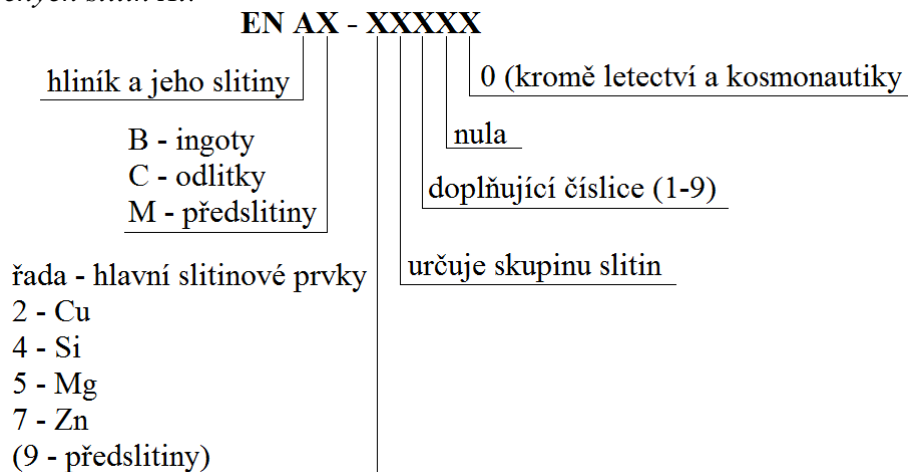
Značení hliníku a jeho slitin podle normy ČSN EN 573-1

Norma stanovuje označování písmeny EN Ax a čtyřmi (u tvářených materiálů) nebo pěti číslicemi (u netvářených materiálů). Tato číselná značka může být doplněna chemickým značením [6].

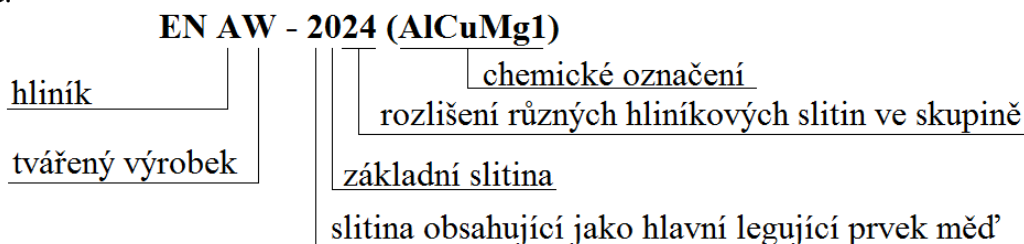
System značení tvářených slitin Al:



System značení netvářených slitin Al:



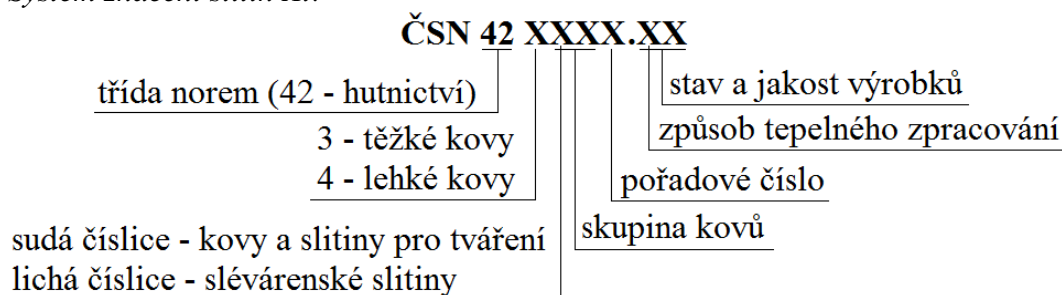
Příklad:



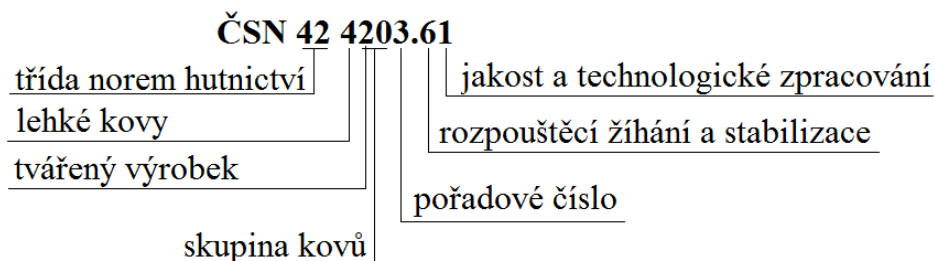
Značení hliníku a jeho slitin podle normy ČSN 42 0055

Norma stanovuje označování písmeny ČSN a 6 číslicemi [7].

Systém značení slitin Al:



Příklad:



2.6 Tepelné zpracování slitin hliníku

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

- 1) Žíhání
- 2) Vytvrzování [I]

Základní způsoby žíhání hliníku a jeho slitin

K základním způsobům žíhání hliníku a jeho slitin patří:

- 1) Rekrytalizační – probíhá při teplotách 250 – 500 °C
- 2) Stabilizační – teplota se obvykle pohybuje mezi 240 – 350 °C
- 3) Ke snížení pnutí – žíhací teploty se pohybují v rozmezí 300 – 400 °C, následné řízené ochlazování probíhá do teploty 200 °C
- 4) S částečnou rekrytalizací – teploty v rozmezí 250 – 500 °C
- 5) Homogenizační – při teplotách těsně pod solidem [I]

Rekrytalizační žihání

Dochází ke snížení pevnostních charakteristik a zvýšení deformačních charakteristik materiálu, který je takto tepelně zpracováván. Výška rekrytalizační teploty je volena podle velikosti deformace za studena (čím větší je deformace, tím nižší je rekrytalizační teplota) a chemického složení slitiny. Nevytvrditelné slitiny mohou být ochlazovány na vzduchu, vytvrditelné musí být ochlazovány pomaleji, aby nevznikl přesycený tuhý roztok a následně zvýšení mechanických vlastností precipitací [1].

Stabilizační žihání

Stabilizační teplota je nižší než teplota, při které má daný materiál pracovat. Stabilizace se nejčastěji provádí u výrobků, které mají pracovat za zvýšené teploty, nebo se při jejich práci teplota zvyšuje. Stabilizačním žiháním se docílí stabilizace struktury materiálu, jeho mechanických, fyzikálních a chemických vlastností a také rozměrů daného výrobku. Nejčastěji se používá odlitků [1].

Žihání s částečnou rekrytalizací

Teploty jsou stejné jako teploty rekrytalizačního žihání, ale doba žihání musí být kratší, aby nedošlo k úplné rekrytalizaci [1].

Homogenizační žihání

U hliníkových slitin se používá dvoustupňová homogenizace, při které proběhnou dvě homogenizační žihání za sebou. Výsledkem je optimální struktura pro tváření.

Procesy homogenizačního žihání:

- 1) rozpuštění nerovnovážných eutektik v matici α ,
- 2) rozpuštění nerovnovážných intermetalických fází v matici α ,
- 3) koagulace rovnovážných intermetalických fází,
- 4) precipitace nerovnovážných intermetalických fází při ochlazování z matrice α a získání částečně přesyceného tuhého roztoku α [1].

Precipitační vytvrzování

Precipitačně vytvrditelné jsou pouze ty slitiny hliníku, jejichž koncentrace leží pod křivkou změny rozpustnosti přísady v hliníku v tuhém stavu. Nejprve proběhne rozpouštěcí žihání slitiny (ohřátí na teplotu nad křivkou změny rozpustnosti v tuhém stavu) a pak její prudké ochlazení. Tímto způsobem vznikne nerovnovážný tuhý roztok přísady v hliníku. Precipitační vytvrzování vede k tvorbě termodynamicky stabilních precipitátů, které mají nižší entalpii než původní tuhý roztok [1].

Postup precipitačního vytvrzování:

- 1) Tvorba Guinier – Prestonových zón (GP zón)
- 2) Tvorba koherentních nebo semikoherentních precipitátů
- 3) Tvorba nekoherentních precipitátů, které mají nejmenší entalpii

Precipitační zpevnění v závislosti na legujícím prvku je v tabulce 2.6.1. [1].

Tab. 2.6.1. – Precipitační zpevnění v závislosti na legujícím prvku [1]

Legující prvek	Stabilní precipitát
Cu	$\Theta = \text{Al}_2\text{Cu}$
Ag	$\gamma = \text{Ag}_2\text{Al}$
Mg, Si	$\beta = \text{Mg}_2\text{Si}$
Mg, Cu	$S = \text{Al}_2\text{CuMg}$
Mg, Zn	$M = \text{Mg}_2\text{Zn}$

3. KOROZE KOVŮ A JEJICH SLITIN

3.1 Definice koroze

Koroze je chemický nebo fyzikálně chemický pochod vedoucí k porušování materiálu. Důsledkem korozního působení je úbytek materiálu, který vede ke zhoršení mechanických vlastností materiálu. Při současném působení fyzikálních (mezi fyzikální vlivy patří abraze, eroze či opotřebení) a chemických vlivů je korozní pochod agresivnější a jeho důsledky jsou větší, než při působení těchto vlivů odděleně (např. působení abrazních a korozních činitelů v plynném prostředí za vysokých teplot, koroze při opotřebení, vibrační koroze...).

Na mechanismus koroze má vliv korozní prostředí včetně všech faktorů, které korozi ovlivňují kvalitativně nebo kvantitativně. Mezi tyto faktory patří tlak, teplota, relativní pohyb, abrazivní vlivy, mechanické namáhání či metalurgické faktory. Při analýze korozních systémů musíme brát ohled na fyzikálně chemické řešení, metalurgii, hydrodynamiku, strojírenské řešení a v neposlední řadě také ekonomii [8].

3.2 Rozdělení koroze

Podle mechanismu probíhajících dějů se koroze dělí na chemickou a elektrochemickou.

3.2.1 Chemická koroze

Probíhá v plynných a elektricky nevodivých kapalných prostředích za normálních, ale zejména za zvýšených teplot. Při reakci se vytvářejí vrstvy korozních zplodin přímo v místě reakce. Rychlost chemické koroze je dána afinitou materiálu ke koroznímu prostředí (vysoká afinita vždy neznamená velkou rychlost koroze) a charakterem produktů koroze.

Chemická koroze se u slitin hliníku příliš neprojevuje, protože je hliník chráněn vrstvou oxidu hlinitého. Její ochrana je nejintenzivnější za působení suchého vzduchu. Mírně mohou oxidaci povrchu zvýšit nečistoty. Hliník a jeho slitiny jsou dobře odolné i vůči spalinám [1, 9].

3.2.2 Elektrochemická koroze

Probíhá v elektricky vodivých prostředích za přítomnosti galvanického (korozního) článku. Je oxidačně-redukční. Anodickou reakcí (oxidační) jsou vytvořeny elektrony, které katodická reakce (redukční) spotřebovává. Následkem těchto reakcí je vznik iontů korodujícího kovu.

Kovy lze seřadit podle elektrochemické ušlechtilosti, kde nejmenší korozní odolnost mají kovy elektronegativní (Na, Mg, K, Zn). Tato stupnice však neodpovídá skutečnosti, z důvodu pasivace některých kovů korozními zplodinami (např. Zn, Cr, Ni, Mo, Cu, Al...), které rychlost koroze výrazně zpomalují [9].

3.3 Vliv korozního prostředí

Podle korozního prostředí se koroze dělí na:

- 1) atmosférickou
- 2) v kapalinách
- 3) v plynech
- 4) v půdách

3.3.1 Atmosférická koroze

Je nejrozšířenější, způsobuje 60 – 70 % korozních ztrát všech kovových materiálů. Má převážně elektrochemický charakter. Velikost korozního napadení a rychlost koroze ovlivňuje jednak agresivita korozního prostředí a jednak chemické složení materiálu. Pokud působící atmosféra není příliš agresivní, hliník a jeho slitiny neobsahující Cu, Zn nebo Ni se pasivují. Je-li atmosféra agresivní příliš, dochází ke vzniku mělké důlkové koroze. Z hlediska chemického složení v materiálu velmi nepříznivě působí měď a zinek. V průmyslových prostředích jsou slitiny Al obsahující Zn náchylné ke koroznímu praskání a korozi po vrstvách [1, 10].

3.3.2 Koroze ve vodě

Je nejčastější z možných korozi v kapalinách. Její intenzitu ovlivňují chemické látky rozpuštěné ve vodě. Obsah těchto chemických látek se liší podle druhu vody (pitná, průmyslová, odpadní...). Koroze ve vodě probíhá elektrochemicky, ale na její rychlost má vliv také řada neelektrochemických dějů, jako např. chemické děje v roztoku, mechanické nečistoty, kavitace apod.

U slitin hliníku se ve vodě tvoří tlustší a odolnější vrstva Al_2O_3 , pokud se však teplota vody zvýší nad 100 °C, na povrchu kovu se netvoří vrstva ochranná, ale vrstva korozních zplodin. Projevuje se rovnoměrná koroze a může dojít i k mezikrystalické korozi či ke koroznímu praskání. Nad teplotou 200 °C není odolný ani čistý hliník. Odolnost proti korozi negativně ovlivňuje také proudění vody. V klidné vodě ale vzniká důlková koroze. Na korozi má vliv také pH působící vody, nejhorší vlastnosti má kyselá a zásaditá voda, která vyvolává intenzivní rovnoměrnou korozi [1, 10].

3.3.3 Koroze v půdách

Protože jsou půdy tvořeny fází pevnou, plynnou a kapalnou, je koroze v půdách zvláštním případem koroze v roztocích elektrolytů. Rozhodující vliv na korozi má fáze kapalná, která je tvořena vodným roztokem elektrolytu, obsahujícím rozpuštěné plyny. Na korozi má vliv také složení půdy. Vliv charakteru půdy je velmi podobný jako vliv charakteru vody. V případě hliníkových slitin v půdách vzniká důlková koroze. Její rychlost klesá s délkou vystavení působení půdy [1, 10].

3.3.4 Koroze v roztocích solí

Koroze v roztoku solí závisí na pH roztoku a na povaze kationtů a aniontů v něm obsažených. Na hliník a jeho slitiny působí nejagresivněji chloridy, jejichž anionty jsou dostatečně malé na to, aby pronikly ochrannou vrstvou oxidu hliníku. Jejich vliv závisí na množství porů a poškozených míst oxidické vrstvy. Negativně působí také kationty, k nejagresivnějším patří K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} a Mg^{2+} [1].

3.4 Druhy korozního napadení

Koroze napadá část kovové hmoty nebo celou kovovou hmotu, nebo porušuje strukturu kovu. Porušení ochranné vrstvy Al_2O_3 vede ke korozi materiálu, která může probíhat několika různými způsoby, v závislosti na tom jak byla povrchová vrstva napadena [1].

Bodová koroze

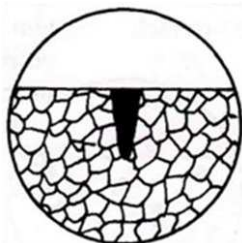
Bodová koroze je následkem lokálního porušení ochranné vrstvy. Porušení vzniká působením aniontů halogenidů Cl^- , Br^- a I^- , které pronikají vrstvou a porušují její chemickou heterogenitu, čímž vznikají lokální mikroanody. Jako katody působí zapasivovaný kov. V průběhu koroze se napadené oblasti zvětšují na úkor okolního materiálu a zmenšuje se poměr mezi anodou a katodou [1]. Schéma bodové koroze je zobrazeno na obr. 3.4.1.

Mezikrystalová koroze

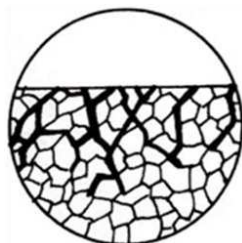
Možným iniciátorem mezikrystalové koroze je koroze bodová. Mezikrystalová koroze vzniká pouze u rekrystalizovaných struktur. U hliníkových slitin působí příměsi vyloučené na hranicích zrn jako aktivátory hranic zrn. Fungují buď jako katody (např. CuAl_2), nebo jako anody (např. MgAl_3). Mezikrystalová koroze se projevuje i u čistého hliníku, konkrétně ve vodě při teplotě nad $160\text{ }^\circ\text{C}$. Z důvodu adsorpce příměsí na hranici zrna, příměsí zde působí jako katody [1]. Schéma mezikrystalové koroze je zobrazeno na obr. 3.4.2.

Koroze po vrstvách

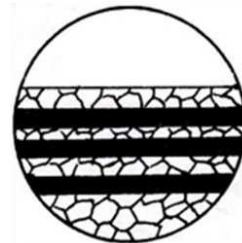
Probíhá u výkovek a vývalků ze slitin hliníku rovnoměrně s jejich deformovaným povrchem. V tomto směru vznikají trhliny, jako následek objemového účinku vznikajících korozních zplodin. Koroze po vrstvách může probíhat po hranicích zrn, po deformovaných hranicích dendritů nebo transkrystalicky. Její rychlost je konstantní. Dochází u ní ke ztrátě soudržnosti nosných průřezů a tím k úplné ztrátě pevnostních vlastností. Náchylnost ke korozi po vrstvách závisí na způsobu tepelného zpracování a na legujících prvcích [1]. Schéma koroze po vrstvách je zobrazeno na obr. 3.4.3.



Obr. 3.4.1. Bodová koroze [11].



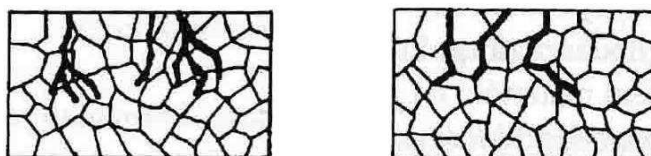
Obr. 3.4.2. Mezikrystalová koroze [11].



Obr. 3.4.3. Koroze po vrstvách [11].

Korozní praskání

Probíhá mezikrystalicky, transkrystalicky nebo smíšeně. Trhliny jsou kolmé k působícímu tahovému napětí. Čistý hliník tomuto druhu koroze nepodléhá, naopak náchylné ke koroznímu praskání jsou slitiny AlCuMg . Náchylnost ke koroznímu praskání závisí na tepelném zpracování (např. na stárnutí za zvýšených teplot) a zvyšuje se také legováním hořčíkem [1]. Schéma korozního praskání je na obr. 3.4.4.



Obr. 3.4.4. Transkrystalické korozní praskání (vlevo), interkrystalické korozní praskání (vpravo) [9]

Korozní únava

K porušení materiálu mechanismem korozní únavy dochází při cyklickém namáhání, trhliny jsou transkrystalické i interkrystalické. Nezáleží na druhu elektrolytu [1].



Obr. 3.4.5.
Korozní únava [9]

Vibrační koroze

Často se vyskytuje u šroubových, nýtovaných nebo čepových spojů hliníku a jeho slitin. Vzniká pouze v oxidačním prostředí, když dojde k oddělení malých částecek pasivní ochranné vrstvy. Vibrační koroze je kombinací oxidace a abrazivního působení za působení kmitavého pohybu různé frekvence a zatížení dotýkajících se povrchů [1].

Kontaktní koroze

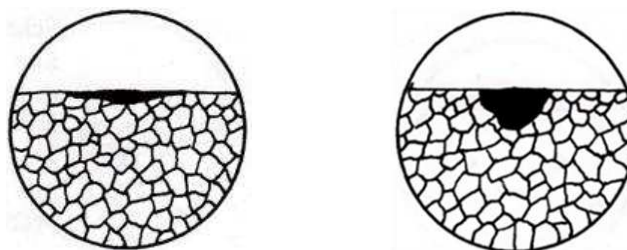
Hliník je z hlediska odolnosti proti korozi málo ušlechtilý kov, proto je jeho koroze zrychlena při styku s řadou kovů, nejhorší vliv má měď. Pokud jsou hliník a měď ve stejném elektrolytu, nemusejí se dotýkat, stačí, když ionty mědi doputují elektrolytem až na povrch hliníku, kde se vyloučí cementací a na jeho povrchu vytvoří mikrokatody způsobující lokální napadení. Při kontaktu hliníku s hořčíkem se hliník stává anodou [12].

Skvrnitá a důlková koroze

O důlkovou nebo skvrnitou korozi se jedná, pokud je úbytek materiálu nerovnoměrný a poměr úbytku hloubky k šířce úbytku je poměrně malý a v průběhu korozního napadení zůstává stejný [12].

Důlková koroze hliníkových slitin je silně lokalizovaný typ koroze v přítomnosti agresivních chloridových iontů. Jamky jsou iniciovány napadením slabých míst oxidové vrstvy chloridy. Když se jamka rozšíří, prostředí v ní se změní, pH vzroste. Pro vyrovnání pozitivního náboje se chloridové ionty přemístí do jamky. Výsledná HCl uvnitř jamky zrychlí její šíření [13].

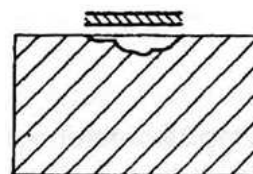
Redukční reakce způsobí lokální alkalizaci okolo katodických částí. Oxidy hliníku v takovém prostředí nejsou stabilní a hliník v okolí těchto částic se rozpustí. Aktivní komponenty katodických částic se také selektivně rozpustí, tím se obohatí část povrchu o železo a vzroste aktivita katody. Leptání hliníkové matrice může oddělit částice od povrchu, což může způsobit opětovnou pasivaci zásadité jamky [13].



Obr. 3.4.5. Skvrnitá koroze (vlevo), důlková koroze (vpravo) [11]

Štěrbínová koroze

Probíhá v jemných kapilárách nebo v místech se špatným oběhem prostředí, ve kterých vznikají koncentrační články urychlující korozi. Na okrajích štěrbin se vytvoří korozní články, způsobené rozdílem obsahu iontů v elektrolytu ve štěrbině a na jejím ústí nebo rozdílem obsahu kyslíku (charakteristické pro kovy a slitiny schopné pasivace) [12].



Obr. 3.4.6.
Štěrbínová koroze
[9]

3.5 Hlavní činitele ovlivňující korozi

Hlavní činitele ovlivňující korozi lze rozdělit do tří skupin:

- 1) Stav materiálu
- 2) Korozní prostředí
- 3) Konstrukce výrobku nebo zařízení

Stav materiálu

Vliv na stav materiálu má množství nečistot, struktura a stav jeho povrchu. Nečistoty jsou nebezpečné zejména u koroze v elektrolytech, kde se chovají jako mikroelektrody a vytvářejí nové korozní články, snižují předpětí katodické reakce, porušují ochranný povlak kovu nebo vytvářejí nová korozní centra, čímž zvyšují rychlost koroze. V plynném prostředí ovlivňují nečistoty vznikající vrstvu produktů koroze a difuzi, což opět urychluje korozi. Pokud jsou nečistoty v celém objemu materiálu, působí po celou dobu korozního procesu. Čím je agresivnější prostředí, tím menší je, v porovnání s ním, vliv nečistot [12].

Významný vliv má také množství jednotlivých fází, jejich charakter a složení. Častěji má na korozi vliv změna chemického složení na hranicích zrn. Tato změna může nastat důsledkem tepelného zpracování při výrobě nebo při dalším zpracování, např. svařování. Změněné nebo nově vzniklé fáze mohou být náchylnější na působení korozního prostředí nebo zhorší korozní odolnost materiálu tím, že z něj odčerpají některé prvky. Odolnost proti korozi ovlivňuje také drsnost povrchu. Hladší povrch je odolnější než drsný, protože se na něm např. při atmosférické korozi hůře tvoří vlhká vrstva. Další průběh koroze však na počátečním povrchu nezávisí [12].

Korozní prostředí

Korozní prostředí ovlivňuje korozi svým chemickým složením, teplotu, tlakem a relativním pohybem vzhledem k povrchu kovu. Zvyšováním teploty dojde buď k urychlení koroze (pokud je jejím mechanismem depolarizace vodíku) nebo naopak k jejímu zpomalení (je-li jejím mechanismem depolarizace kyslíku). K urychlení koroze zvýšením teploty dochází v případě koroze v plynech, ke zpomalení v případě koroze v elektrolytu [12].

Pohyb korozního prostředí urychluje transportní pochody a tím může zvětšit korozi, nebo naopak korozi omezí tím, že urychlí přísun pasivačních látek nebo urychlují elektrochemické pochody, které kov pasivují. Jiný příznivý účinek pohybu korozního prostředí je v zabránění vzniku usazenin, které způsobují bodovou korozi. Je-li pohyb korozního prostředí rychlý, může dojít k mechanickému porušení pasivační vrstvy nebo ochranného povlaku [12].

Konstrukce výrobku nebo zařízení

Dostanou-li se do styku dva různé materiály, může začít korodovat ten, který by sice byl v daném prostředí vůči korozi odolný, ale vůči druhému materiálu je elektronegativnější. Dostane-li se materiál odolný vůči korozi do styku s nekovovým materiálem, může také začít korodovat, např. v důsledku koncentrace vlhkosti na materiálu nekovovém [12].

Negativně může působit špatné konstrukční uspořádání bez přítomnosti jiného materiálu. Mezi negativně působící vlivy konstrukce patří např. štěrby, porušování ochranných vrstev kovu, rozdíly v rychlosti proudění média nebo v teplotě okolí, hromadění agresivního elektrolytu a další [12].

3.6 Volba ochrany proti korozi

Zařízení lze proti korozi ochránit různými způsoby:

- a) volbou materiálu s vhodným chemickým složením, který bude korodovat co nejmaleji,
- b) změnou vlastností korozního prostředí tak, aby bylo méně agresivní,
- c) úpravou jeho konstrukce, aby nezhoršovala korozní podmínky,
- d) použitím elektrochemické ochrany,
- e) nanesením ochranného povlaku.

Při volbě vhodné korozní ochrany je nutno brát zřetel na ekonomii, zejména na pořizovací náklady, náklady na provoz a údržbu ochrany po celou dobu životnosti součásti, záruku bezporuchovosti součásti a bezpečnost provozu [8].

Volba materiálu s vhodným chemickým složením

Využívá se vlastností různých kovů a slitin jako např. termodynamická stálost v daném prostředí, schopnost snadné a účinné pasivace nebo vytváření vrstev korozních zplodin s ochrannou vlastností. Materiály s některou z uvedených vlastností jsou většinou drahé, proto se používají k plátování nebo se na povrch kovu nanášejí jiným způsobem [8].

Vhodné složení materiálu se volí s ohledem na vztah mezi jeho složením, fyzikálními a strukturními vlastnostmi a jeho chováním v daném korozním prostředí. Vhodnou volbou chemického složení materiálu lze zaručit např. jeho pasivovatelnost, odolnost v neoxidujících kyselinách nebo zlepšit odolnost vůči korozi vrstvy zplodin na jeho povrchu [8].

Změna vlastností korozního prostředí

Vlastnosti korozního prostředí se mění buď přísadou látek, které korozi zpomalí, nebo odstraněním korozně aktivní složky. Použití přísady látek zpomalujících korozi je jedna z nejvýznamnějších metod ochrany. Tyto látky např. pasivují povrch součásti nebo zpomalují některou korozní reakci. Odstranění korozně aktivní složky je např. ochrana proti atmosférické korozi vysoušením [8].

Úprava konstrukce

Nevhodným uspořádáním součástí mohou vznikat nebezpečné korozní makročlánky nebo může dojít k funkčnímu znehodnocení jinak odolných materiálů, je proto nutné nevhodnou konstrukci upravit [8].

Elektrochemická ochrana

Elektrochemicky lze materiál ochránit použitím katodické nebo anodické ochrany, vytvořením elektrického článku mezi kovem snadno korodujícím a kovem takto chráněným. Dalším způsobem elektrochemické ochrany jsou elektrické drenáže snižující vliv bludných proudů [8].

Ochranný povlak

Ochranné povlaky mohou izolovat kov od korozního prostředí, měnit vlastnosti korozních zplodin a zpomalovat působení pronikajícího korozního prostředí změnou jeho složení [8].

Kombinace metod ochrany proti korozi

Důležitá je zejména kombinace materiálu odolného vůči korozi a ochranného povlaku nebo také úprava konstrukce spojená s volbou vhodného materiálu a ochranného povlaku. Časté je použití katodické ochrany a ochranného povlaku [8].

4. KOROZE HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN

4.1 Korozní charakteristika

V praxi je pro využití hliníku a jeho slitin rozhodující chování a vlastnosti tenké povrchové vrstvy oxidu hlinitého (Al_2O_3), kterou se hliník (pro svou vysokou reaktivitu) při styku s kyslíkem pokrývá a dále se chová jako korozně stálý. Tloušťka této vrstvy závisí na podmínkách, ve kterých vzniká, přítomnosti aniontů a kationtů, teplotě a pH. Vzniká-li tato vrstva za přítomnosti suchého vzduchu, je její tloušťka řádově 10^{-9} m, vzniká-li v přítomnosti vlhkosti, dosahuje její tloušťka hodnoty 10^{-6} m. Hustá oxidová vrstva na čistém hliníku, která vznikla při pokojové teplotě, má tloušťku 2 – 3 nm. Při zahřátí na $425\text{ }^\circ\text{C}$ může dosáhnout tloušťky až 20 nm. Na růst této vrstvy mají vliv také legující prvky v hliníkových slitinách. Pozitivně růst ovlivňují např. měď a hořčík [12, 13].

Pokud je ochranná vrstva poškozena, např. škrábnutím, okamžitě se na základním kovu vytvoří nové oxidy. Tímto způsobem je hliník skvěle chráněn proti korozi. Přírodní vrstvy Al_2O_3 se dají zvětšit působením horké vody nebo páry. Vrstvy vytvořené chemicky v lázních s obsahem CrO_4^{2-} jsou podkladem pro nátěr [12, 13].

4.2 Mechanismus koroze

4.2.1 Destabilizace vrstvy oxidů

Stabilitu oxidů mohou negativně ovlivnit (a tím způsobit korozi) následující faktory:

- 1) oxidy nejsou stabilní v kyselém ($\text{pH} < 4$) nebo zásaditém ($\text{pH} > 9$) prostředí,
- 2) agresivní ionty (chloridy, fluoridy) mohou lokálně napadat oxidickou vrstvu,
- 3) určité prvky (Ga, Ti, In, Sn, Pb) se mohou vmísit do oxidů a destabilizovat je [13].

4.2.2 Vznik mikrogalvanického článku

Většina komerčních slitin obsahuje několik typů intermetalických fází. Koroze hliníkových slitin je v podstatě mikrogalvanickým procesem mezi těmito fázemi a maticí slitiny. Tyto intermetalické fáze se často chovají jako lokální katody, protože obsahují železo a okolní hliníková matrice je vystavena lokálnímu napadení. Podstatné jsou následující jevy:

- 1) přednostně mohou korodovat aktivní fáze,
- 2) aktivní fáze mohou sloužit jako obětovaná anoda a vytvářet katodickou ochranu okolnímu materiálu,
- 3) elektrochemické reakce korodujících míst a katod, mohou vést k rozdílům složení a pH mezi elektrolytem v okolí reagujících míst a zbytku elektrolytu,
- 4) aktivní součásti matrice slitiny a intermetalických fází mohou korodovat selektivně, což vede ke změnám korozních vlastností [13].

4.3 Vliv chemického složení

Nejvíce korozi odolává čistý hliník. Příměsi ve slitinách hliníku korozní odolnost snižují. Pozitivně působí pouze mangan, který při tavbě slitiny vyvazuje do strusky železo, které má výrazný negativní vliv na odolnost vůči korozi. Působení nečistot, záleží na tom, zda jsou rozpuštěny v tuhém roztoku nebo se ve slitině vyskytují jako heterogenní částice. Proto nelze vliv nečistot nijak seřadit. Obecně však lze říci, že rozhodující je, zda daná slitina obsahuje měď nebo ne [1].

4.3.1 Slitiny neobsahující měď

Slitiny neobsahující měď mají skoro stejnou korozní odolnost jako čistý hliník. Dobrou odolnost mají také slitiny typu AlMn a AlMgMn. V letectví se používají slitiny AlZnMg s obsahem Zn + Mg větším než 6 %. Je-li špatně provedeno tepelné zpracování, jsou tyto slitiny náchylné ke koroznímu praskání. Pokud hrozí vznik důlkové koroze, jsou slitiny chráněny plátováním méně ušlechtilými slitinami, např. AlZn1, které elektrochemicky brání pronikání koroze do hloubky [12].

4.3.2 Slitiny obsahující měď

Slitiny obsahující měď mají menší korozní odolnost, zejména v agresivních prostředích obsahujících chloridy a v průmyslových prostředích. Např. slitina AlZnMgCu je pro zvýšení korozní odolnosti plátována slitinou AlZn1. Lité slitiny obsahující měď mají také horší odolnost proti korozi než slitiny, které měď neobsahují [12].

4.4 Vliv koroze na mechanické vlastnosti

Mechanické namáhání může vést k urychlení procesu koroze (např. důlkové) nebo způsobit vznik korozních trhlin. Stejně tak má koroze negativní vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Degradace materiálu může nastat např. následkem průniku korozního prostředí do materiálu [8].

Vliv koroze na mechanické vlastnosti závisí také na jejím typu. Rovnoměrná koroze sice mechanické vlastnosti zhorší, ale přesto může být daná součást použitelná. Pokud je součást napadena např. mezikystalovou korozi, dojde k poškození nosného průřezu součásti do takové míry, že daná součást musí být vyřazena z provozu [1].

4.5 Protikorozní ochrany hliníkových slitin

Aby se zvýšila ochrana proti korozi hliníkových slitin, je jejich povrch pokrýván různými povlaky, např. fosfátovými, chromovými nebo oxidickými.

1) Fosfátové povlaky

Fosfátové povlaky jsou vytvářeny (postřikem nebo ponorem) pomocí činidla, které na povrchu vytvoří souvislou vrstvu nerozpustných fosforečnanů. Činidla obsahují kyselinu fosforečnou (H_3PO_4) nebo fosforečnany. Fosfátová vrstva je ve vodě nerozpustná, silně pórovitá a nasákavá. Aby plnila svou funkci, musí se upravovat (např. impregnací vrstvy konzervačními prostředky nebo ochrannými laky) [14,15].

Vytvořením fosfátových povlaků docílíme zlepšení adheze a odolnosti proti korozi povrchu, optimalizujeme tváření za studena, snížíme tření na povrchu součásti a vytvoříme elektricky izolační vrstvu [14].

2) Chromátové povlaky

Vznikají procesem chromátování, při kterém se pomocí roztoku obsahujícího toxický Cr^{6+} na povrchu vytvoří souvislá ochranná vrstva různých barev. Právě kvůli toxicitě šestimocného chromu se od používání chromátových povlaků ustupuje a tyto povlaky jsou nahrazovány pasivováním povrchu pomocí trojmocného chromu. Pasivační vrstva je však tenčí. Chromátové povlaky chrání povrch proti korozi, přičemž materiál neztratí svou elektrickou vodivost. Také jsou vhodné jako podkladová vrstva pro nátěry [14].

3) Anodické oxidové povlaky

Anodickou oxidací (eloxováním) se na povrchu hliníku elektrolyticky vytvoří vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3). Nejčastěji se jako elektrolyt používá kyselina sírová (H_2SO_4), chromová (H_2CrO_4) nebo šťavelová ($(\text{COOH})_2$). Kyseliny ovlivňují strukturu a tloušťku povrchové vrstvy. Vlastnosti anodických oxidových vrstev jsou dány čistotou podkladového kovu, podmínkami oxidace, složením elektrolytu, teplotou a použitým proudem. Anodickou oxidací vytvořený povlak je nejen odolný proti korozi, ale také proti otěru a opotřebení [14,15].

4) Chemické oxidové povlaky

Chemické oxidové povlaky jsou vyráběny oxidací povrchu kovu chemickými oxidačními činidly za zvýšené teploty ponorem součásti do alkalické lázně obsahující oxidační látky. Takto upravený povrch je odolný proti korozi v nenáročných podmínkách a má nižší elektrický odpor. Chemické oxidové povlaky jsou také používány jako podkladová vrstva pro nátěry nebo jsou jimi pokrývány broušené povrchy nebo nesouvislé anodické povlaky. Tyto povlaky nejsou příliš odolné proti otěru, izolují elektrický proud a zachovávají drsnost povrchu stejnou jako před jejich aplikací [14].

5. METODIKA ZKOUŠENÍ KOROZE

Zkoušení koroze se provádí v prostředí, které korozní proces urychluje, a to zesílením účinků některých vlivů, jako je teplota, relativní vlhkost atmosféry, kondenzace vlhkosti nebo kondenzace korozních činidel. Při zkoušce jsou kladeny nároky na vzorky, zařízení i umístění vzorků do zkušební komory. Normou je dána také doporučená zkušební doba [16].

Pro všechny typy zkoušek musí být jednotlivé vzorky vždy stejně upravené nebo mít stejný povlak, musí mít stejný tvar, velikost a také stejnou drsnost povrchu. Požadavky se liší s ohledem na typ zkoušky. Povrch vzorku se před zkouškou musí odmastit inertní látkou [16].

Vzorky mají být takové, aby se z nich dal odvodit průběh koroze až po jeho ustálení. Počet vzorků má být volen tak, aby po experimentu vznikl reprezentativní statisticky zpracovatelný soubor dat [12].

6. HODNOCENÍ KOROZE

Korozní zkoušky jsou prováděny v laboratorních podmínkách, co nejpodobnějších budoucím provozním podmínkám nebo přímo v podmínkách provozních [12].

6.1 Zkoušky v laboratoři

Laboratorní zkoušky jsou snadněji proveditelné a jejich výsledky se dají přesněji kontrolovat. V laboratoři se však nedaří přesně napodobit všechny vlivy, které na součást v reálném provozu působí (proudění, výměna prostředí, tlak, kolísání parametrů v čase). Tento nedostatek se nejvýrazněji projevuje u zkoušek, které mají urychlit působení některého z činitelů [12].

Laboratorní zkoušky se používají spíše pro sledování jednoduchých vztahů mezi kovem a korozním prostředím. Pokud je zkouška složitější, jsou kladeny větší nároky na odborné znalosti pracovníků, kteří zkoušku vyhodnocují [12].

6.2 Zkoušky v provozu

V provozních podmínkách jsou zkoušky prováděny na vzorcích nebo jsou zkoumány některé části zařízení. Tyto zkoušky jsou spolehlivější a jejich výsledky mají širší použitelnost. Někdy jsou však zkoušky v provozním prostředí neproveditelné, a proto se v těchto případech provádějí zkoušky v laboratořích.

V provozu jsou často dělány i zkoušky na modelech reálných součástí a zařízení, kde jsou současně sledovány i některé technologické parametry. Nevýhodou těchto zkoušek jsou vysoké náklady [12].

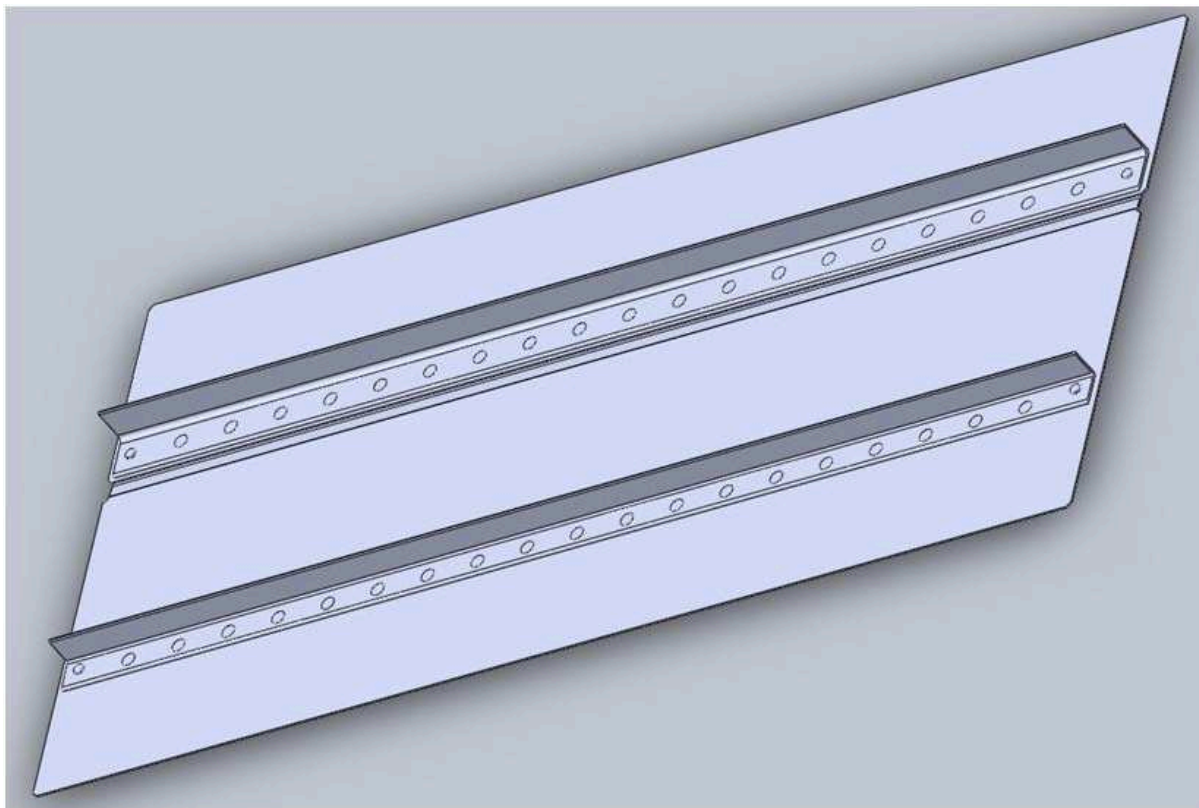
7. CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je:

- charakterizovat hliníkovou slitinu používanou na panel letadla z hlediska jejího chemického složení, tepelného zpracování a výsledných vlastností
- popsat metodiku zkoušení a hodnocení korozního napadení hliníkových slitin
- provést korozní zkoušky na vzorcích panelu bez povrchové ochrany
- vyhodnotit korozní napadení v místě bodových svarů panelu
- určit kritická místa konstrukčního uzlu

8. EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL

Předmětem pozorování bylo studium koroze na panelu o rozměrech 500 x 251 mm, který je používán na konstrukce letadel. Panel byl složen ze dvou plechů o shodné tloušťce 0,7 mm a rozměrech 500 x 180 mm a 500 x 91 mm pokrytých hliníkovým povlakem a dvou úhelníků (L profil) o shodné délce 494 mm a rozměrech stran 15 x 15 mm a 20 x 18 mm. Úhelníky byly k plechům připojeny fixačními nýty na koncích a 19, resp. 20, bodovými svary po celé délce úhelníků. Zkoumaný panel nebyl pokryt žádnou ochrannou vrstvou a ani štěrbinu mezi plechy, ani mezi plechy a úhelníky nebyly kryty tmelem. Schéma panelu je na obr. 8.1.



Obr. 8.1 Schéma panelu letadla

Základním materiálem panelu byla hliníková slitina AlCuMg1. V případě plechů byl tento základní materiál naplátován za tepla vrstvou hliníku o čistotě 99,5 %. Materiál úhelníku vrstvou hliníku pokryt nebyl.

9. METODIKA EXPERIMENTU

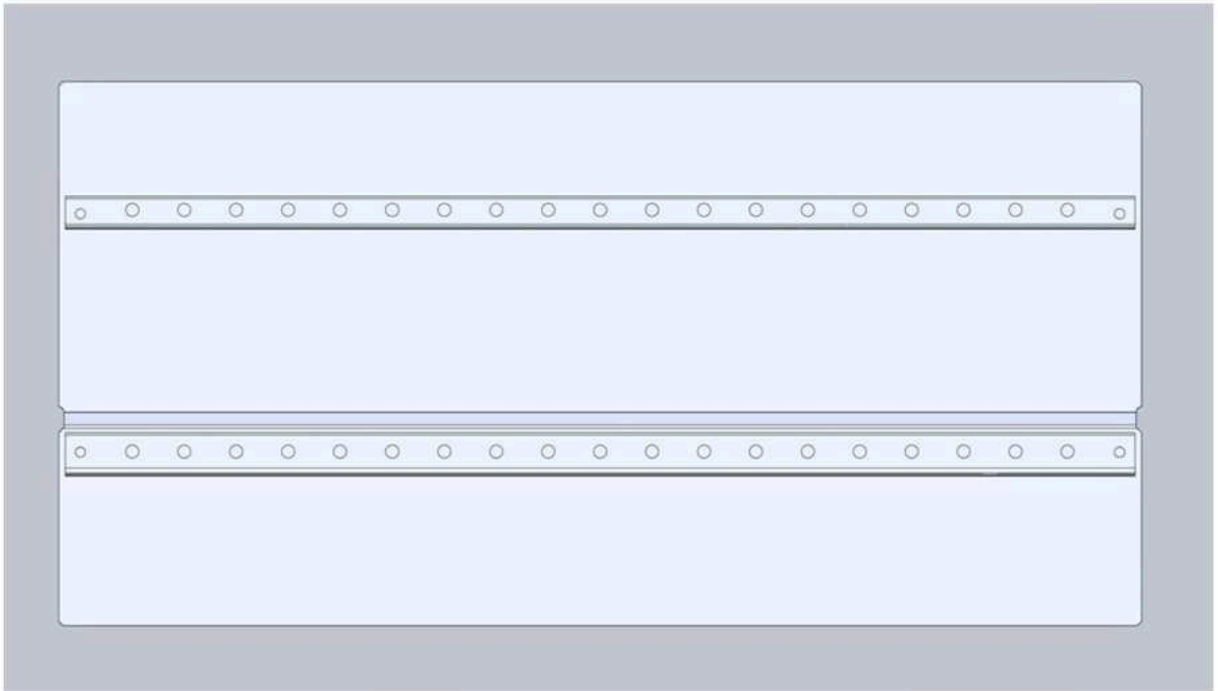
9.1 Korozní znehodnocení experimentálního materiálu

Pro hodnocení korozního chování hliníkových slitin v mlze neutrálního roztoku chloridu sodného se používají zkušební zařízení nazývané korozní komory, ve kterých se provádí korozní zkouška v umělé atmosféře, podle normy ČSN EN ISO 9227 – Zkoušky solnou mlhou neutrálního roztoku chloridu sodného [17].

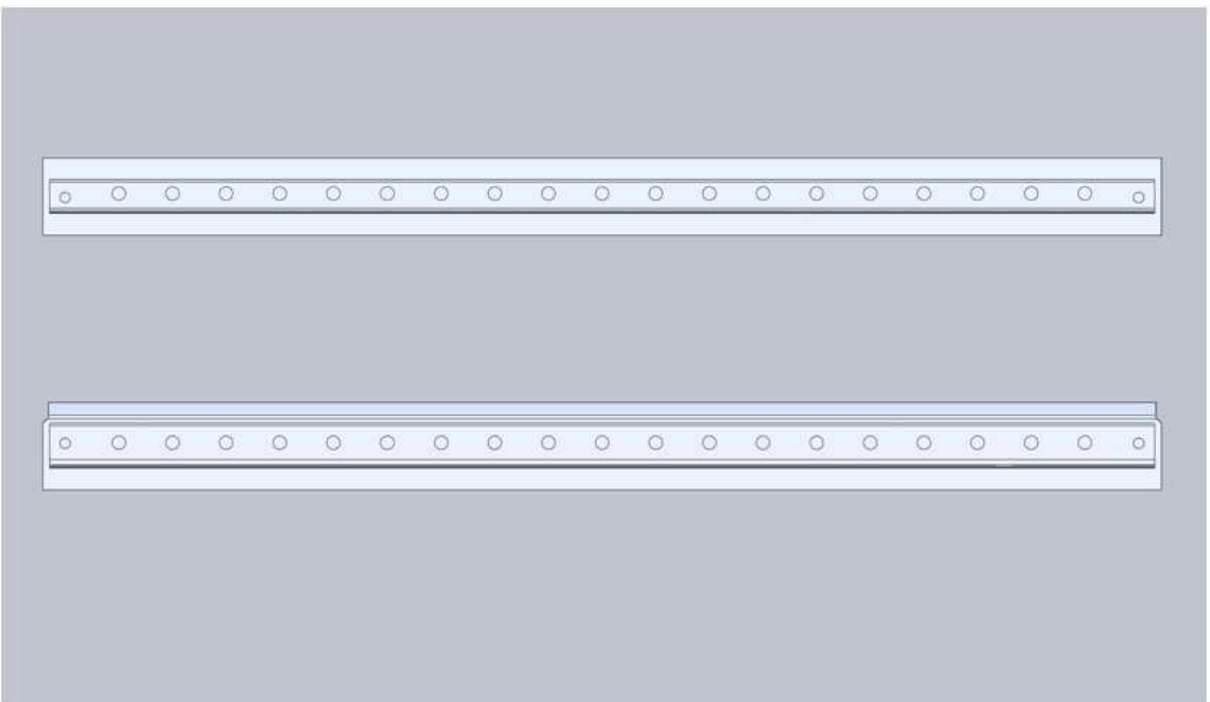
K experimentům byla použita solná komora DCTC 600P firmy Angelantoni Industrie S.p.a. Zkouška byla prováděna s odstupňovanou dobou expozice a to 480 h a 1000 h. Zkušební cykly probíhaly dle normy [17] v prostředí 5 % roztoku chloridu sodného, koncentrace 50 /l, při teplotě $35 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ a pH nahromaděného solného roztoku 6,5 až 7,2. Do korozní komory byly následně umístěny panely tak, aby na vzorky umístěné níže nestékala zkondenzovaná kapalina ani zkušební roztok z panelů výše a ani z horních částí komory. Také musely být rozmístěny tak, aby si navzájem nemohly stínit proti působení korozního prostředí. Z důvodu zajištění homogenního působení korozní atmosféry byly vzorky periodicky po 24 hodinách otáčeny o 90° . Po daných dobách expozice byly panely z komory vyňaty, oplachem z nich byly odstraněny zbytky korozní atmosféry a následně byly horkým vzduchem osušeny.

9.2 Rozřezání panelu a výroba metalografických vzorků

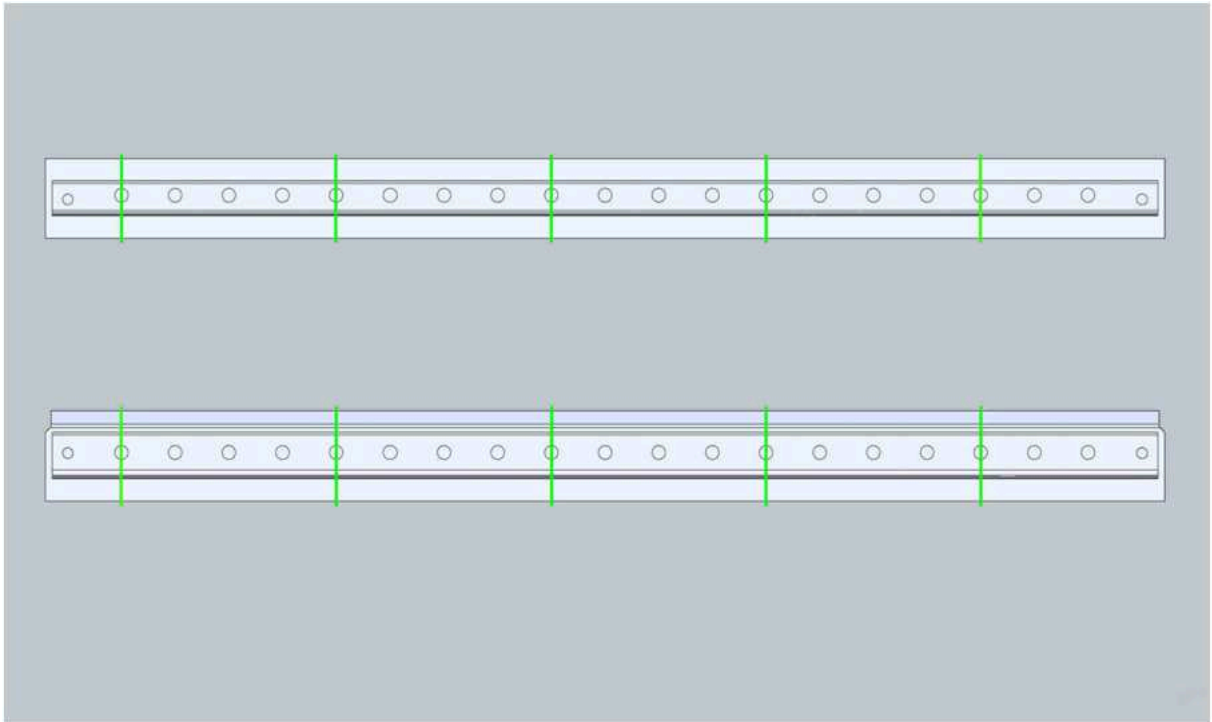
Zkorodované panely (obr. 9.1.1a) byly rozřezány; nejprve byly provedeny podélné řezy ve vzdálenosti 10 mm od podélné hrany úhelníků (obr. 9.1.1b), následně byly na zařízení pro automatické dělení metalografických vzorků (stolní rozbrušovačka) MSX250 firmy LECO provedeny osové řezy v místě vybraných svarů. Místa řezů jsou zobrazena na obr. 9.1.2a pro expozici 480 h a na obr. 9.1.2b pro expozici 1000 h. Vzorky vzniklé rozřezáním panelu byly na zařízení pro automatické lisování vzorků firmy Leco PR-4X při teplotě 180 °C , tlaku 29 MPa a výdrži na teplotě 30 min zalisovány do preparační hmoty Clarofast a označeny gravírovacím zařízením firmy Struers. Ze zalisovaných vzorků byly na zařízení pro automatické broušení a leštění firmy LECO GPX200 vytvořeny metalografické vzorky. Za použití brusných papírů o zrnitosti 600, 800, 1200, 2400, 4000 firmy Struers byly nejprve vybroušeny, poté leštěny pomocí diamantových past o zrnitosti $3 \text{ }\mu\text{m}$ a $0,7 \text{ }\mu\text{m}$ a následně upraveny chemicko-mechanickým leštěním pomocí suspenze OP-S (Colloidal Silica Suspension for Final Polishing) firmy Struers. Vybroušené a vyleštěné vzorky (jejich příklad je uveden na obr. 9.2.1a, resp. obr. 9.2.1b) byly následně naleptány pomocí leptadla FUSS a pozorovány na světelném mikroskopu Olympus PMG-3 při zvětšeních 50x, 100x a 200x. Místa, která byla napadená korozi, byla zdokumentována digitální kamerou DP 20 a vyhodnocena obrazovou analýzou v programu Olympus Stream Motion.



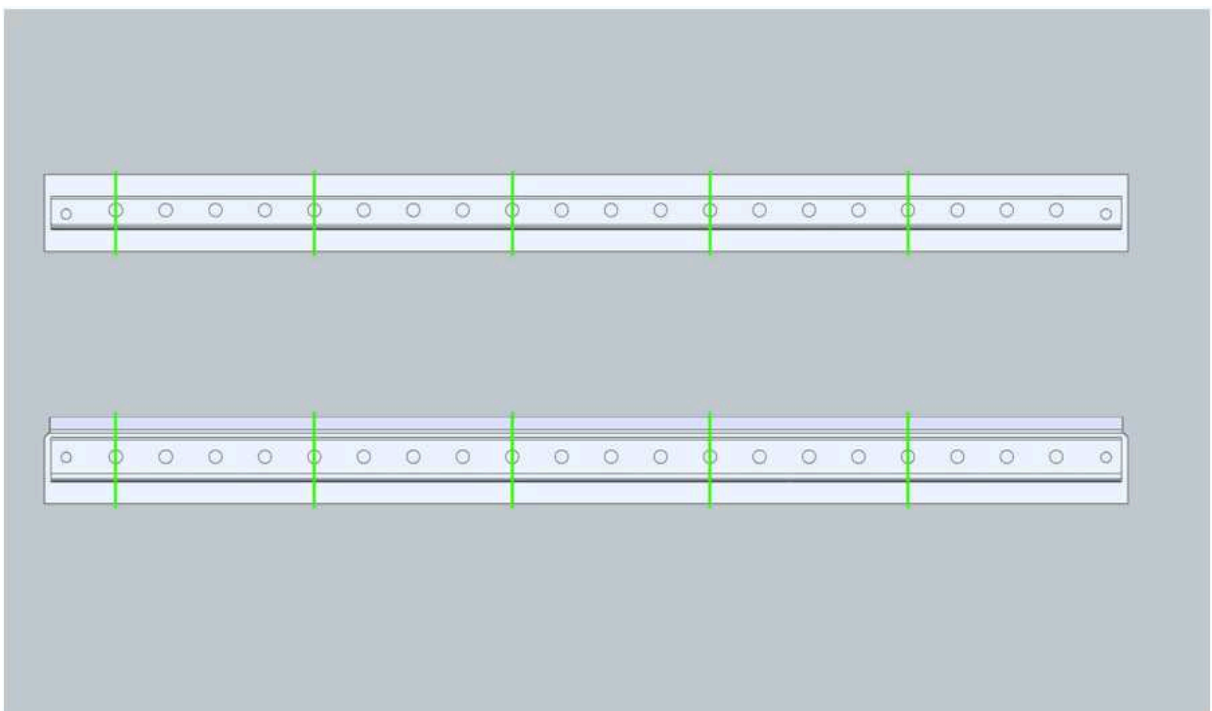
Obr. 9.1.1a Schéma celého panelu



Obr. 9.1.1. Schéma panelu po provedení prvních řezů



Obr. 9.1.2a Schéma panelu s vyznačenými místy osových řezů vybranými svary, doba expozice 480 h



Obr. 9.1.2. Schéma panelu s vyznačenými místy osových řezů vybranými svary, doba expozice 1000 h



Obr. 9.2.1a Metalografický vzorek svarového spoje, konstrukční uzel plech – úhelník, doba expozice 480 h a 1000 h



Obr. 9.2.1b Metalografický vzorek svarového spoje, konstrukční uzel plech – plech - úhelník, doba expozice 480 h a 1000 h

9.3 Hodnocení korozního napadení

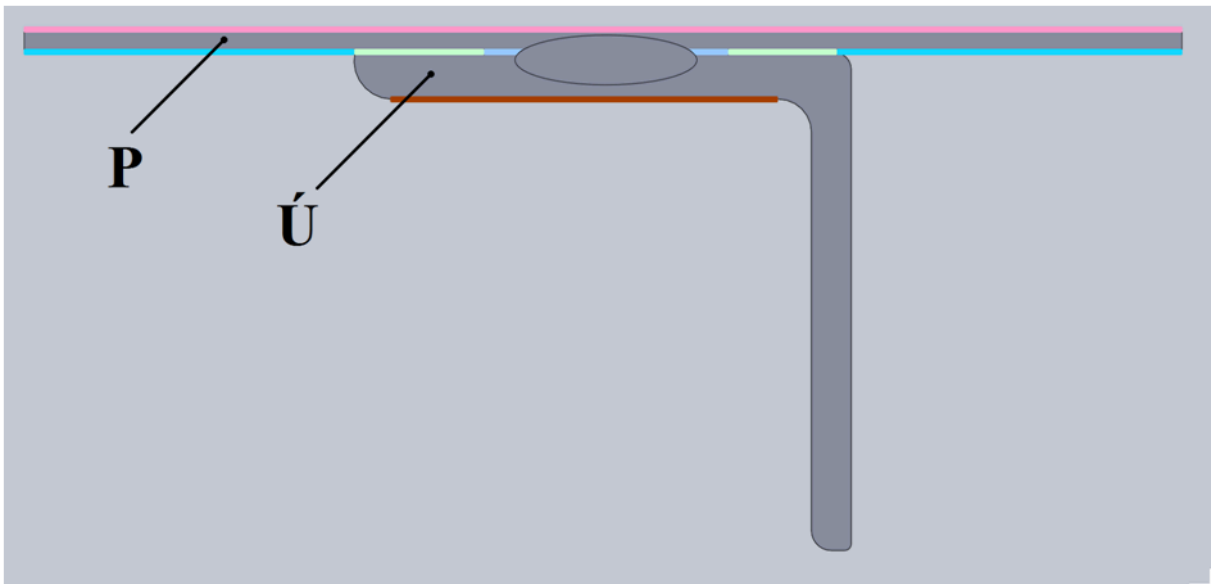
9.3.1 Systém značení vzorků

XXSX	
konstrukční uzel 1 - plech - úhelník 2 - plech - plech - úhelník	číslo svaru na panelu (zleva) 1 - 1. svar (vedle nýtu) 5 - 5. svar 9 - 9.svar 13 - 13. svar 17 - 17. svar
doba expozice A - 480 h B - 1000 h	svarový spoj

Vzorky byly označeny podle konstrukčního uzlu 1 nebo 2, podle doby expozice písmenem A nebo B, písmenem S a číslem svaru. Např. 1AS1 – konstrukční uzel plech – úhelník, doba expozice 480 h, svarový spoj, 1. svar vedle nýtu.

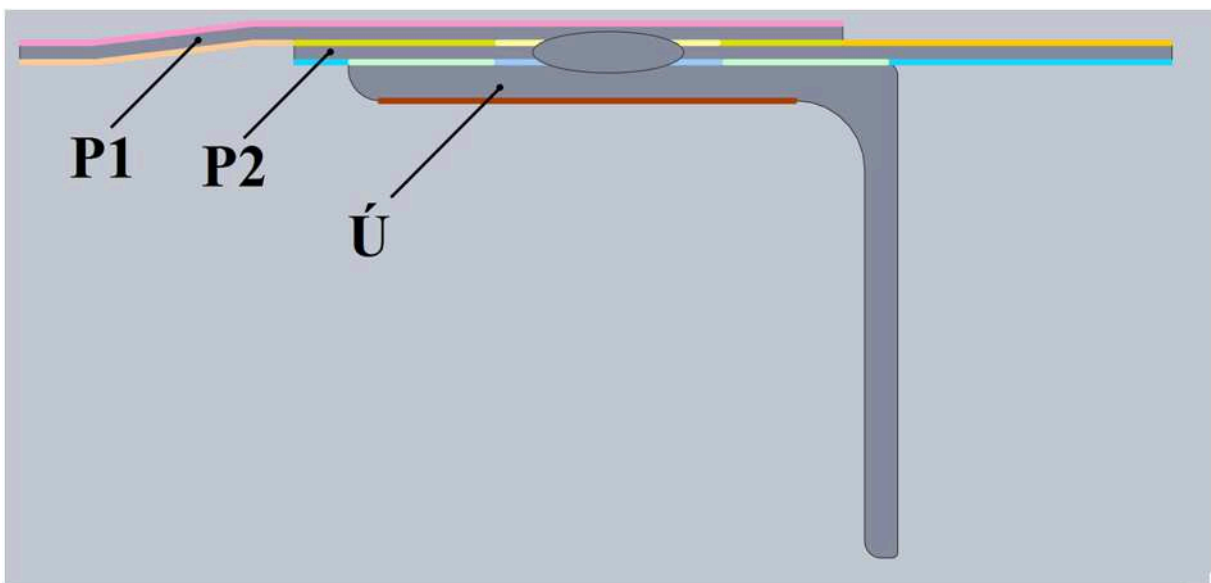
9.3.2 Systém označování kontrolovaných povrchů

Na vzorcích svarů bylo hodnoceno korozní napadení na površích plechů a úhelníků tvořících sledovaný konstrukční uzel. Vzhledem ke složitosti konstrukcí bylo zvoleno barevné rozlišení jednotlivých povrchů – schéma je uvedeno na obr. 9.3.1 pro uzel plech – úhelník a na obr. 9.3.2 pro uzel skládající se z plechu + plechu + úhelníku. Stejně barevné značení je použito i v tabulkách obsahujících naměřené i vypočítané hodnoty (tab. 9.3.1a až tab. 9.3.4a).



Obr. 9.3.1 Konstrukční uzel plech – úhelník s barevně vyznačenými pozorovanými plochami, doba expozice 480 h a 1000 h

P – plech, Ú – úhelník



Obr. 9.3.2 Konstrukční uzel plech – plech – úhelník s barevně vyznačenými pozorovanými plochami, doba expozice 480 h a 1000 h

P1 – horní plech bez kontaktu s úhelníkem, P2 – vložený plech v kontaktu s úhelníkem, Ú – úhelník

V tabulkách naměřených hodnot je rozlišeno místo napadené korozií jednak pomocí barev (v souladu s obr. 9.3.1. a obr. 9.3.2.) a jednak pomocí symbolů označujících takovéto místo konkrétněji. Pro tabulky 9.3.1a, 9.3.1b, 9.3.2a a 9.3.2b je systém značení tento:

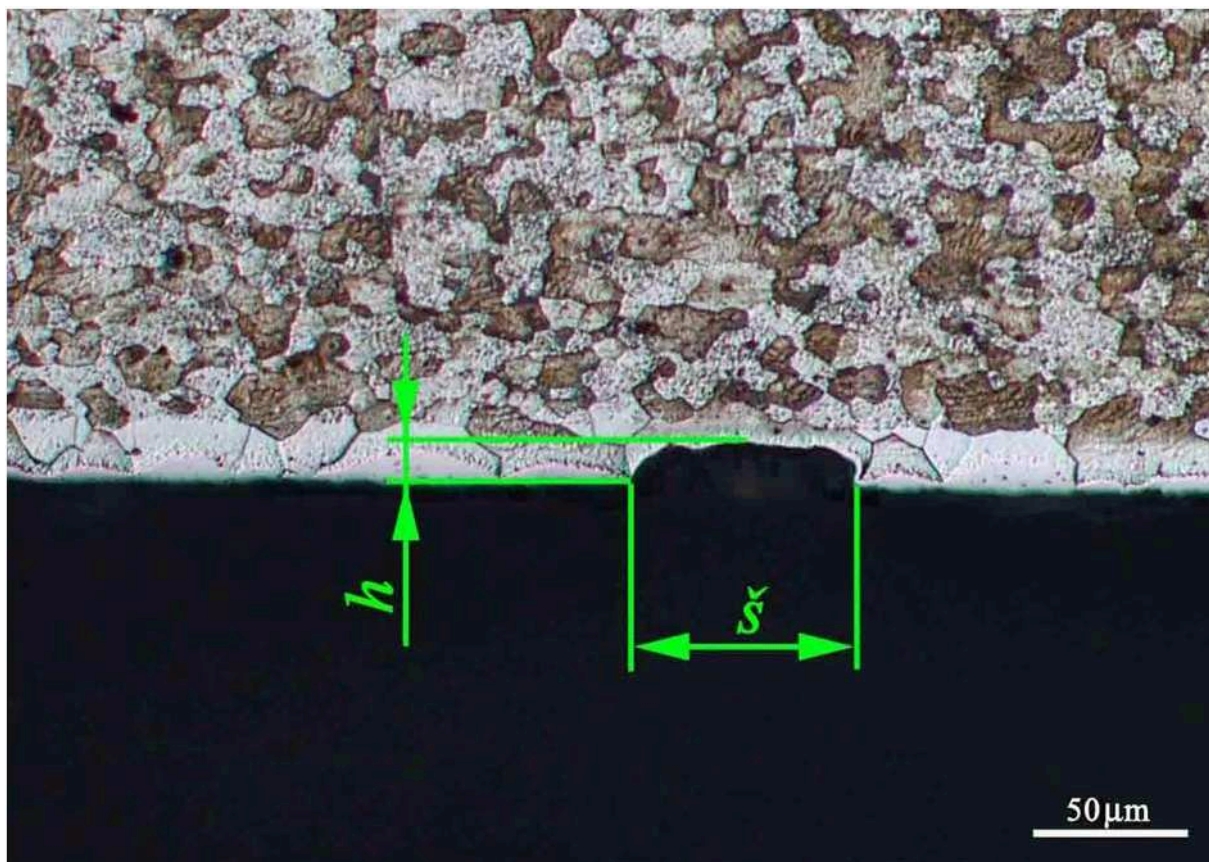
- **P volný povrch (pouze P)** – povrch plechu P , který není v kontaktu s úhelníkem $Ú$
- **plech P – úhelník Ú** – spojení plechu P a úhelníku $Ú$ s následnou bližší specifikací:
 - **P u svaru** – korozní napadení plechu P v bezprostřední blízkosti svaru
 - **Ú u svaru** – korozní napadení úhelníku $Ú$ v bezprostřední blízkosti svaru
 - **P dál od svaru** – korozní napadení plechu P , v místě které není v bezprostředním kontaktu se svarem, ale stále je v kontaktu s úhelníkem
 - **Ú dál od svaru** – korozní napadení úhelníku $Ú$, v místě které není v bezprostředním kontaktu se svarem
 - **P mimo kontakt** – korozní napadení spojení plechu P a úhelníku $Ú$, ale pouze přesahující části plechu P
- **Ú volný povrch** – povrch úhelníku $Ú$, který je v přímém kontaktu s atmosférou korozní komory

Pro tabulky 9.3.3a, 9.3.3b, 9.3.4a a 9.3.4b je systém značení tento:

- **P1 volný povrch (pouze P1)** – povrch plechu $P1$, který není v kontaktu s plechem $P2$
- **plech P1 – plech P2** – spojení plechu $P1$ a plechu $P2$ s následnou bližší specifikací:
 - **P1 u svaru** – korozní napadení plechu $P1$ v bezprostřední blízkosti svaru
 - **P2 u svaru** – korozní napadení plechu $P2$ v bezprostřední blízkosti svaru
 - **P1 dál od svaru** – korozní napadení plechu $P1$, v místě které není v bezprostředním kontaktu se svarem, ale stále je v kontaktu s plechem $P2$
 - **P2 dál od svaru** – korozní napadení plechu $P2$, v místě které není v bezprostředním kontaktu se svarem, ale stále je v kontaktu s plechem $P1$
 - **P1 mimo kontakt** – korozní napadení spojení plechu $P1$ a plechu $P2$, ale pouze přesahující části plechu $P1$
 - **P2 mimo kontakt** – korozní napadení spojení plechu $P1$ a plechu $P2$, ale pouze přesahující části plechu P
- **plech P2 – úhelník Ú** – spojení plechu $P2$ a úhelníku $Ú$ s následnou bližší specifikací:
 - **P2 u svaru** – korozní napadení plechu $P2$ v bezprostřední blízkosti svaru
 - **Ú u svaru** – korozní napadení úhelníku $Ú$ v bezprostřední blízkosti svaru
 - **P2 dál od svaru** – korozní napadení plechu $P2$, v místě které není v bezprostředním kontaktu se svarem, ale stále je v kontaktu s úhelníkem
 - **Ú dál od svaru** – korozní napadení úhelníku $Ú$, v místě které není v bezprostředním kontaktu se svarem
 - **P2 mimo kontakt** – korozní napadení spojení plechu $P2$ a úhelníku $Ú$, ale pouze přesahující část plechu
- **Ú volný povrch** – povrch úhelníku $Ú$, který je v přímém kontaktu s atmosférou korozní komory

9.3.3 Metodika hodnocení korozního napadení

V místě korozního napadení byla na vzorcích změřena jeho šířka s a hloubka h (příklad na obr. 9.3.3). Naměřené hodnoty byly tabelárně zpracovány.



Obr. 9.2.2 Příklad korozního napadení – na povrchu plechu, expozice 480 h

9.3.4 Tabulky experimentálně zjištěných hodnot

Údaje o korozním napadení materiálů ve sledovaných konstrukčních uzlech jsou uvedeny v tabulkách dle následujícího rozpisu:

- Tabulka 9.3.1a – konstrukční uzel plech – úhelník, expoziční čas 480 h
- Tabulka 9.3.2a – konstrukční uzel plech – úhelník, expoziční čas 1000 h
- Tabulka 9.3.3a – konstrukční uzel plech – plech – úhelník, expoziční čas 480 h
- Tabulka 9.3.4a – konstrukční uzel plech – plech – úhelník, expoziční čas 1000 h

Tabulky kromě změřených hodnot obsahují také výpočet plochy jednotlivých napadených míst a čísla snímků ze světelného mikroskopu zachycujících tato napadená místa. Fotografie jsou uvedeny v příloze. Měřené hodnoty šířky s a hloubky h jsou v μm , plocha napadených míst $s \cdot h$ v μm^2 . Pokud je v tabulce nula, dané místo nebylo napadeno korozi.

Tab. 9.3.1a. Šířka, hloubka a plocha míst napadených korozi v konstrukčním uzlu plech – úhelník, expozice 480 h

vzorek	č. svaru	P volný povrch						plech P - úhelník Ú											
		P u svaru			P mimo kontakt			Ú u svaru			Ú volný povrch								
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.		
1AS	1	0	0	0	-	2332,33	46,38	108173,47	P1.1	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	312,77	20,22	6324,21	P1.2	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
1AS	9	0	0	0	-	787,42	41,64	32788,17	P1.3	787,42	25,00	19685,50	P1.3	181,95	14,27	2596,43	P1.7		
		0	0	0	-	134,63	32,11	4322,97	P1.4	0	0	0	-	250,92	16,65	4177,82	P1.8		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	264,31	13,08	3457,17	P1.9		
		0	0	0	-	1041,24	38,07	39640,01	P1.5	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	125,21	23,44	2934,92	P1.6	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
1AS	17	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-
1AS	1	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-	
1AS	9	1056,17	47,57	50242,01	P1.7	776,75	20,22	15705,89	P1.10	143,45	47,32	6788,05	P1.15	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		
1AS	13	0	0	0	-	0	0	0	-	262,46	63,11	16563,85	P1.16	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	239,53	60,98	14606,54	P1.17	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	104,06	73,30	7627,60	P1.18	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	156,69	60,95	9550,26	P1.18	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	74,04	59,76	4424,63	P1.19	0	0	0	-		
1AS	17	0	0	0	-	0	0	0	-	172,51	46,12	7956,16	P1.19	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-		

Tab. 9.3.2a. Šířka, hloubka a plocha míst napadených korozi v konstrukčním uzlu plech – úhelník, expozice 1000 h

vzorek	č. svaru	P volný povrch						plech P - úhelník Ú																	
		P u svaru			Ú u svaru			P mimo kontakt			Ú volný povrch														
		š	h	š·h	č. obr.	h	š	š·h	č. obr.	h	š	š·h	č. obr.	h	š	š·h	č. obr.								
1BS	1	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-				
	5	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-				
	9	0	0	0	-	1171,18	20,36	23845,22	P2.1	1171,18	34,81	40768,78	P2.1	1571,82	23,90	37566,50	P2.8	84,05	40,25	3383,01	P2.9	0	-		
	13	0	0	0	-	87,54	15,22	1332,36	P2.2	1121,53	24,97	28004,60	P2.3	137,05	16,35	2240,77	P2.4	1121,53	29,73	33343,09	P2.3	84,47	12,22	1032,22	P2.9
	17	0	0	0	-	137,05	16,35	2240,77	P2.4	1334,28	41,62	55532,73	P2.5	0	0	0	-	84,44	16,65	1405,93	P2.10	0	0	0	-
1BS	1	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
	5	93,06	85,95	7998,51	P2.7	0	0	0	-	144,66	19,05	2755,77	P2.13	0	0	0	-	144,66	19,05	2755,77	P2.13	0	0	0	-
	9	1571,82	40,71	63988,79	P2.8	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
	13	600,64	33,32	20013,32	P2.11	409,97	16,65	6826	P2.12	140,32	59,77	8386,93	P2.14	0	0	0	-	134,34	63,94	8589,70	P2.15	0	0	0	-
	17	0	0	0	-	0	0	0	-	173,92	94,91	16506,75	P2.16	0	0	0	-	173,92	94,91	16506,75	P2.16	0	0	0	-

Tab. 9.3.3a. Šířka, hloubka a plocha míst napadených korozi v konstrukčním uzlu plech – úhelník, expozice 480 h

vzorek	č. svaru	plech P1 - plech P2																							
		P1 volný povrch						P1 u svaru						P2 u svaru						P1 dál od svaru					
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.				
2AS	1	242,95	21,54	5233,14	P3.1	1249,82	27,58	34470,04	P3.2	1249,82	28,76	35944,82	P3.2	0	0	0	0	1895,27	27,45	52025,16	P3.4				
	5	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	269,02	14,45	3887,34	P3.5				
	9	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	1587,70	28,76	45662,25	P3.6				
	13	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	1084,54	14,27	15476,39	P3.7				
	17	0	0	0	-	351,46	15,51	5451,14	P3.3	240,64	14,32	3445,96	P3.3	0	0	0	0	851,16	13,14	11184,24	P3.10				
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0				
vzorek	č. svaru	plech P1 - plech P2												plech P2 - úhelník Ú											
		P2 dál od svaru						P1 mimo kontakt						P2 mimo kontakt						P2 u svaru					
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.				
2AS	1	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	221,20	26,46	5852,95	P3.13				
	5	1895,27	23,90	45296,95	P3.4	0	0	0	-	232,04	21,44	4974,94	P3.12	0	0	0	-	0	0	0	0				
	9	1587,70	39,54	62777,66	P3.6	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	157,54	14,05	2213,44	P3.14				
	13	409,11	15,46	6324,84	P3.7	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0				
	17	725,78	16,69	12113,27	P3.10	73,55	15,49	1139,29	P3.11	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0				
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0				

Pokračování tab. 9.3.4a

vzorek	č. svaru	Ú u svaru						plech P2 - úhelník Ú						Ú dál od svaru						P2 dál od svaru						Ú dál od svaru						P2 mimo kontakt						
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.					
2AS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	5	0	0	0	0	381,14	20,52	7820,99	P3.16	343,86	18,81	6468,01	P3.17	628,03	10,17	6387,07	P3.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	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	0	0	0	0	0	
	13	327,33	38,05	12454,91	P3.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	č. svaru	Ú volný povrch																																					
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.																														
2AS	1	78,93	30,44	2402,63	P3.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	9	119,61	61,58	7365,58	P3.21	219,32	85,35	18718,96	P3.22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	313,14	63,14	19771,66	P3.23	412,73	49,96	20619,99	P3.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 9.3.4a. Šířka, hloubka a plocha míst napadených korozi v konstrukčním uzlu plech – úhelník, expozice 1000 h

vzorek	č. svaru	P1 volný povrch						plech P1 - plech P2									
		P1 u svazu			P2 u svazu			P1 u svazu			P2 u svazu						
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.
2BS	1	0	0	0	-	0	0	0	-	380,84	20,52	7814,84	P4.3	347,32	20,22	7022,81	P4.6
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2BS	5	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	1649,81	89,83	148202,43	P4.7
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2BS	9	478,11	33,30	15921,06	P4.1	0	0	0	-	236,61	14,97	3542,05	P4.4	299,13	27,99	8372,649	P4.1
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	928,82	26,16	24297,93	P4.1
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	1508,58	40,71	61414,29	P4.8
		255,44	28,43	7262,16	P4.2	0	0	0	-	507,95	19,06	9681,53	P4.5	491,21	13,08	6425,027	P4.10
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2BS	17	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		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	č. svaru	P2 dál od svazu						plech P1 - plech P2									
		P2 mimo kontakt			P1 mimo kontakt			P2 mimo kontakt			P1 mimo kontakt						
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š·h	č. obr.
2BS	1	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	329,74	19,10	6298,03	P4.14
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	293,69	28,40	8340,80	P4.15
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2BS	5	1285,21	109,72	141013,24	P4.7	0	0	0	-	0	0	0	-	87,46	6,27	548,37	P4.16
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	149,88	3,58	536,57	P4.17
		1166,81	17,84	20815,89	P4.1	0	0	0	-	0	0	0	-	134,23	19,94	2676,55	P4.18
2BS	9	341,61	17,96	6135,32	P4.9	0	0	0	-	0	0	0	-	353,59	21,87	7733,01	P4.19
		960,37	35,85	34429,26	P4.8	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		97,18	13,17	1279,86	P4.11	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		145,61	23,61	3437,85	P4.12	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		588,71	24,97	14700,09	P4.10	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2BS	17	492,33	24,97	12293,48	P4.13	0	0	0	-	0	0	0	-	301,33	42,76	12884,87	P4.20
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-

Pokračování tab. 9.3.4a

vzorek	č. svaru	plech P2 - úhelník																							
		Ú u svaru						P2 dál od svaru						Ú dál od svaru						P2 mimo kontakt					
		š	h	š·h	č. obr.	š	h	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š	h	š·h	č. obr.	š	h	š	h	š·h	č. obr.		
2BS	1	0	0	0	-	927,02	13,08	12125,42	P4.21	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-		
		0	0	0	-	434,77	14,27	6204,17	P4.22	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-		
		0	0	0	-	318,84	13,08	4170,43	P4.23	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-		
		0	0	0	-	944,36	16,65	15723,59	P4.24	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-		
		0	0	0	-	155,83	21,12	3291,13	P4.25	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-		
2BS	5	146,87	9,22	1354,14	P4.16	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		172,45	12,19	2102,17	P4.18	1329,73	17,84	23722,38	P4.26	434,50	15,51	6739,10	P4.27	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		436,50	17,96	7839,54	P4.19	449,50	15,51	6971,75	P4.27	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	676,32	22,72	15365,99	P4.27	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
2BS	13	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	223,29	23,19	5178,10	P4.28	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	0	-		
2BS	17	0	0	0	-	104,95	19,62	2059,12	P4.29	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	0	-			
		0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	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	č. svaru	Ú volný povrch					
		š	h	š·h	č. obr.	š	h
2BS	1	0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
2BS	5	61,09	58,22	3556,66	P4.32	0	0
		0	0	0	-	0	0
		258,10	49,05	12659,81	P4.33	0	0
		98,17	53,88	5289,40	P4.34	0	0
		0	0	0	-	0	0
2BS	13	0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
2BS	17	0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0
		0	0	0	-	0	0

9.3.5 Souhrn průměrných a maximálních hodnot korozního napadení

Z tabulek 9.3.1a až 9.3.4a byly vypočteny aritmetické průměry šířky ($\varnothing \check{s}$), hloubky ($\varnothing h$) a plochy ($\varnothing (\check{s}\cdot h)$) napadených míst jednotlivých vzorků. Z těchto vypočtených hodnot byly vytvořeny průměrné hodnoty pro skupiny vzorků se shodným konstrukčním uzlem a stejnou dobou expozice. Tyto hodnoty byly následně zapsány do tabulek (9.3.1b až 9.3.4b). Ve stejných tabulkách se nachází také maximální hodnoty šířky \check{s} , hloubky h a plochy $\check{s}\cdot h$ napadených míst stejných skupin vzorků.

V těchto souhrnných tabulkách jsou oranžovým rámečkem vyznačeny maximální hodnoty ze všech průměrných hodnot a červeným rámečkem maximální hodnoty ze všech maximálních hodnot. Červené písmeno P ve sloupečku maximálních hloubek znamená, že došlo k úplnému zkorodování celé ochranné hliníkové vrstvy na potahovém plechu až do základního materiálu AlCu4Mg1.

Tab. 9.3.1b Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot šířky, hloubky a plochy korozi napadených míst pro konstrukční uzel plech – úhelník a expozici 480 h

		480 h (IAS 1; 5; 9; 13; 17)							
		\check{s} [μm], h [μm], $\check{s}\cdot h$ [μm^2]							
		\varnothing				max			
P	P	$\varnothing (\varnothing \check{s})$	$\varnothing (\varnothing h)$	$\varnothing (\varnothing (\check{s}\cdot h))$	poč. měř.	max (max \check{s})	max (max h)	max (max $(\check{s}\cdot h)$)	poč. měř.
		0	0	0	5	0	0	0	5
P - Ú	P u svaru	854,52	33,00	35125,63	6	2332,33	46,38 P	108173,47	6
	Ú u svaru	787,42	25,00	19685,50	5	787,42	25,00	19685,50	5
	P dál od svaru	232,39	14,67	3410,47	7	264,31	16,65	4177,82	7
	Ú dál od svaru	1056,17	47,57	50242,01	5	1056,17	47,57	50242,01	5
	P mimo kontakt	776,75	20,22	15705,89	5	776,75	20,22	15705,89	5
Ú	Ú	177,96	50,90	9423,74	12	365,15	72,30	17519,90	12

Tab. 9.3.2b Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot šířky, hloubky a plochy korozi napadených míst pro konstrukční uzel plech – úhelník a expozici 1000 h

		1000h (IBS 1; 5; 9; 13; 17)							
		\check{s} [μm], h [μm], $\check{s}\cdot h$ [μm^2]							
		\varnothing				max			
P	P	$\varnothing (\varnothing \check{s})$	$\varnothing (\varnothing h)$	$\varnothing (\varnothing (\check{s}\cdot h))$	poč. měř.	max (max \check{s})	max (max h)	max (max $(\check{s}\cdot h)$)	poč. měř.
		0	0	0	5	0	0	0	5
P - Ú	P u svaru	629,31	19,70	14278,05	6	1171,18	24,97	28004,60	6
	Ú u svaru	1209,00	35,39	43214,87	5	1334,28	41,62	55532,73	5
	P dál od svaru	435,44	17,64	9293,08	6	1571,82	23,90	37566,50	6
	Ú dál od svaru	481,06	44,41	17226,02	6	1571,82	85,95	63988,79	6
	P mimo kontakt	409,97	16,65	6826,00	5	409,97	16,65	6826,00	5
Ú	Ú	146,37	52,75	7896,97	6	153,92	94,91	14608,55	6

Tab. 9.3.3b Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot šířky, hloubky a plochy korozi napadených míst pro konstrukční uzel plech – úhelník a expozici 480 h

		480 h (2AS 1; 5; 9; 13; 17)							
		š [μm], h [μm], š·h [μm ²]							
		∅				max			
		∅ (∅ š)	∅ (∅ h)	∅ (∅ (š·h))	poč. měř.	max (max š)	max (max h)	max (max (š·h))	poč. měř.
P1	P1	242,95	21,54	5233,14	5	242,95	21,54	5233,14	5
P1 - P2	P1 u svaru	800,64	21,55	19960,59	5	1249,82	27,58	34470,04	5
	P2 u svaru	745,23	21,54	19695,39	5	1249,82	28,76	35944,82	5
	P1 dál od svaru	1031,97	20,19	23784,31	8	1895,27	28,76	52025,16	8
	P2 dál od svaru	1134,03	24,00	31371,33	7	1895,27	39,54 P	62777,66	7
	P1 mimo kontakt	73,55	15,49	1139,29	5	73,55	15,49	1139,29	5
	P2 mimo kontakt	232,04	21,44	4974,94	5	232,04	21,44	4974,94	5
P2 - Ú	P2 u svaru	189,37	20,26	4033,19	5	221,20	26,46	5852,95	5
	Ú u svaru	327,33	38,05	12454,91	5	327,33	38,05	12454,91	5
	P2 dál od svaru	381,14	20,52	7820,99	5	381,14	20,52	7820,99	5
	Ú dál od svaru	343,86	18,81	6468,01	5	343,86	18,81	6468,01	5
	P2 mimo kontakt	977,59	11,66	11912,91	5	1327,15	13,14	17438,75	5
Ú	Ú	203,78	53,49	11880,24	5	412,73	85,35	20619,99	5

Tab. 9.3.3b Souhrnná tabulka průměrných a maximálních hodnot šířky, hloubky a plochy korozi napadených míst pro konstrukční uzel plech – úhelník a expozici 480 h

		1000h (2BS 1; 5; 9; 13; 17)							
		š [μm], h [μm], š·h [μm ²]							
		∅				max			
		∅ (∅ š)	∅ (∅ h)	∅ (∅ (š·h))	poč. měř.	max (max š)	max (max h)	max (max (š·h))	poč. měř.
P1	P1	366,78	30,87	11591,61	5	478,11	33,30 P	15921,06	5
P1 - P2	P1 u svaru	0	0	0	5	0	0	0	5
	P2 u svaru	375,13	18,18	7012,81	5	507,95	20,52	9681,53	5
	P1 dál od svaru	850,13	38,69	48252,97	7	1649,81	89,83 P	148202,43	7
	P2 dál od svaru	719,41	44,79	45059,87	9	1285,21	109,72 P	141013,24	9
	P1 mimo kontakt	0	0	0	5	0	0	0	5
	P2 mimo kontakt	0	0	0	5	0	0	0	5
P2 - Ú	P2 u svaru	243,91	23,09	6487,88	8	353,59	42,76 P	12884,87	8
	Ú u svaru	225,67	12,15	3162,50	6	436,50	17,96	7839,54	6
	P2 dál od svaru	512,93	18,58	9091,64	12	1329,73	23,19	23722,38	12
	Ú dál od svaru	434,50	15,51	6739,10	5	434,50	15,51	6739,10	5
	P2 mimo kontakt	170,54	15,40	2968,14	6	304,09	17,96	5461,46	6
Ú	Ú	119,61	54,84	6265,63	6	258,10	58,22	12659,81	6

10. DISKUZE VÝSLEDKŮ

V následujícím textu jsou uvedeny experimentálně zjištěné údaje o korozním napadení zkoumaných konstrukčních uzlů a výsledky jejich matematického zpracování. Hodnoty jsou zaokrouhleny na celá čísla.

10.1 Maximální rozsah korozního napadení konstrukčních uzlů

Fotografie nejvíce napadených míst sledovaných konstrukčních uzlů (s vyznačením míst, ze kterých byla fotografie pořízena na barevném schématu daného konstrukčního uzlu) jsou zobrazeny na obrázcích dle následujícího rozpisu:

- Obr. 10.1 – konstrukční uzel plech – úhelník, expoziční čas 480 h
- Obr. 10.2 – konstrukční uzel plech – úhelník, expoziční čas 1000 h
- Obr. 10.3 – konstrukční uzel plech – plech – úhelník, expoziční čas 480 h
- Obr. 10.4 – konstrukční uzel plech – plech – úhelník, expoziční čas 1000 h

10.1.1 Maximální šířky napadených míst

Maximální šířky míst napadených korozi jsou ve všech případech větší než 1500 μm . V konstrukčním uzlu plech – úhelník pro dobu expozice 480 h (obr. 10.1) dosahuje šířka hodnoty $\check{s} = 2332 \mu\text{m}$ a nachází se ve spojení plechu P a úhelníku Ú (počátek napadeného místa je v bezprostřední blízkosti svaru). Tato hodnota je největší ze všech naměřených hodnot pro obě doby expozice a pro oba konstrukční uzly.

Pro tentýž konstrukční uzel, ale dobu expozice 1000 h (obr. 10.2) jsou nejširší napadená místa dvě. Obě se nacházejí na stejném vzorku (1BS9) v kontaktu plechu P a úhelníku Ú dál od svarového spoje a leží nad sebou. Hodnota jejich šířky je $\check{s} = 1572 \mu\text{m}$.

V konstrukčním uzlu plech – plech – úhelník je pro expoziční čas 480 h (obr. 10.3) hodnota šířky korozi napadeného místa $\check{s} = 1895 \mu\text{m}$ a je tedy větší než pro delší expoziční čas 1000 h (obr. 10.4), kde maximální šířka dosahuje hodnoty $\check{s} = 1650 \mu\text{m}$. V obou případech se jedná o místa kontaktu plechu P1 s plechem P2 dál od svarového spoje.

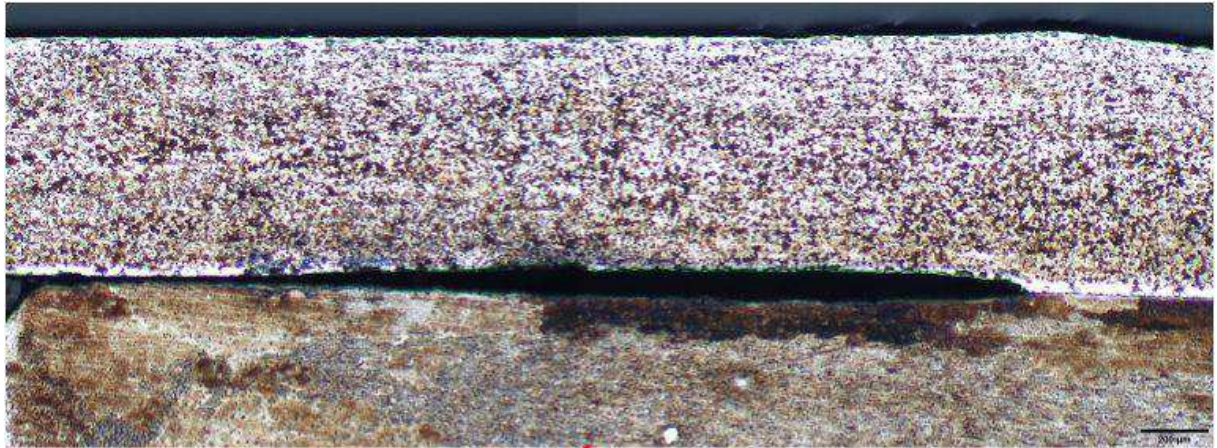
10.1.2 Maximální hloubky napadených míst

Místa napadená korozi, ve kterých došlo k největšímu zeslabení nosné konstrukce, nazýváme **kritická místa konstrukčního uzlu**. Jsou to největší hloubky korozního napadení v daném konstrukčním uzlu při dané době expozice, v tab. 9.3.1b až 9.3.4b jsou označena červeným rámečkem.

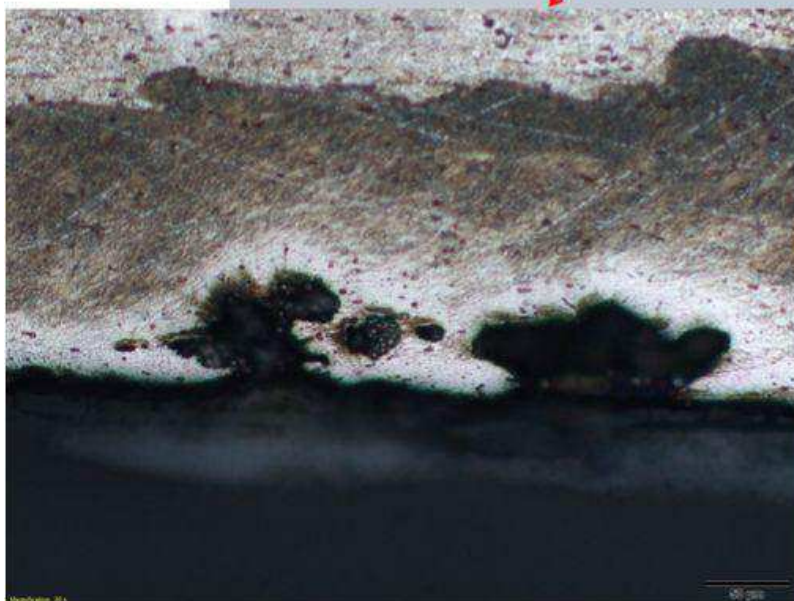
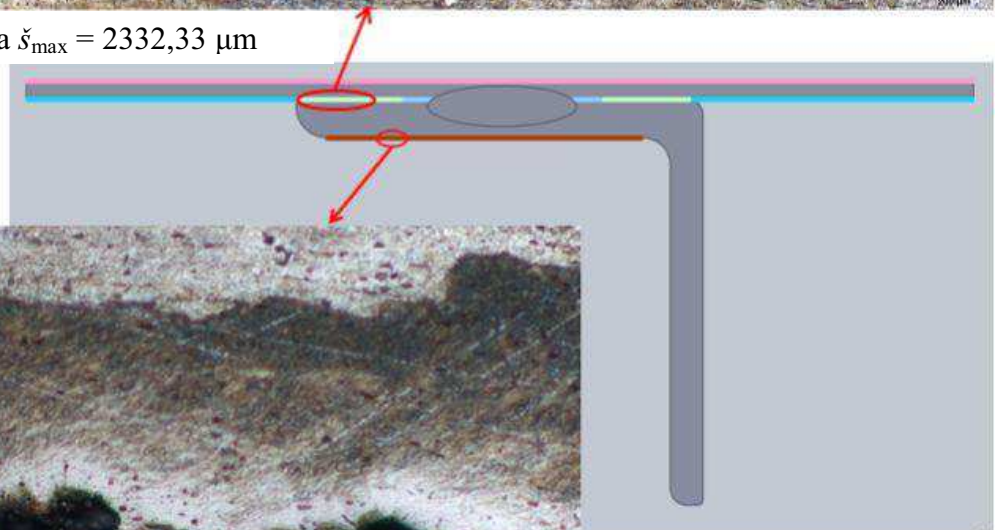
V případě konstrukčního uzlu plech – úhelník pro dobu expozice 480 h (obr. 10.1) má kritické místo hloubku $h = 72 \mu\text{m}$ a nachází se na volném povrchu úhelníku. Pro dobu expozice 1000 h (obr. 10.2) je kritickým místem také volný povrch úhelníku s hodnotou hloubky napadení $h = 95 \mu\text{m}$.

Pro konstrukční uzel plech – plech – úhelník je kritickým místem pro dobu expozice 480 h (obr. 10.3) opět volný povrch úhelníku s hloubkou napadení $h = 85 \mu\text{m}$.

Tentýž konstrukční uzel s dobou expozice 1000 h (obr. 10.4) má kritické místo na kontaktu plechů (P1 a P2). Napadení korozi zde dosáhlo do hloubky $h = 110 \mu\text{m}$ a jeho šířka je zároveň nejširším místem tohoto typu uzlu pro dobu expozice 1000 h.



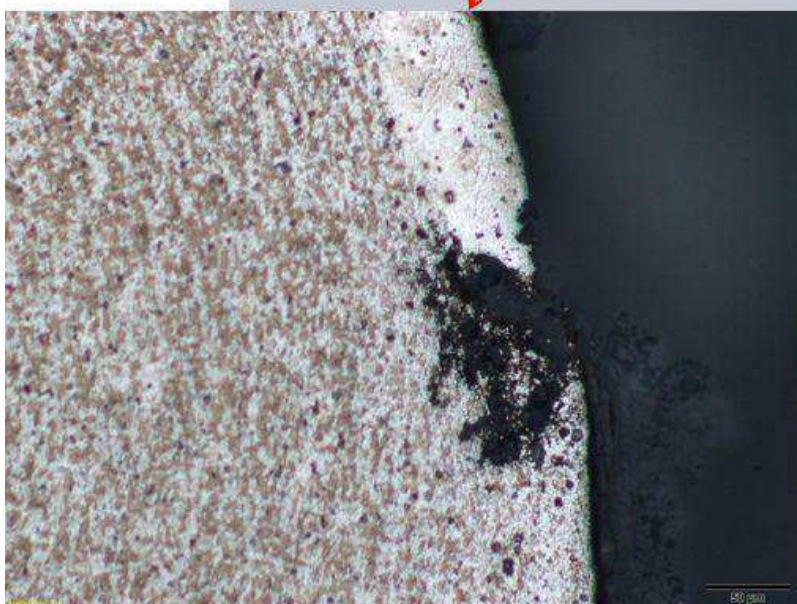
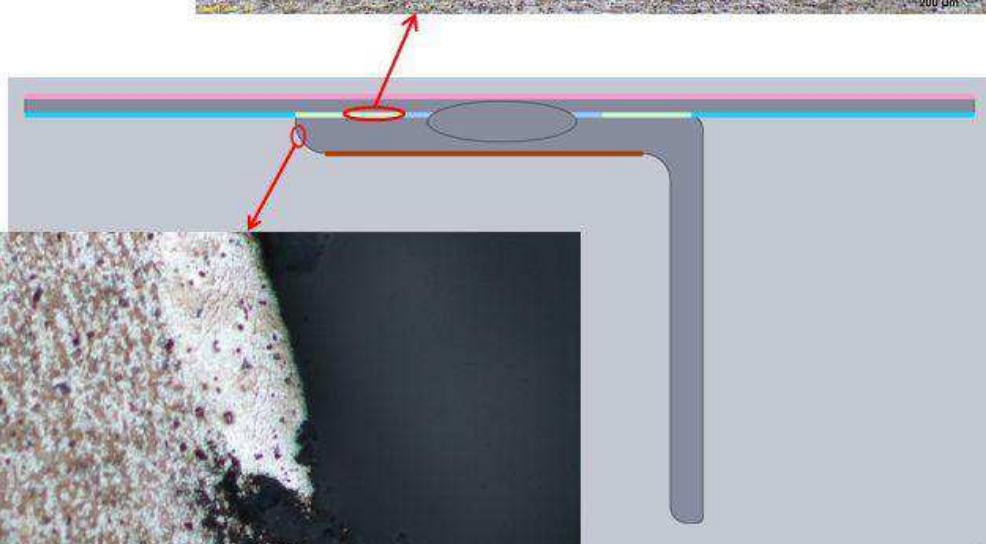
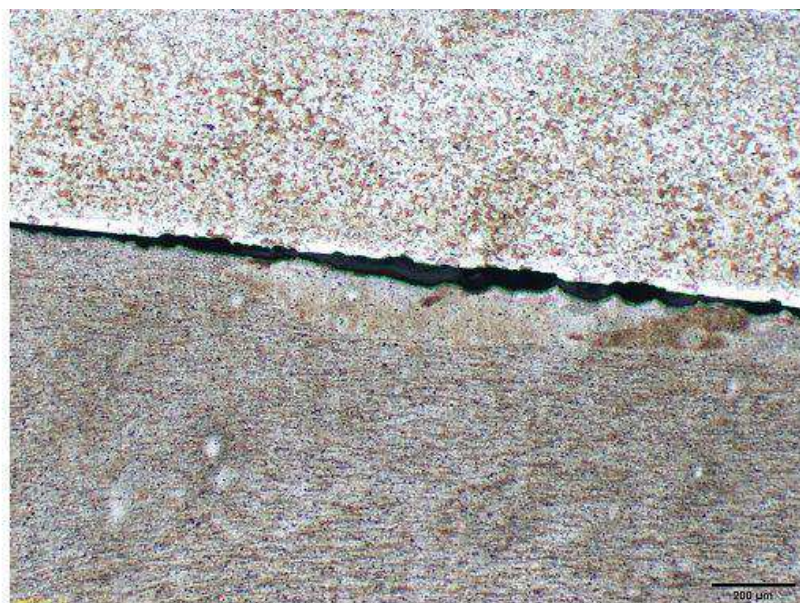
maximální šířka $\delta_{\max} = 2332,33 \mu\text{m}$



maximální hloubka
 $h_{\max} = 72,30 \mu\text{m}$

Obr. 10.1. Příklad korozního napadení na konstrukčním uzlu plech – úhelník, doba expozice 480 h

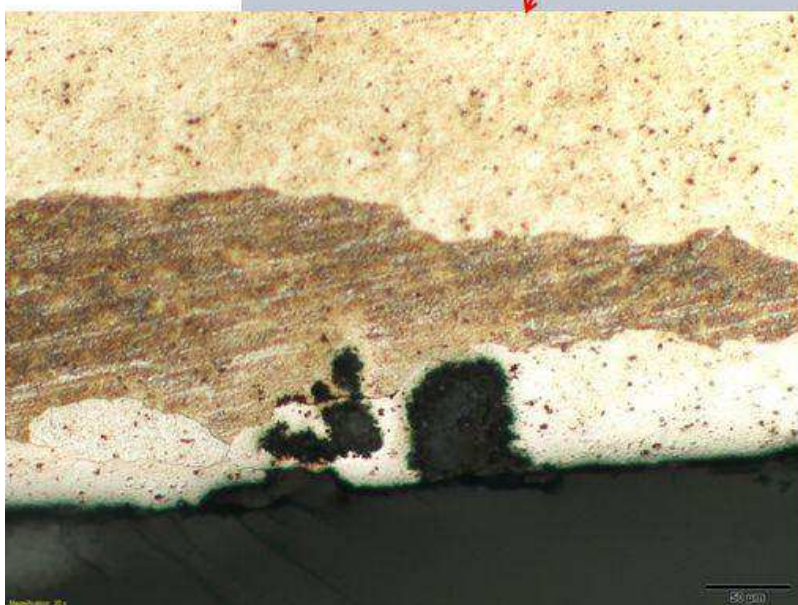
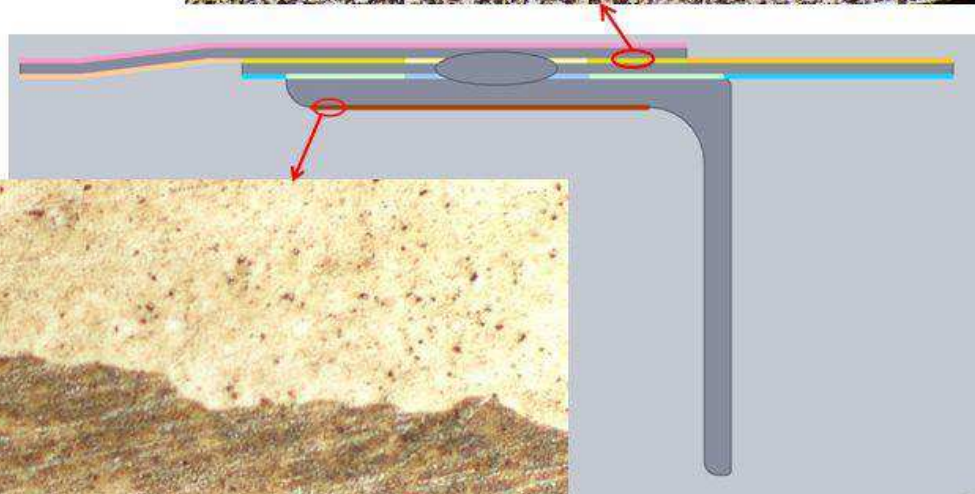
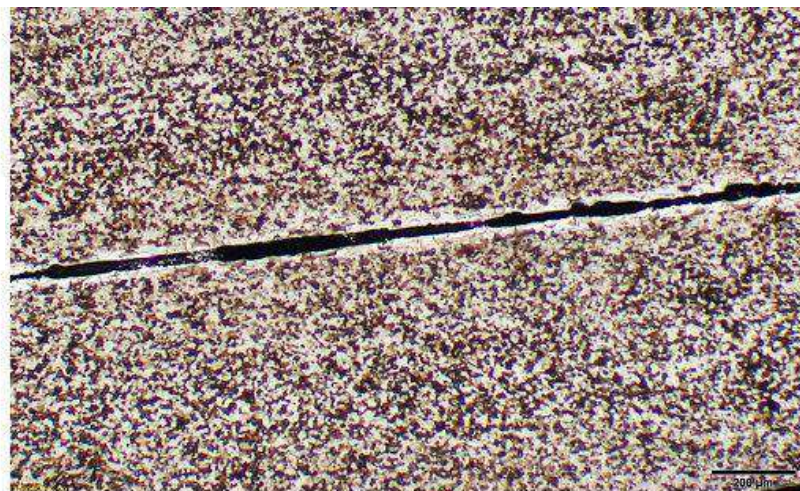
maximální šířka
 $\check{s}_{\max} = 1571,82 \mu\text{m}$



maximální hloubka
 $h_{\max} = 94,91 \mu\text{m}$

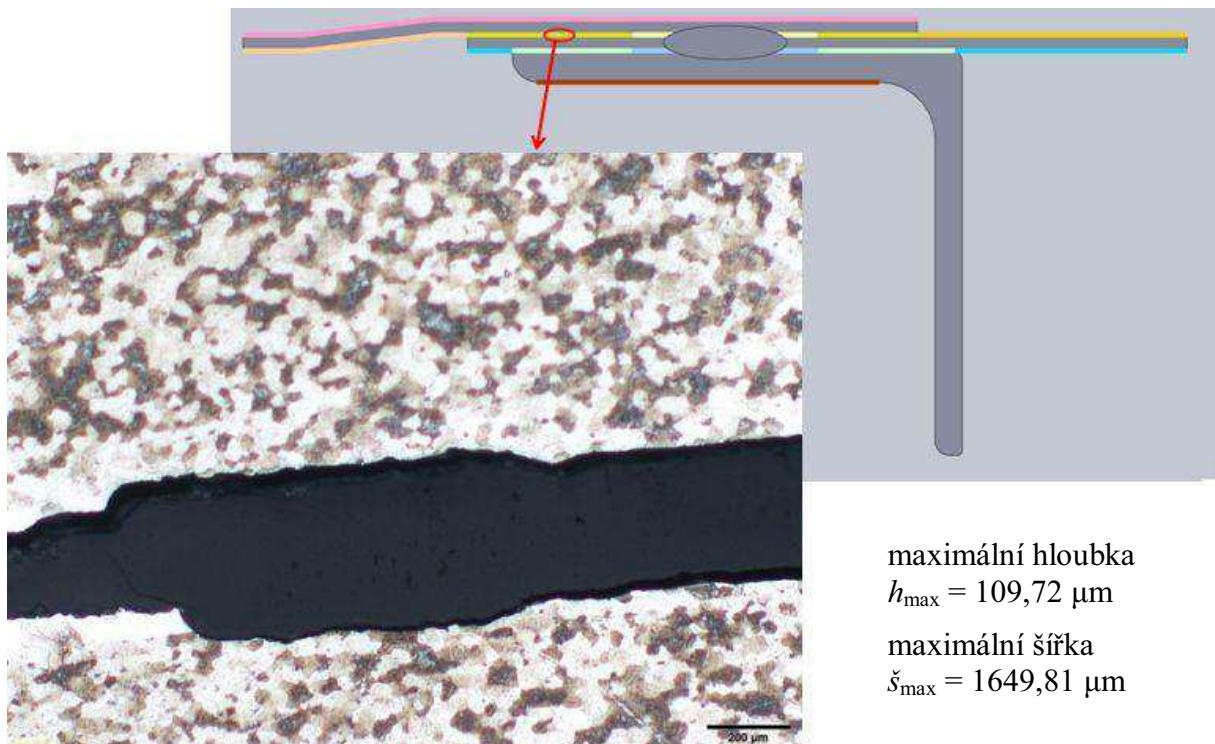
Obr. 10.2. Příklad korozního napadení na konstrukčním uzlu plech – úhelník, doba expozice 1000 h

maximální šířka
 $\delta_{\max} = 1895,27 \mu\text{m}$



maximální hloubka
 $h_{\max} = 85,35 \mu\text{m}$

Obr. 10.3. Příklad korozního napadení na konstrukčním uzlu plech - plech - úhelník, doba expozice 480 h



Obr. 10.4. Příklad korozního napadení na konstrukčním uzlu plech - plech – úhelník, doba expozice 1000 h,

10.2 Průměrné hodnoty korozního napadení konstrukčních uzlů

10.2.1 Průměrné šířky napadených míst

Maximální hodnoty průměrných šířek $\bar{\sigma}$ se pro konstrukční uzel plech – úhelník nacházejí v kontaktu plechu P s úhelníkem Ú. Pro dobu expozice 480 h se jedná o místo v úhelníku dále od svarového spoje, maximální hodnota šířky zde je $\bar{\sigma} = 1056 \mu\text{m}$

U expozičního času 1000 h je napaden opět úhelník, ale napadené místo má počátek v bezprostřední blízkosti svarového spoje. Maximální průměrná hodnota šířky zde dosahuje hodnoty $\bar{\sigma} = 1209 \mu\text{m}$.

V konstrukčním uzlu plech – plech – úhelník a obou dobách expozice se maximální průměrné hodnoty šířek nacházejí v kontaktu plechu P1 s plechem P2 dále od svarového spoje. Pro dobu expozice 480 h je maximální hodnota průměrné šířky $\bar{\sigma} = 1134 \mu\text{m}$ a pro dobu expozice 1000 h maximální hodnota průměru dosahuje $\bar{\sigma} = 850 \mu\text{m}$.

10.2.2 Průměrné hloubky napadených míst

Maximální průměrné hodnoty hloubek korozně napadených míst jsou nacházeny převážně na volném povrchu úhelníku. Tyto hodnoty jsou současně maximálními hodnotami celého konstrukčního uzlu.

V konstrukčním uzlu plech – úhelník dosahuje maximální hodnota průměru pro dobu expozice 480 h $\bar{h} = 51 \mu\text{m}$ a $\bar{h} = 53 \mu\text{m}$ pro dobu expozice 1000 h.

V konstrukčním uzlu plech – plech – úhelník je maximum průměrných hloubek pro expoziční čas 480 h $\bar{h} = 53 \mu\text{m}$ a $\bar{h} = 55 \mu\text{m}$ pro expoziční čas 1000 h.

10.3. Hodnocení typu korozního napadení

Na hodnocených vzorcích byly nalezeny 3 typy koroze. Na volných površích potahových plechů se objevila koroze nerovnoměrná, na volných površích úhelníků koroze důlková. Ve všech styčných plochách (plech – úhelník, plech – plech) byla nalezena koroze štěrbinová, která buď částečně, nebo úplně zasahuje hliníkovou vrstvu potahových plechů.

11. ZÁVĚR

Po provedení všech dílčích částí celého experimentu (zkouška v korozní komoře v atmosféře neutrálního roztoku solné mlhy na panelu bez povrchové ochrany, měření korozního napadení na jednotlivých vzorcích v místech bodových svarů a následné vyhodnocení výsledků) se je možno konstatovat, že:

- 1) Bylo zjištěno, že v mnoha místech došlo k úplnému zkorodování naplátované hliníkové vrstvy až do základního materiálu AlCu4Mg1, který je proti korozi méně odolný. Proto na těchto místech hrozí větší rychlost šíření korozního napadení, s čímž souvisí větší poškození konstrukce. Vystává tedy otázka, zda je 99,5 % čistota hliníku dostatečná.
- 2) Nejčastěji napadaným místem konstrukčního uzlu plech – úhelník pro obě expoziční doby se jeví úhelník. Pravděpodobně je důvodem to, že materiál úhelníku (AlCu4Mg1) není pokryt hliníkovou vrstvou o čistotě 99,5 % a není tedy chráněn proti korozi tak, jako materiál plechů.
- 3) Nejčastěji napadaným místem konstrukčního uzlu plech – plech – úhelník se pro oba expoziční časy jeví spoj plechu P1 s plechem P2 ve větší vzdálenosti od svarového spoje.
- 4) Kritické místo konstrukčního uzlu plech – úhelník pro obě doby expozice je volný povrch úhelníku.
- 5) Kritické místo konstrukčního uzlu plech – plech – úhelník pro dobu expozice 480 h je volný povrch úhelníku.
- 6) Kritické místo konstrukčního uzlu plech – plech – úhelník pro dobu expozice 1000 h je na kontaktu plechů (P1 a P2).
- 7) Na volných površích plechů byla nalezena nerovnoměrná koroze.
- 8) Na volných površích úhelníků byla nalezena důlková koroze.
- 9) Ve všech styčných plochách (plech – úhelník, plech – plech) byla nalezena štěrbinová koroze.
- 10) Provedením experimentu se nepotvrdil kumulativní nárůst korozního napadení, protože místa největšího korozního napadení pro dobu expozice 1000 h nebyla stejná jako nejvíce napadená místa pro dobu expozice 480 h. Dále nebylo potvrzeno, že maximální hodnoty korozního napadení jednotlivých míst konstrukčních uzlů při expozici 1000 h jsou větší než při expozici 480 h.

12. 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] PTÁČEK, L. a kolektiv. *Nauka o materiálu I.* Brno: CERM, 2001. 505 s. ISBN 80 – 7204 – 193 – 2.
- [4] KUBÍČEK, J. *Technologie svařování - Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K - ÚST, odbor svařování a PÚ*. [PDF dokument]. [cit. 2011-1-23].
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani__5te_etv_etv-k__kubicek.pdf.
- [5] *New Aluminium Alloys and Fuselage Structures in Aircraft Design*.
URL: http://www.mat.ethz.ch/news_events/archive/materialsday/matday01/pdf/TempusMD.pdf [cit. 2010-12-22].
- [6] ČSN EN 573-1 (421401): Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 1: Číselné označování. Praha, Český normalizační institut, 2005. 12 s
- [7] ČSN 42 0055 (42 0055): Neželezné kovy. Číselné označování těžkých a lehkých neželezných kovů. Praha, Český normalizační institut, 1977. 12 s.
- [8] BARTONÍČEK, R. a kol., *Koroze a protikorozi ochrana kovů*, 1. vydání, Praha: Academia, 1966, 720 s.
- [9] PTÁČEK, L. a kolektiv, *Nauka o materiálu II.*, Brno: CERM, 1999. 350 s. ISBN 80 – 7204 – 130 – 4.
- [10] *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.
- [11] ČSN 03 8137 (038137): Ochrana proti korozi. Kovy, slitiny a kovové povlaky. Metalografické vyhodnocování koroziho napadení. Praha, Český normalizační institut, 1989. 20 s.
- [12] ČERNÝ, M. a kol., *Korozi vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*, 1. vydání, Praha SNTL, 1984, 264 s, DT 620.193:669.018.

- [13] TULKA, J. *Corrosion of Aluminium Alloys*, Trondheim
- [14] *Nekovové anorganické povlaky pro součásti vojenské techniky*, Český obranný standard, Vojenský technický ústav ochrany Brno, 2005, 86 s.
- [15] TULKA, J. *Povrchové úpravy materiálů*. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 136 s. ISBN 80-214-3062-1.
- [16] ČSN ISO 7384 (03 8120): Korozní zkoušky v umělé atmosféře. Všeobecné požadavky. Praha, Český normalizační institut, 1994. 8 s.
- [17] ČSN EN ISO 9227 (03 8132): Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Praha, Český normalizační institut, 2007. 24 s.

13. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al_2O_3	oxid hlinitý
HDP	hrubý domácí produkt
FCC	kubická plošně středěná mřížka
R_m	mez pevnosti [MPa]
A	tažnost [%]
HB	tvrdost podle Brinella
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
K_C	součinitel lomové houževnatosti [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$]
$a_{kI(\sigma=\sigma_y)}$	kritická délka trhliny [m]
ČSN	česká technická norma
ČSN EN	evropská technická norma
GP zóny	Guinier – Prestonovy zóny
pH	záporný dekadický logaritmus molární koncentrace rozpuštěných hydroniových iontů
HCl	kyselina chlorovodíková
H_3PO_4	kyselina fosforečná
H_2SO_4	kyselina sírová
H_2CrO_4	kyselina chromová
$(\text{COOH})_2$	kyselina šťavelová
OP-S	koloidní roztok SiO_2
FUSS	hliníkový substrát (7,5ml HF, 8 ml HNO_3 , 25 ml HCl a 1000 ml H_2O)
\check{s}	šířka místa napadeného korozi
h	hloubka místa napadeného korozi

14. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Obrazová dokumentace korozního napadení konstrukčního uzlu plech – úhelník, doba expozice 480 h

Příloha 2 - Obrazová dokumentace korozního napadení konstrukčního uzlu plech – úhelník, doba expozice 1000 h

Příloha 3 - Obrazová dokumentace korozního napadení konstrukčního uzlu plech – plech – úhelník, doba expozice 480 h

Příloha 4 - Obrazová dokumentace korozního napadení konstrukčního uzlu plech – plech – úhelník, doba expozice 1000 h