

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



**Materiálová analýza stárnutí multiportové
trubky z hliníkové slitiny**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Tomáš Krs

Vedoucí práce: Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Praha 2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tomáš Krs

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Materiálová analýza stárnutí multiportové trubky z hliníkové slitiny

Název anglicky

Material analysis of ageing of aluminium alloy multiport pipe

Cíle práce

Cílem diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o stárnutí materiálu z hliníkových slitin. Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice, ve které se zaměří především na typy tepelných výměníků pro klimatizační jednotku v osobním automobilu, kde se využívají MPE (Multiport Extruded tubes). Popíše přehled používaných slitin a jejich vlastnosti, které se pro dané výměníky používají. V praktické části student provede testy, které simulují životní cyklus výměníků. Z naměřených výsledků vyhodnotí vliv změny tlaku a teploty na stárnutí materiálu.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše),

Cíl práce a metody jejího zpracování,

Výsledky experimentů a jejich diskuse,

Závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

MPE trubka, hliníková slitina, stárnutí, koroze, HVAC, výměník

Doporučené zdroje informací

CABALLERO, F., G. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys. Elsevier, 2022.

COTTIS, B., GRAHAM, M., LINDSAY, R., RICHARDSON, T. Shreir's Corrosion. Elsevier, 2010.

MICHNA, Š.: Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005, 700 s.

POLMEAR, I. J., STJOHN, D., NIE, J. QIAN, M.: Light alloys: metallurgy of the light metals. Elsevier Science & Technology, 2017, 545 s.

ROUČKA, J.: Metalurgie neželezných slitin. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s.

SOLFRONK, P., NOVÁ, I., NOVÁKOVÁ, I. Tvařitelnost slitin hliníku. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 154 s.

Vědecká literatura: Journal of Materials Processing Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, Journal of materials science, Manufacturing technology.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 20. 10. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11. 12. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 02. 03. 2024

Čestné prohlášení


„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Materiálová analýza stárnutí multiportové trubky z hliníkové slitiny“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 31. března 2024


.....
Bc. Tomáš Krs

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Bc. Ing. Petru Hraběmu, Ph.D. z katedry materiálu a strojírenské technologie za připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Valeo a to především Ing. Martinu Myslikovjanovi a Ing. Janu Forstovi za umožnění vzniku této práce, konzultace a cenné informace.

Abstrakt:

Diplomová práce se v teoretické části soustředí na hliník a jeho slitiny, jakožto důležitý materiál pro tepelné výměníky a především konkrétně pro multiportové extrudované trubky. Je zde také nastíněn základní princip a dělení tepelných výměníků. V praktické části dochází k návrhu testovací matice vycházející z popsáního problému, následuje popis výroby vzorků, analýza výsledků testování a doporučené řešení.

Klíčová slova: MPE trubka, hliníková slitina, stárnutí, koroze, HVAC, tepelný výměník

Abstract:

The theoretical part of the thesis focuses on aluminium and its alloys as an important material for heat exchangers and in particular for multiport extruded tubes. The basic principle and division of heat exchangers is also outlined here. In the practical part, the design of the test matrix is based on the described problem, followed by the description of the sample preparation, the analysis of the test results and the recommended solution.

Keywords: MPE tube, aluminium alloy, aging, corrosion, HVAC, heat exchanger

Obsah

1. ÚVOD	9
2. SPOLEČNOST VALEO	10
2.1. VÝVOJOVÉ CENTRUM PRAHA	10
2.2. VÝROBNÍ ZÁVODY V ČR	11
3. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY	12
3.1. ZÁKLADNÍ DĚLENÍ	12
3.2. FYZIKÁLNÍ PRINCIP	14
3.2.1. Šíření tepla	14
3.2.2. První termodynamický zákon	15
3.2.3. Druhý termodynamický zákon	16
3.3. CHLADIVA	17
3.3.1. R134a	20
3.3.2. R1234yf	21
3.3.3. R744	22
3.4. VÝMĚNÍKY VYUŽÍVAJÍCÍ MPE	22
3.5. ZKOUŠKY R744 VÝMĚNÍKŮ	24
3.5.1. Zkouška životního cyklu	24
3.5.2. PACT	28
4. HLINÍK	30
4.1. ZÁKLADNÍ CHEMICKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	31
4.2. VÝROBA	31
4.3. SLITINY	32
4.4. KOROZE	35
4.4.1. Rovnoměrná (uniformní) koroze	37
4.4.2. Důlková (bodová) koroze	38
4.4.3. Mezikrystalová koroze	38
4.4.4. Transkrystalová koroze	39
4.4.5. Šterbinová koroze	40
4.4.6. Koroze po vrstvách	40
5. MPE TRUBKA	42
5.1. VÝROBA	42
5.2. TVRDÉ PÁJENÍ	44
5.3. OCHRANA PŘED KOROZÍ	46
6. NÁVRH TESTOVACÍ MATICE	49

7. PŘÍPRAVA VZORKŮ	55
7.1. PREPARACE TRUBEK.....	55
7.2. VYČIŠTĚNÍ A ZALEPENÍ.....	56
7.3. KOROZE AKCELEROVANÁ POLARIZACÍ.....	56
7.4. ZALITÍ VZORKU.....	57
7.5. BROUŠENÍ A LEŠTĚNÍ	58
7.6. LEPTÁNÍ NA ZRNO	58
7.7. NASNÍMÁNÍ DIGITÁLNÍM MIKROSKOPEM.....	59
8. ANALÝZA VÝSLEDKŮ TESTOVÁNÍ	60
8.1. DOPORUČENÁ OPATŘENÍ.....	61
9. ZÁVĚR.....	62
10. POUŽITÁ LITERATURA	64
11. SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK	69
12. PŘÍLOHY	73

1. Úvod

V moderním automobilovém průmyslu, kde je klíčovým faktorem efektivita a udržitelnost, se studium tepelných výměníků stává stále důležitějším aspektem inženýrského vývoje. Tato zařízení nejen ovlivňují tepelné procesy v automobilu z hlediska komfortu uživatele, ale také hrají klíčovou roli v dosahování nižší spotřeby energie a snižování emisí.



Obr. 1 Jednotka HVAC [1]

Tato diplomová práce se v teoretické části (kapitoly 3 až 5) zaměřuje na popis tepelných výměníků v osobních automobilech, na jejich dělení a základní fyzikální princip, a to včetně přehledu současně používaných chladiv. Dále se zabývá validačními testy výměníků využívajících chladivo R744. V poslední části popisuje multiportovou extrudovanou trubku (MPE) a zabývá se jejím nejběžnějším konstrukčním materiálem – hliníkem a jeho slitinami.

V rámci praktické části práce (kapitoly 6 až 9) byla provedena materiálová analýza výše zmíněných MPE trubek, které byly extrahované z rozdílně zatížených výměníků dle testovací matice. Je zde krok po kroku podrobně popsán samotný proces výroby vzorků, jejich ucelený přehled, a nakonec interpretace získaných dat.

Cílem této práce je tedy nejen poskytnout komplexní pohled na současný stav v oblasti tepelných výměníků, ale také aktivně přispět k diskusi o vývoji materiálů výměňkových trubek. Zvýšením odolnosti jednotlivých komponent automobilu se prodlužuje jeho celková životnost, což je žádoucí jak z pohledu zákazníka, tak z pohledu ekonomie a ekologie.

2. Společnost Valeo

Valeo je jedním z předních globálních dodavatelů automobilového průmyslu a inovačním partnerem pro výrobce automobilů po celém světě. Společnost byla založena v roce 1923 ve Francii. Od té doby prošla výrazným vývojem a rozšířila svou působnost na globální trhy. Celá skupina zaměstnává 113 600 lidí v 33 zemích [2]. Hlavními činnostmi společnosti Valeo jsou vývoj, výroba a prodej technologií a komponent v oblasti automotive. V České republice společnost zaměstnává 4 428 lidí a provozuje 5 výrobních závodů [3].

Valeo se specializuje především na tyto čtyři oblasti:

- **Comfort & Driving Assistance Systems** (technologie pro bezpečnější, intuitivnější, propojenější a více autonomní řízení),
- **Powertrain Systems** (vývoj inovativních řešení pro snižování emisí CO₂ v oblasti elektrifikace, automatizovaných převodovek a čistých motorů pro vozidla),
- **Thermal Systems** (optimalizace tepelného managementu vozidla a pohody cestujících),
- **Visibility Systems** (vývoj technologií zajišťujících nejlepší viditelnost a bezpečnost řidičů za všech povětrnostních podmínek).



Obr. 2 Logo společnosti [2]

2.1. Vývojové centrum Praha

V rámci České republiky má společnost Valeo jedno samostatné vývojové centrum, které sídlí v Praze – Strašnicích. Ve 4 budovách zde pracuje zhruba 700 inženýrů na inovacích v oblasti systémů aktivní bezpečnosti a autonomního řízení. Software i hardware inženýři spolu s mechanickými designéry, testovacími a systémovými inženýry vyvíjí systémy pro ochranu posádky a komfort při jízdě. Jde například o parkovací systémy, nouzové brzdění, hlídání mrtvého úhlu či čtení dopravních značek. V centru se starají ale i o komfort v kabině vozu, který zajišťuje oddělení vývoje autoklimatizací a ovládacích panelů v interiéru.

Pod toto vývojové centrum spadá i vysokorychlostní testovací polygon v Milovicích, kde se ověřuje správná funkce prototypů i nových výrobků za všech podmínek a situací.

2.2. Výrobní závody v ČR

Celkem zde působí 5 výrobních závodů, které dohromady zaměstnávají zhruba 3600 zaměstnanců [3].

Rakovník

Nachází se zde dva výrobní závody. První byl postaven v roce 1995 a vyrábí se zde plastové díly na vstřikovacích lisech. Jde například o ovládací panely, přední masky s aktivní mřížkou, ale i o ultrazvukové senzory pro parkovací asistenty. V roce 2019 zde byla přistavena další výrobní hala, která rozšířila výrobu v oblasti senzorů – dešťové, světelné, detekční kamery aj.

Humpolec

Tento závod byl založen v roce 2002. Pomocí nejnovějších technologií obrábění a montáže se zde produkuje kompresory pro klimatizační jednotky vozidel jak s motory s vnitřním spalováním, tak pro elektromobily.

Podbořany

Od roku 2006 se v tomto závodě produkuje centrální vypínače spojek, hlavní spojkové válce a posilovače brzd. Tímto se závod řadí do divize Powertrain Systems.

Žebrák

Jedná se o moderní výrobní závod (obr. 3) patřící do produktové divize Thermal systems. Od roku 2001 se zde vyrábí tepelné výměníky, jako jsou výparníky, chladiče plynu, chladiče EGR, PTC moduly a chladiče baterií. Tato závěrečná práce vznikla právě v tomto výrobním závodě.



Obr. 3 Výrobní závod v Žebráku

3. Tepelné výměníky

Jedná se o zařízení navržené k přenosu tepla mezi dvěma médii s různými teplotami. Jeho hlavním účelem je efektivní výměna tepla mezi těmito médii tak, aby se dosáhlo požadované teploty nebo regulace tepla v procesu. Tepelné výměníky jsou často používány v různých průmyslových, komerčních a domácích aplikacích k úsporám energie a optimalizaci tepelných procesů.

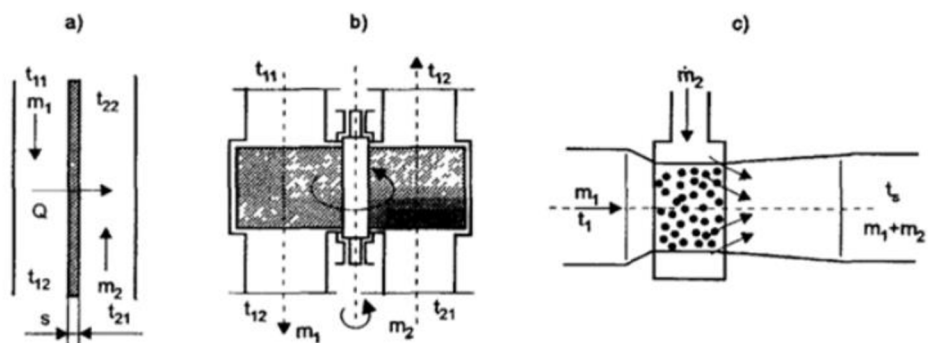
Základní konstrukce tepelného výměníku nejčastěji zahrnuje dvě oddělené trubkové nebo deskové sekce pro proudění obou médií. Tyto sekce jsou navrženy tak, aby umožňovaly co nejefektivnější přenos tepla mezi nimi, aniž by došlo k fyzickému smíšení samotných médií. Při provozu jedno médium získává teplo z druhého, což může být využíváno k procesu ohřevu nebo chlazení, a tím dochází k regulaci teploty. Tepelné výměníky jsou široce využívány ve většině odvětví průmyslu, včetně chemického průmyslu, energetiky, potravinářství a klimatizace.

3.1. Základní dělení

Existuje mnoho druhů tepelných výměníků, kde každý typ je vhodný pro jinou aplikaci. Dle kritérií je lze rozdělit do jednotlivých skupin:

Dle pracovního pochodu

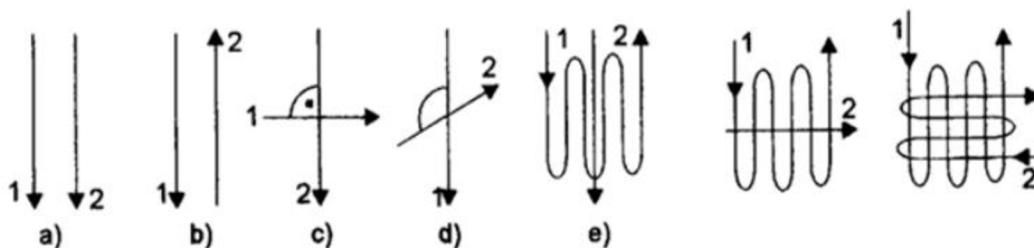
- rekuperační – nepropustná stěna odděluje dvě média v tekutém stavu, tepelný tok směřuje skrze tuto stěnu,
- regenerační – do vymezeného prostoru obsahujícího tepelně-akumulační hmotu nejdříve vtéká médium odevzdávající teplo (v případě chlazení přijímající teplo) a s časovým zpožděním do stejného prostoru proudí médium přijímající teplo (v případě chlazení odevzdávající teplo),
- směšovací – na rozdíl od předchozích typů dojde k vytvoření směsi tvořené oběma teplotonosnými médii, např. vstříkovaním.



Obr. 4 Výměníky dle pracovního pochodu [4]

Dle typu proudění

- a) souproudé – osy proudů obou médií jsou paralelní a vektory rychlostí mají stejný směr,
- b) protiproudé – osy proudů obou médií jsou paralelní a vektory rychlostí mají opačný směr,
- c) křížové – osy proudů spolu v průmětu svírají pravý úhel,
- d) šikmé – osy proudů spolu v průmětu svírají jiný než pravý úhel,
- e) kombinované – různé kombinace možností a) až d).



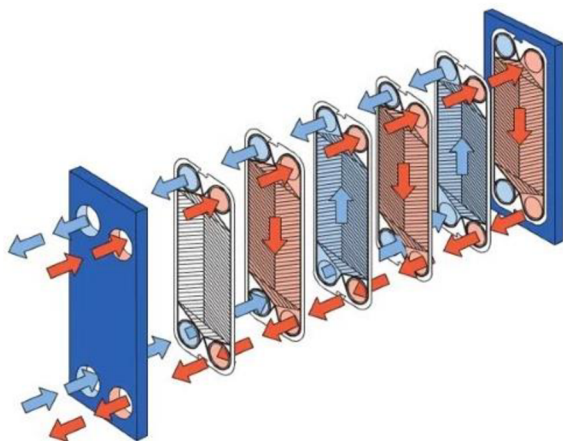
Obr. 5 Výměníky dle typu proudění [4]

Dle účelu použití

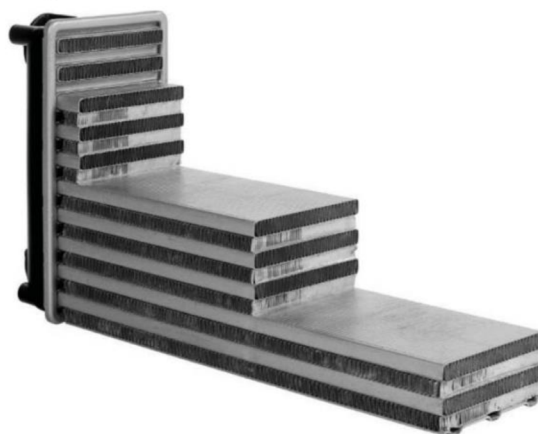
- a) ohříváky – ohřivané médium zvyšuje svou teplotu bez změny skupenství,
- b) chladiče – ochlazované médium snižuje svou teplotu bez změny skupenství,
- c) výparníky – ohřivané médium přechází z kapalné do plynné fáze,
- d) kondenzátory – teplejší médium v plynné fázi kondenzuje a stává se kapalným,
- e) přehříváky – zahřívají již sytou nebo přehřátou páru.

Dle konstrukce

- a) bubnové
- b) deskové
- c) trubkové
- d) svazkové
- e) šroubové
- f) hadové
- g) žebrové
- h) vlásenkové,..



Obr. 6 Deskový výměník [5]



Obr. 7 Řez mezichladiče stlačeného vzduchu [1]

Dle použitého média

Kombinace teplonosných tekutin, např.:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| a) voda – voda, | d) pára – voda, |
| b) voda – vzduch, | e) pára – vzduch, |
| c) vzduch – vzduch, | f) spaliny – voda,.. |

3.2. Fyzikální princip

Z hlediska fyziky, a především konkrétně termodynamiky, se v oblasti výměníků uplatňuje mnoho zákonitostí a principů. Pro obecnou představu jsou v následujících 3 podkapitolách uvedeny ty úplně základní:

3.2.1. Šíření tepla

V tepelných výměnících se obvykle uplatňují všechny 3 druhy přenosu tepla v různém poměru dle typu:

1. Vedení (kondukcce)

Přenos tepla vedením probíhá uvnitř tělesa a je charakterizován jeho tepelnou vodivostí k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Tepelná vodivost je schopnost materiálu tělesa vést teplo. Vedení tepla je výsledkem přenosu energie z energeticky silnějších částic látky na méně energetické částice v důsledku interakcí mezi částicemi bez jakéhokoli hmotnostního toku. Např. prostup tepla skrz stěnu trubky.

2. Proudění (konvekce)

Tento mechanismus přenosu tepla je spojen s pohybem hmoty. Přesněji řečeno, přenos energie vysvětlují dva nadřazené mechanismy: náhodný pohyb molekul (nazývaný také difúze) a hmotný pohyb tekutiny (nazývaný také advekce). Rozlišujeme nucené proudění (např. pomocí pumpy) a přirozené proudění (způsobené nerovnoměrnou distribucí teploty, a tedy i hustoty v rámci média). Pro výměníky typicky jde o nucené proudění obou médií.

3. Sálání (radiace)

Třetím mechanismem přenosu tepla je sálání. Atomy a molekuly hmoty vyzařují energii jako elektromagnetické vlny. Na rozdíl od kondukce a konvekce nevyžaduje přenos energie zářením žádné médium. Proto těleso ve vakuu vyzařuje energii zářením, zatímco kondukcí ani konvekcí energii přenášet nemůže. Důležité zákonitosti sálání popisuje Planckův, Wienův, Stefanův–Boltzmannův a třetí Kirchoffův zákon. U tepelných výměníků užívaných v automobilech je tento způsob šíření zanedbatelný.

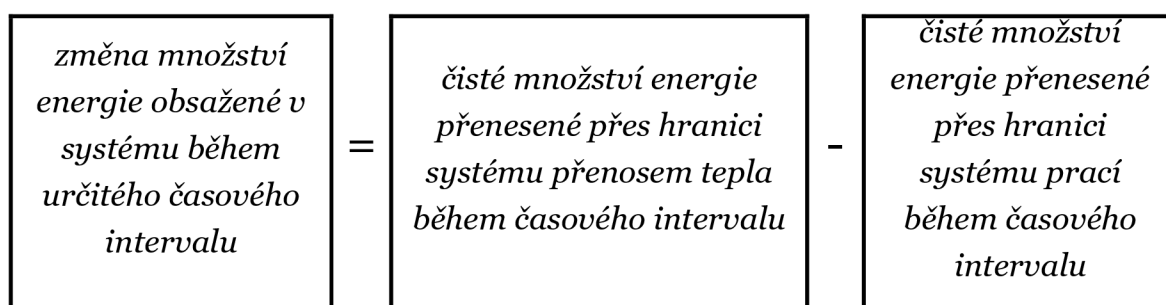
3.2.2. První termodynamický zákon

První termodynamický zákon říká, že energii nelze vytvořit ani zničit, ale pouze přeměnit z jedné formy na druhou. Jinými slovy, popisuje zachování energie. Matematicky jej lze zapsat v různých formách, například v diferenciálním tvaru:

$$dE = \delta Q - \delta W$$

Rov. 1 [6](*E – energie, Q – teplo, W – práce*)

Neboli zapsáno slovně:

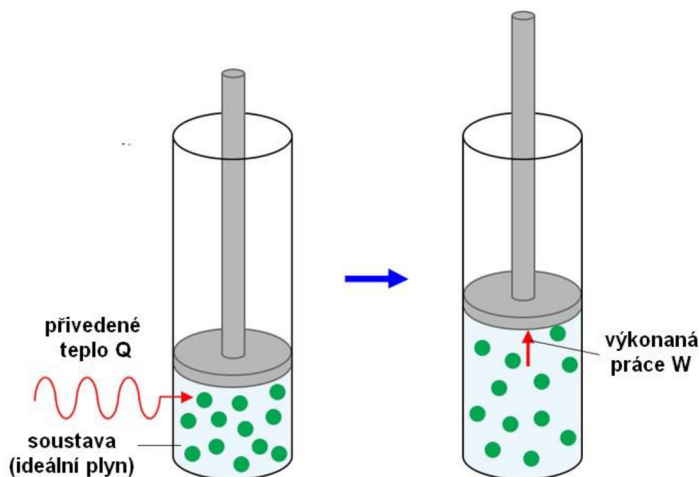


Alternativní forma rovnice, rozlišující jednotlivé druhy energie a difference konečné velikosti, zní:

$$\Delta KE + \Delta PE + \Delta U = Q - W$$

Rov. 2 [6]

(*KE – kinetická energie, PE – potenciální energie, U – vnitřní energie*)



Obr. 8 Vizualizace I. termodynamického zákona [7](přeloženo)

První zákon termodynamiky je základním principem, který se používá k analýze a návrhu tepelných výměníků. Pomocí tohoto zákona je možné vypočítat tepelný výkon výměníku, jeho účinnost a navrhnout výměník tak, aby splňoval požadované parametry. V případě výměníků používajících MPE trubky jde především o aktivní plochu a počet průchodů chladiva.

3.2.3. Druhý termodynamický zákon

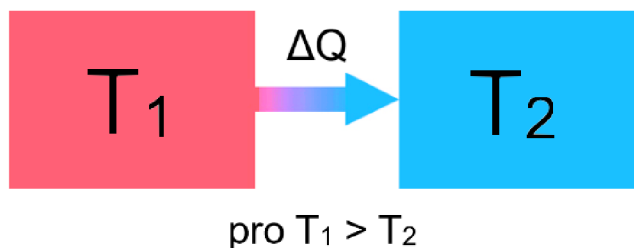
Druhý termodynamický zákon popisuje, že entropie (neuspořádanost) izolovaného systému nikdy neklesá. Matematicky se zákon zapisuje takto:

$$\frac{\delta Q}{T} \leq dS$$

Rov. 3 (Q – teplo, T – termodynamická teplota, S – entropie) [6]

Z toho plyne Clausiova formulace, která zní:

„Teplo nemůže při styku dvou těles různých teplot samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na těleso teplejší.“ [1]



Obr. 9 Vizualizace II. termodynamického zákona

Druhý zákon termodynamiky má pro tepelné výměníky několik důležitých důsledků. Za prvé, teplo vždy proudí z teplejší tekutiny na chladnější tekutinu. To znamená, že tepelný výměník nemůže přenášet teplo z chladnější tekutiny na teplejší tekutinu bez dodání vnější energie. Tato energie může být dodána například mechanickou prací, elektrickou energií nebo chemickou energií.

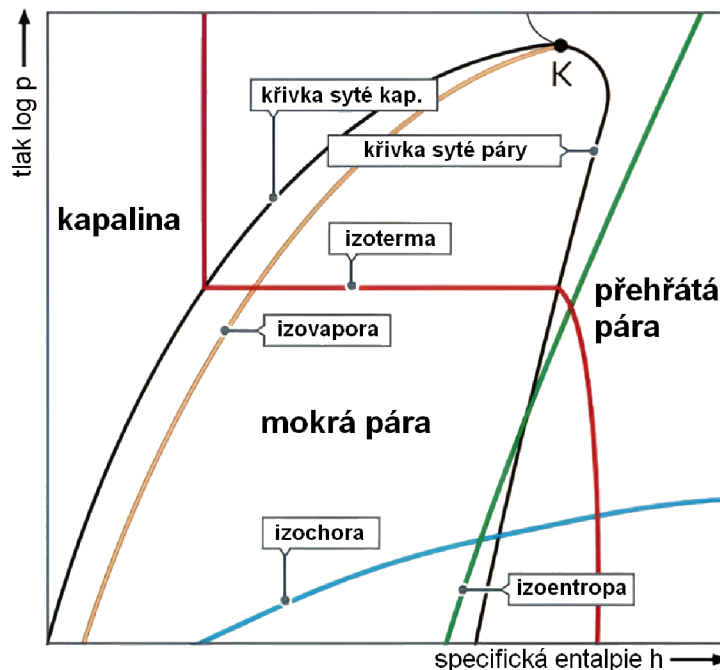
Za druhé, pro dosažení maximálního přenosu tepla je nutné udržovat co největší teplotní rozdíl mezi tekutinami. Čím větší je teplotní rozdíl, tím větší je přenos tepla. Teplotní rozdíl mezi tekutinami se může zvětšovat vhodnou změnou konstrukce výměníku tepla.

Za třetí, celková entropie tekutin a výměníku se během procesu výměny tepla vždy zvyšuje. Toto zvýšení entropie odpovídá přechodu z uspořádanějšího stavu do neuspořádanějšího stavu, přičemž ztráty energie v tepelných výměnících jsou spojeny se zvyšováním entropie.

3.3. Chladiva

Chladiva hrají v autopřemyslu klíčovou roli v systémech HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning – vytápění, větrání, klimatizace), chlazení motoru a s nastupující elektromobilitou i pro chlazení lithiových baterií. Vzhledem k pracovní teplotě spalovacího motoru a k běžné teplotě okolí k jeho chlazení postačí směs vody (H_2O) s etylenglykolem (ethan-1,2-diol), nedochází zde k fázovým přeměnám a teplotně odolné médium postačí cirkulovat pomocí čerpadla, protože jak bylo vysvětleno v kapitole 3.2.3., teplo vždy směřuje z místa s větší teplotou (v tomto případě spalovací motor) do místa s nižší teplotou (v tomto případě okolní vzduch).

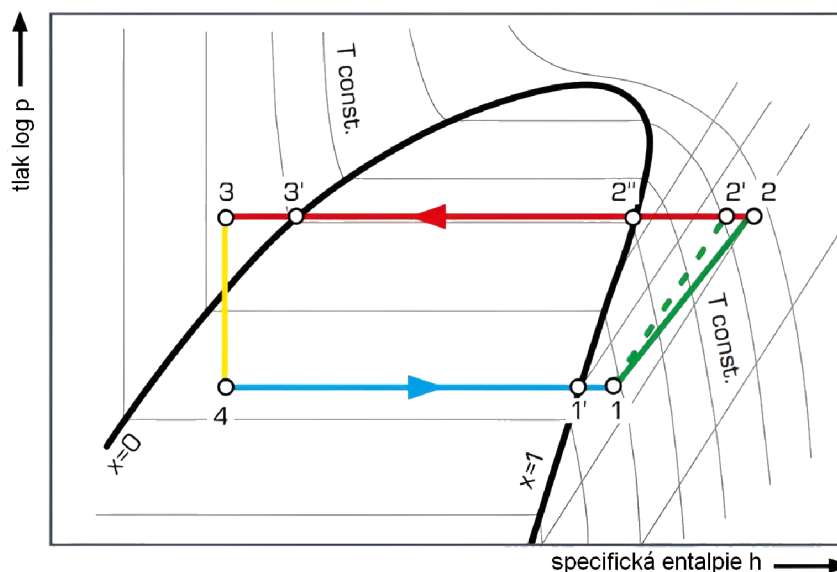
Jinak tomu ovšem je v systémech HVAC, kde běžně potřebujeme odvést teplo z prostředí s nižší teplotou (např. kabina vozu 30 °C) do prostředí s vyšší teplotou (venkovní vzduch 40 °C), zároveň zde jsou relativně nízké teplotní rozdíly, tudíž nedostatečný teplotní gradient. Zde se používají chladiva, která během cyklu mění své skupenství. Pro popis těchto změn v závislosti na podmínkách se používá Mollierův diagram (někdy též p-H diagram), který je pro každou látku jedinečný a obecně má tuto podobu:



Obr. 10 Obecný Mollierův diagram [8](přeloženo)

Na svislé ose je logaritmicky znázorněn tlak a na vodorovné ose lineárně měrná entalpie. V grafu jsou vodorovně znázorněné izobary (křivky s konstantním tlakem) a izoentaly (křivky s konstantní entalpií) svisle. Logaritmické škálování umožňuje znázornit procesy s velkými tlakovými rozdíly. Bod K znázorňuje kritický bod.

Do Mollierova diagramu lze zakreslit i průběh konkrétního cyklu. V případě chladících zařízení jde o levotočivou souslednost, viz následující obrázek:



Obr. 11 Mollierův diagram [8] (přeloženo)

zeleně – pracuje kompresor, červeně – kondenzátor, žlutě –expanzní ventil, modře –výparník

Slovně lze cyklus chladiva znázorněný na obr. 11 popsat takto [9]:

1–2	polytropická komprese na kondenzační tlak
2–2‘	izobarické chlazení přehřáté páry
2‘ – 3‘	izobarická kondenzace
3‘–3	izobarické chlazení kapaliny
3–4	izoentalpická expanze na výparný tlak
4–1‘	izobarické vypařování
1‘–1	izobarické zahřívání do oblasti přehřáté páry

Výjimkou je chladivo R744, kde část cyklu probíhá nad kritickým bodem, tzn. nad teplotou 31 °C a tlakem 73 bar, viz tab. 1. V tomto stavu se chladivo chová spíše jako plyn než jako kapalina, čímž se liší od běžných chladicích cyklů, které pracují s kapalnou a plynnou fází chladiva. Potom mezi body 2 a 3 nemluvíme o kondenzaci, ale o chlazení plynu.

V současné době se v osobních automobilech v prostoru EU používají 3 hlavní chladiva (refrigeranty), jejichž klíčové vlastnosti jsou uvedené v následující tabulce:

Chladivo	R-134a	R-1234yf	R-744
Typ	HFC	HFO	přírodní
Sumární vzorec	C ₂ H ₂ F ₄	C ₃ H ₂ F ₄	CO ₂
Kritická teplota [°C]	101	95	31
Kritický tlak [bar]	41	34	73
Cyklus vysoké zatížení [bar]	20–25	20–25	115
Cyklus nízké zatížení [bar]	10–15	10–15	65
GWP	1430	4	1
ODP	0	0	0
Cena (přibližně)		x10 oproti R134a	/10 oproti R134a

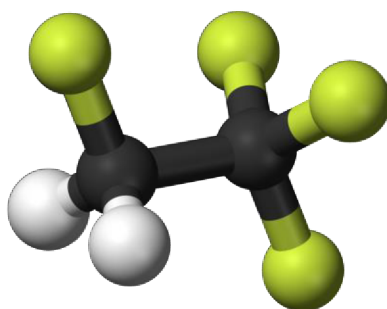
Tab. 1 Porovnání chladiv (na základě [3][10])

(GWP – Global Warming Potential, ODP - Ozone Depletion Potential)

3.3.1. R134a

Chladivo R134a (1,1,1,2-tetrafluoroethan) je hydrofluorouhlovodík (HFC), který se běžně používá v klimatizacích automobilů a domácností, chladničkách a mrazničkách. Je to bezbarvý, nezapáchavý a netoxický plyn [10].

R134a byl vyvinut jako náhrada za chladivo R12 (dichlordifluormethan), které poškozují ozonovou vrstvu. R134a je sice šetrnější k životnímu prostředí než R12, ale stále způsobuje skleníkový efekt. V roce 2016 v Kigali schválila Evropská unie dohodu, která reguluje používání HFC, včetně R134a. [11] To znamená, že se bude postupně omezovat výroba a používání R134a a budou se hledat ekologičtější alternativy.



Obr. 12 Molekula 1,1,1,2-Tetrafluoroethanu [12]

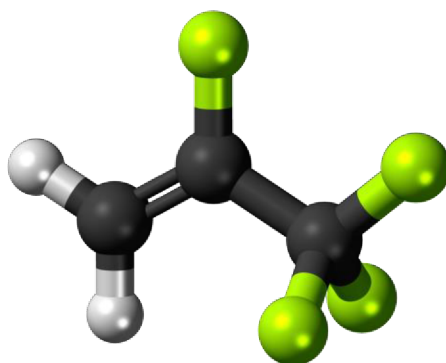
černá – uhlík, bílá – vodík, zelená – fluor

R134a má vysokou účinnost chlazení, jelikož má dobrou tepelnou vodivost a nízkou viskozitu. Díky tomu je efektivní při přenosu tepla. Chladivo je také netoxické a nehořlavé, takže je bezpečné pro použití v chladicích systémech. R134a je kompatibilní s mnoha materiály, které se běžně používají v chladicích systémech, a je také široce dostupné a relativně levné [10].

Hlavní nevýhodou tohoto chladiva je vysoké GWP (viz tab. 1), což znamená, že je vysoce potentní v oblasti skleníkového efektu. Dále je to jeho náchylnost na úniky ze systému, což nejenže snižuje účinnost, ale také zvyšuje znečištění ovzduší. Z těchto důvodů se postupně nahrazuje ekologičtějšími alternativami.

3.3.2. R1234yf

Chladivo R1234yf, známé také pod názvy HFO-1234yf či jen 1234yf, představuje novou generaci chladiv, která vznikla jako odpověď na rostoucí obavy ohledně vlivu tradičních chladiv na životní prostředí. Toto chladivo patří do skupiny hydrofluorolefinů (HFO) a bylo vyvinuto jako ekologicky šetrnější alternativa k chladivům, která obsahují fluorchlortuhany (CFC) nebo hydrofluorochlortuhany (HCFC), známé svou škodlivostí pro ozónovou vrstvu a vysoký globální oteplovací potenciál [13].



Obr. 13 Molekula 2,3,3,3-tetrafluorpropenu [13]

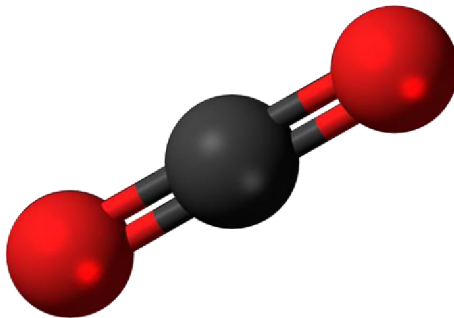
(černá – uhlík, bílá – vodík, zelená – fluor)

Toto chladivo se vyznačuje několika klíčovými fyzikálními vlastnostmi, které jsou důležité pro jeho použití. První z nich je nízký globální oteplovací potenciál (GWP) což znamená, že méně přispívá ke globálnímu oteplování než jeho předchůdci. Dále má nízkou hodnotu ozónové depleční potence (ODP), což znamená, že nemá škodlivý vliv na ozónovou vrstvu [14].

Hlavní aplikací chladiva 1234yf je v klimatizačních systémech automobilů. Toto chladivo se používá k chlazení vzduchu, který je následně distribuován do kabiny vozidla, aby se dosáhlo požadovaného komfortního prostředí pro cestující. Díky svým tepelným vlastnostem a environmentální bezpečnosti se stalo preferovanou volbou pro automobilové modely a klimatizační systémy vyráběné od začátku 21. století.

3.3.3. R744

Chladivo R744, známé také jako oxid uhličitý (CO_2), se stalo středem pozornosti v oblasti chlazení a klimatizace díky svým výjimečným vlastnostem a ekologickým přínosům. Toto chladivo je unikátní tím, že jde o přírodní látku, která je zcela neškodná pro ozónovou vrstvu a má GWP rovné 1 (je vlastně etalonem toho ukazatele).



Obr. 14 Molekula oxidu uhličitého [15]

(černá – uhlík, červená – kyslík)

Další výhodou chladiva R744 je jeho vysoká termodynamická potence, což umožňuje účinný přenos tepla a chlazení. Při vhodné aplikaci dosahují systémy s chladivem R744 vyšší energetické účinnosti než systémy s tradičními chladivy, což přispívá ke snižování energetické náročnosti, čímž se dosahuje udržitelnost provozu chladicích technologií.

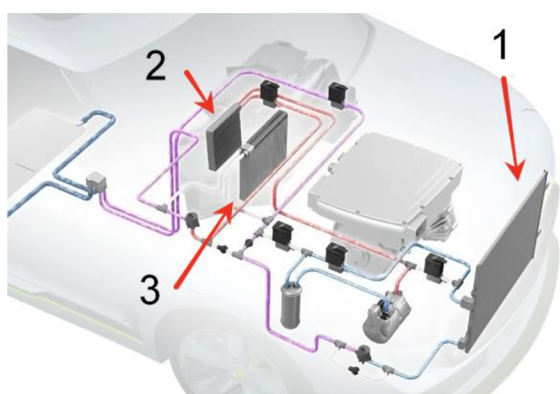
Zároveň je třeba zdůraznit, že použití chladiva R744 vyžaduje specifický design a technologie v chladicích systémech, jelikož během cyklu pracuje v tzv. nadkritickém režimu (viz tab. 1), a proto není vždy vhodným řešením pro všechny aplikace. Přesto se jeho význam nejen v autopřemyslu zvyšuje.

3.4. Výměníky využívající MPE

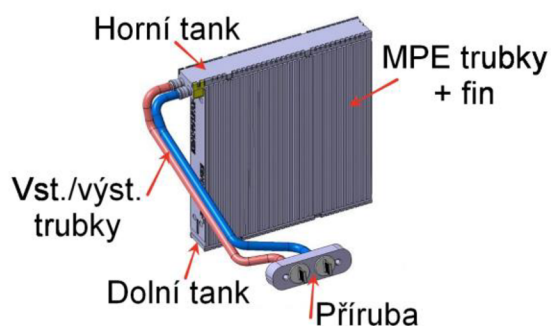
Tato podkapitola nastiňuje možné aplikace tepelných výměníků, které využívají multiportové extrudované trubky, se zaměřením na automotive. A jelikož kvůli zakazu prodeje osobních automobilů motorů s vnitřním spalováním od roku 2035 vývoj směřuje k elektrifikaci, tak i tam se bude soustředit tato podkapitola.

Vozy s elektrickým pohonem se ve srovnání se spalovacími motory vyznačují vysokou účinností. To znamená, že dokážou přeměnit více energie z baterie na kinetickou energii pro vlastní pohon. Účinnost elektromotorů se pohybuje v rozmezí 85-95 %, zatímco u spalovacích motorů je to pouze 20-30 %. To je sice pozitivní parametr z hlediska pohonu, nicméně z hlediska tepelného managementu to je zásadní problém. U motoru s vnitřním spalováním je přebytek odpadního tepla, které vzniká

při hoření paliva ve spalovacím prostoru, a toto teplo může být následně využito při vyhřevu kabiny. Jinak je tomu u elektromobilů, kde odpadní teplo není k těmto účelům využitelné, jelikož ho jednoduše není dostatek. Proto se pro ohřev vzduchu musí používat jiná technologie. První možností je využít Jouleova tepla ve formě odporové spirály, do které teče elektrický proud z baterie. Takové řešení ale není energeticky hospodárné. V praxi se tedy do elektromobilů montují tepelná čerpadla, která umí fungovat jak v režimu topení, tak v režimu chlazení. Na obr. 15 je typická konfigurace takového systému. Všechny 3 výměníky využívají MPE trubky, protože ty zvládají odolávat vysokým tlakům systému na bázi chladiva oxidu uhličitého.



Obr. 15 Schéma HVAC elektromobilu



Obr. 16 Popis výměníku IGC

V režimu topení funguje výměník č. 1 jako výparník. To znamená, že přijímá teplo z venku. Výměník č. 2 funguje jako IGC (Inner Gas Cooler – vnitřní chladič plynu), což je obdoba kondenzátoru v systémech založených na médiu R744, kde ovšem nedochází k fázové přeměně. Výměník č. 3 je v tomto režimu neaktivní.

V režimu chlazení funguje výměník č. 1 jako OGC (Outer Gas Cooler – vnější chladič plynu), což je opět obdoba kondenzátoru bez fázové přeměny. Výměník č. 2 je v tomto režimu neaktivní. Výměník č. 3 funguje jako výparník, čímž ochlazuje vzduch vstupující do kabiny.

Na obr. 16 je model zmíněného IGC výměníku, který je důležitý pro praktickou část této práce, protože testované mikrokanálové trubky pocházejí právě z něj.

3.5. Zkoušky R744 výměníků

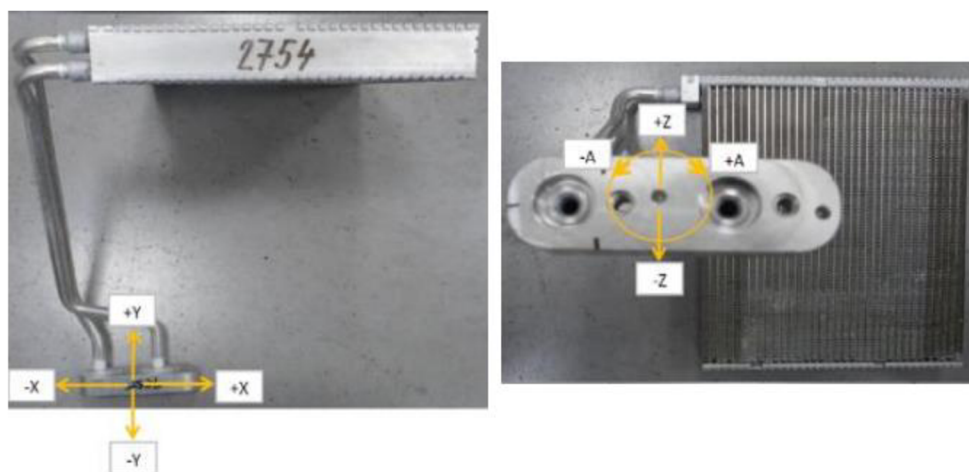
Existuje mnoho zkoušek, metod a norem, které mají za úkol ověřit funkci a bezpečnost výměníku jak pro uživatele, tak pro životní prostředí. Pro tuto práci jsou však zásadní dva typy zkoušek. První je zkouška životního cyklu, která ověřuje výměník z hlediska degradace během používání, čehož je dosaženo urychleným zatížením. Druhá zásadní zkouška se nezaměřuje na celý výměník, ale pouze na korozní odolnost mikrokanálových trubek, které tvoří teplosměnnou plochu.

3.5.1. Zkouška životního cyklu

Jde o soubor akcelerovaných testů, které simulují zatížení při provozu výrobku v krajních podmínkách. V případě R744 výměníků se skládá z těchto 7 kroků:

I) Manipulační zkouška

Během této zkoušky se simuluje mechanické zatížení, které na výměník může působit při montáži, kdy jej výrobní operátor vezme do ruky a posléze instaluje na příslušné místo v automobilu. Ověřuje se především odolnost pájených spojů trubka – příruba a trubka – blok, jelikož jde o pevnostně nejslabší místa.



Obr. 17 Manipulační zkouška [16]

Výměník se upne do svěraku a ve všech 3 osách X, Y, Z a v obou orientacích +, - se působí silou tak, aby došlo k relativnímu posunu referenčního bodu na přírubě o 5 milimetrů, maximálně však silou 100 N, což se ověřuje siloměrem. Poté se na přírubu aplikuje točivý moment 12 Nm pomocí momentového klíče, a to opět v obou orientacích po směru i v protisměru hodinových ručiček. Po tomto zatížení nesmí výměník vykazovat únik, což se ověřuje v dalším bodě zkoušky.

II) Zkouška heliové těsnosti

Vychází z normy SAE J2842: 2011 „Kritéria návrhu a certifikace R-1234yf a R744 výparníku mobilní klimatizace OEM a servisní výměny“ [17](přeloženo). V tomto kroku se nejdříve výměník uzavře do plynotěsné komory. Potom se vývěvou odstraní vzduch z komory i výměníku a ten se následně naplní heliem pod tlakem 20,4 MPa. Poté se detekuje velikost úniku, která nesmí přesáhnout hodnotu $1,7 \cdot 10^{-4}$ mbar·l·s⁻¹. Helium se používá z několika důvodů – je netoxické, inertní, nekondenzující, nehořlavé a v atmosféře se běžně nevyskytuje ve větším než stopovém množství (5 ppm)[3]. Díky své malé atomové velikosti helium snadno prochází netěsnostmi. Jedinou molekulou menší, než helium, je vodík, který ale není inertní. Helium je také relativně levné.

III) Zkouška alternující teploty

Během tohoto kroku se výměník umístí do klimatické komory a zároveň připojí na tlakové hydraulické rozvody. Proběhne 5 cyklů, kdy každý z nich se skládá ze 4 fází:

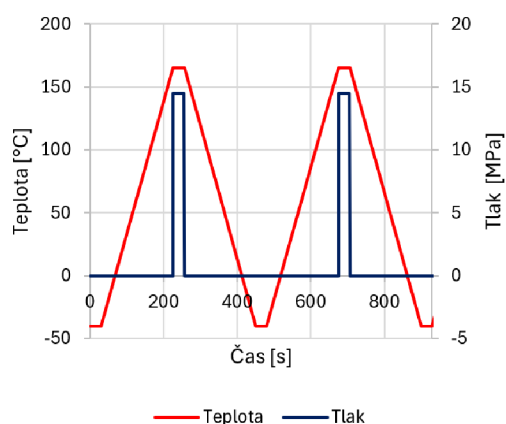
Fáze	1	2	3	4
Tlak [MPa]	0	0	14,5	0
Teplota [°C]	-40	165	165	-40
Délka trvání [min]	30	195	30	195

Tab. 2 Teplotní testovací profil (na základě [16])

Jde tedy o kombinované teplotní a tlakové namáhání, kdy se dosahuje rozdílu teplot 205 °C a rozdílu tlaku 14,5 MPa.



Obr. 18 Klimatická komora [16]



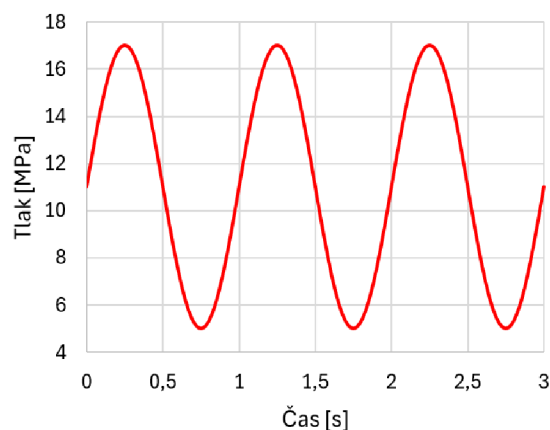
Obr. 19 Teplotní testovací profil

IV) Zkouška alternujícího tlaku

Zde je metodika zkoušky taková, že nejdříve se výměník opět připojí na hydraulické rozvody a poté tlak začne harmonicky oscilovat mezi 5 a 17 Mpa s frekvencí 1 Hz. Testovacím médiem je hydraulický olej o teplotě 165 °C. Počet cyklů, které musí výměník vydržet, je 150 000. Pokud dojde k úniku dříve, tak je daný kus označen jako nevyhovující.



Obr. 20 Testovací pracoviště [16]



Obr. 21 Tlakový testovací profil

V) Korozní zkouška

Tato zkouška vychází z normy ISO 9227 „Korozní testy v umělé atmosféře“ (přeloženo). Testované výměníky jsou na 24 hodin uzavřené v komoře při teplotě 35 °C, kde je po celou dobu produkována solná mlha o koncentraci $5\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ a pH 6,5-7,2 [18]. Při testu jsou trubky a příruba zakryty, jelikož nejsou součástí testované oblasti.



Obr. 22 Korozní komora [16]

VI) Zkouška heliové těsnosti

V tomto kroku je opět ověřena těsnost heliovým médiem, stejně jako ve druhém kroku. Platí stejný limit maximálního úniku a to $1,7 \cdot 10^{-4}$ mbar·l·s⁻¹. Pro srovnání, to odpovídá úniku zhruba 1,7 gramu chladiva R744 při tlaku 6,5 MPa za rok [3].

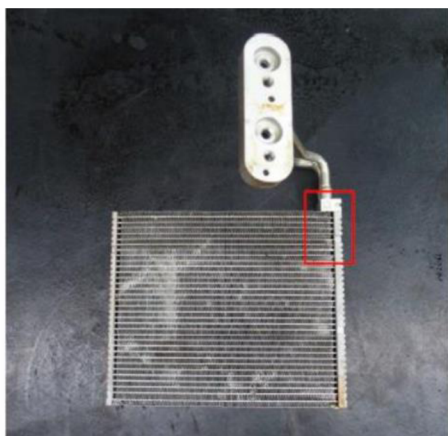
VII) Zkouška tlakové pevnosti

Jde o poslední krok, tzv. burst test, který je pro výměník vždy destruktivní. Blok se opět připojí na tlakovou hydraulickou stoliči. Poté se zvyšuje tlak hydraulického oleje o teplotě 165 °C nejdříve rychleji a poté pomaleji podle následujícího profilu o 4 fázích:

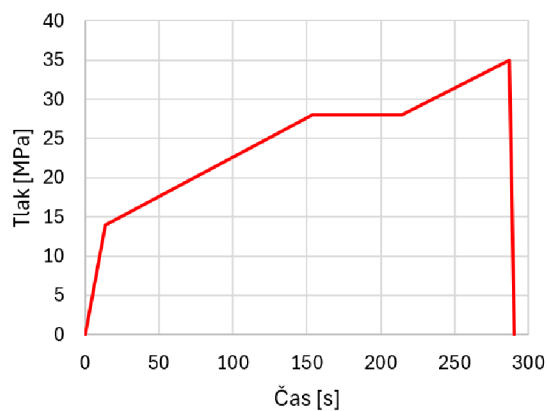
Fáze	1	2	3	4
Tlak [MPa]	14	28	28	Max.
Rychlost [Mpa·s⁻¹]	1	0,1	0	0,1
Délka trvání [s]	14	140	60	X

Tab. 3 Testovací profil tlakové pevnosti (na základě [16])

K selhání obvykle dojde v oblasti konektoru (červeně na obr. 23) při tlaku cca 35 MPa, což je zhruba dvojnásobek maximálního dovoleného tlaku pro tento typ výměníku na bázi chladiva oxidu uhličitého. Dále na obr. 24 je do grafu zanesen průběh tlaku v čase během zkoušky.



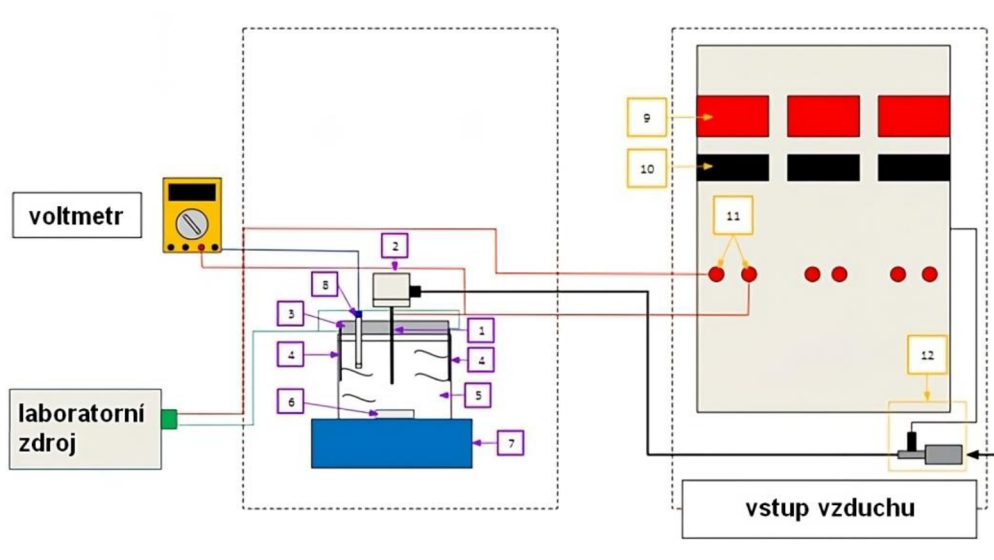
Obr. 23 Oblast úniku



Obr. 24 Testovací profil tlakové pevnosti

3.5.2. PACT

Tato metoda slouží k akcelerovanému koroznímu testování pomocí polarizace (Polarized Accelerated Corrosion Test), jehož výsledky pomáhají výběru a validaci vhodného materiálu. Jde o časově a finančně efektivní způsob zjištění korozního chování daného materiálu pomocí elektrochemických procesů. Hlavní zjevnou nevýhodou je nemožnost testování elektricky nevodivých vzorků materiálů, což vylučuje i povrchové úpravy jako je např. lakování či anodizace. Dalším omezením je možnost testovat pouze vzorky, které mají vnitřní objem, a tudíž je lze natlakovat.

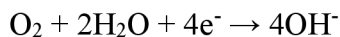
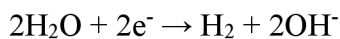


Obr. 25 Schéma PACT [3]

1 - vzorek, 2 - tlakovací hlavice, 3 - držák vzorku, 4 - nerezové elektrody, 5 - nádoba s roztokem, 6 - magnetická včelka, 7 - magnetické míchadlo, 8 - referenční elektroda (volitelné), 9 - zobrazení tlaku, 10 - hodiny, 11 - svorky, 12 - Staubli konektor

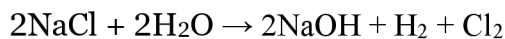
Principiálně jde o použití elektrolýzy, kde elektrolyt je tvořen roztokem chloridu sodného (NaCl) v demineralizované vodě (H₂O). Anoda je tvořena testovaným vzorkem a katody nerezovými plechy 316L o definovaných rozměrech. Zkoumaný objekt je natlakován stlačeným vzduchem na počáteční hodnotu 3,5 bar a skrz vzorek prochází konstantní elektrický proud, jež akceleroje korozi materiálu. Časem dojde k narušení celistvosti, což má za následek únik stlačeného vzduchu a pokles tlaku. Výsledkem je doba, za kterou tlak klesne pod specifikovanou hranici, konkrétně 1 bar. Čím korozně odolnější materiál, tím delší čas, než dojde k úniku.

Na anodě dochází k oxidaci, na katodách k redukci. Elektrochemické děje na elektrodách lze v případě hliníkového vzorku popsat následujícími rovnicemi:



Rov. 4 [3]

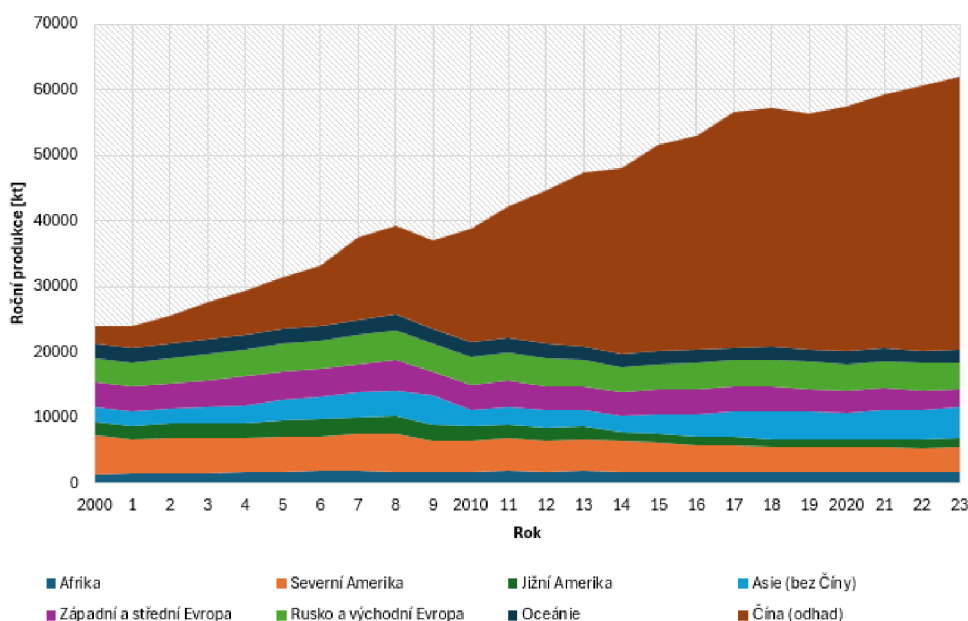
Zároveň na anodě (která je tvořena vzorkem) vzniká štěpením roztoku soli chlór (Cl_2), což je silné oxidační činidlo, které přímo reaguje s hliníkem za vzniku chloridu hlinitého (AlCl_3). Na katodě vzniká hydroxid sodný (NaOH), což je silně zásaditá anorganická sloučenina, která dále akceleruje korozní pochody, viz kapitola 4.4. Celkovou rovnicí elektrolýzy lze zapsat takto:



Rov. 5 [3]

4. Hliník

Hliník je po kyslíku (49,13 %) a křemíku (26 %) třetí nejrozšířenější prvek na Zemi (7,45 %) [19]. Od roku 1886, kdy jej poprvé vědci Paul Héroult and Charles M. Hall extrahovali pomocí elektrolýzy, našel uplatnění v široké škále odvětví – stavebnictví, elektrotechnice, automobilovém průmyslu a mnoha dalších. Dopravní průmysl (letecký, automobilový, kolejový a lodní), se zasazuje o 59 % [20] celkové celosvětové spotřeby hliníku. Produkci primárního hliníku jasně dominuje Čína. Celkově se v roce vyrobilo více než 60 megatun této suroviny, jak je vidět na následujícím grafu:



Obr. 26 Produkce primárního hliníku, na základě dat[21]

Jedná se o materiál, který vyniká nízkou hustotou, díky čemuž jsou výrobky lehké při zachování dobrých mechanických vlastností. V porovnání s ocelí je jeho hustota zhruba třetinová. Jeho další předností je odolnost proti korozi, jelikož na povrch hliníku vzniká ochranná vrstva oxidu Al_2O_3 , která materiál chrání před další korozi. Díky vysoké tepelné vodivosti nachází uplatnění ve výměnících a chladičích. Dále se používá v elektrotechnice, jelikož to je výborný elektrický vodič. Také je dobře recyklovatelný, a to bez ztráty kvality. Nízká teplota tání hliníku usnadňuje jeho zpracování a tváření, včetně lití do forem. Nachází se v rozličných horninách, hlavně v bauxitu, který zajišťuje dostatek surovin pro průmyslovou výrobu. Mezi alternativní zdroje patří nefelín, syenit a alunit, které ale kvůli vyšší náročnosti extrakce tvoří minoritní zdroj hliníku [20].

4.1. Základní chemické a fyzikální vlastnosti

V následující tabulce je přehled vybraných vlastností a veličin, které charakterizují hliník jako prvek i konstrukční materiál:

latinsky	aluminium	měr. tepel. kap.	896 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
značka	Al	hustota	2,7 g·cm ⁻³
kategorie	kovy	krystal. struktura	FCC
barva	šedá metalická	Youngův modul	70 GPa
atom. číslo	13	pevnost v tahu	60 Mpa
atom. hmotnost	26,98	tažnost	25 %
teplota tání	660,32 °C	el. konduktivita	37,7·10 ⁶ S·m ⁻¹
tepelná vodivost	237 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	st. elektrod. pot.	-1,33 V

Tab. 4 Přehled základních vlastností hliníku (na základě [22])

4.2. Výroba

Způsobů výroby hliníku je několik. Zde je popsán nejběžnější průmyslový přístup k této problematice, který se v zásadě dělí na 2 části – první je výroba oxidu hlinitého (Al₂O₃) z vytěžené rudy bauxitu a druhá je výroba hliníku z jeho oxidové formy, která vznikla předchozím krokem. Bauxit, hornina bohatá na oxid hlinitý, se nejčastěji zpracovává Bayerovou metodou. Tato metoda je mokrá, což znamená, že k extrakci hliníku využívá roztoky.

Proces začíná rozdrcením bauxitu na jemný prášek. Ten se pak pod tlakem smíchá s horkým roztokem hydroxidu sodného. Díky tomu se oxid hlinitý z bauxitu rozpustí a vytvoří sloučeninu zvanou hlinitan sodný. Ovšem ne všechno se rozpustí. Především oxidy křemíku, železa a titanu zůstanou nerozpuštěné a vytvoří takzvaný červený kal, který se následně oddělí od roztoku hlinitanu sodného.

Z tohoto roztoku se pak za vysoké teploty odpařuje voda, čímž se roztok koncentruje. Následným ochlazením se z takto zhuštěného roztoku začnou vylučovat krystaly hydroxidu hlinitého. Ty se pečlivě oddělí filtrací a promyjí, aby se zbavily nežádoucích vměstků. Posledním krokem je kalcinace, tedy opětovné zahřátí na vysokou teplotu. Tím se z hydroxidu hlinitého odstraňuje voda a vzniká konečný produkt - čistý a suchý oxid hlinitý [20].



Obr. 27 Bauxit [23]



Obr. 28 Primární hliník [24]

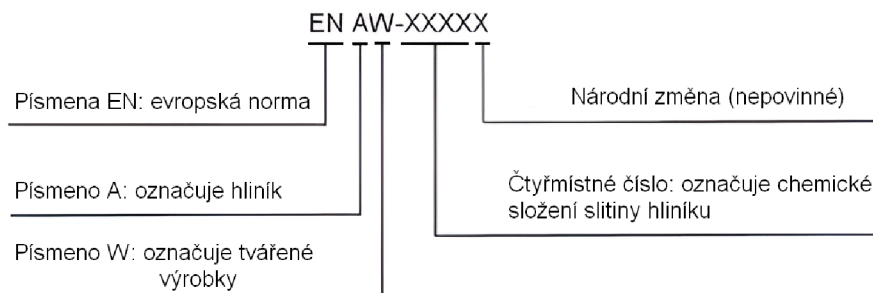
Ten se poté rozpustí v roztaveném kryolitu (Na_3AlF_6). Ten má dvě důležité funkce: snižuje teplotu tavební směsi a zároveň funguje jako elektrolyt, čímž umožňuje průchod elektrického proudu. Tato roztavená směs se nalije do velkých pecí nazývaných elektrolyzéry. Dovnitř se ponoří speciální elektrody - uhlíková anoda a grafitová katoda. Po zapnutí stejnosměrného proudu dochází k elektrolýze roztoku. Na dně elektrolyzéry se začne usazovat hliník.

Ten ovšem obsahuje různé nežádoucí příměsi, jako je měď, železo nebo křemík. Abychom získali čistý hliník, přistupuje se k dalšímu kroku – rafinaci. Roztavený elektrolyt tentokrát obsahuje chloridy hliníku a sodíku. Elektrolyzérem opět prochází stejnosměrný proud, díky němuž se nečistoty v hliníku oxidují a odstraňují z taveniny. Čistý hliník se mezitím usazuje na dně a následně se odlévá do ingotů [20].

4.3. Slitiny

Důvodem pro výrobu a využívání slitin kovů obecně je zlepšení materiálových vlastností. Legováním (cíleným přidáváním dalších prvků – legur) vzniká slitina (binární, ternární,.. – dle počtu složek). V případě hliníku jde především o zvýšení pevnosti, tvrdosti, korozní odolnosti, pájitelnosti, svařitelnosti, obrobitelnosti a dalších vlastností.

V současné době nejpoužívanější značení slitin hliníku se zakládá na normě ČSN EN 573-1 až 3, která stanovuje následující formát:



Obr. 29 Značení slitin hliníku dle ČSN EN 573-1 [25]

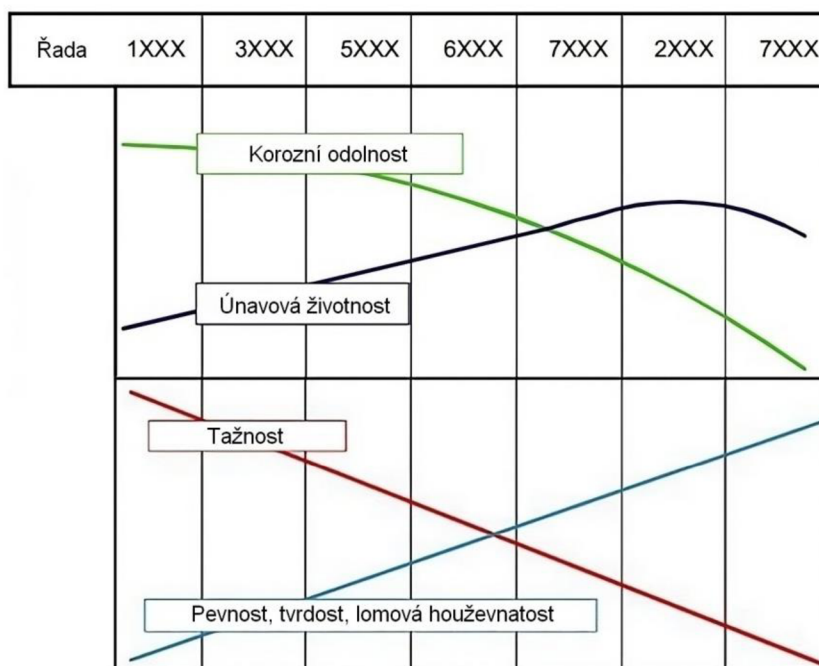
Základní charakteristika jednotlivých řad dle zmíněné normy je v této tabulce:

Řada	Hl. legura	Základní obecná charakteristika
1xxx	-	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoká čistota (Al > 99 %). • Vyznačují se vysokou tažností, tvárností a odolností proti korozi. • Používají se pro výrobu fólií, plechů a vodičů.
2xxx	Cu	<ul style="list-style-type: none"> • Obsahují ~2–7 % mědi a další legující prvky. • Vyznačují se vysokou pevností a odolností proti únavě. • Používají se pro výrobu leteckých součástí, lodních dílů a automobilových komponentů.
3xxx	Mn	<ul style="list-style-type: none"> • Obsahují ~0,1–1,5 % manganu a další legující prvky. • Vyznačují se dobrou svařitelností a odolností proti korozi. • Používají se pro výrobu nádrží, potrubí a plechů.
4xxx	Si	<ul style="list-style-type: none"> • Obsahují ~1–13 % křemíku a další legující prvky. • Vyznačují se dobrou slévarenskou tekutostí a odolností proti opotřebení. • Používají se pro výrobu odlitků pro motory, písty a kola.

5xxx	Mg	<ul style="list-style-type: none"> • Obsahují 0,5–6 % hořčíku a další legující prvky. • Vyznačují se střední pevností a dobrou odolností proti korozi mořské vody. • Používají se pro výrobu lodních dílů, svářecích drátů a plechů.
6xxx	Mg+Si	<ul style="list-style-type: none"> • Obsahují ~0,4–1,2 % hořčíku a ~0,2–1,5 % křemíku. • Vyznačují se dobrou tvárností a svařitelností. • Používají se pro výrobu stavebních profilů, trubek a plechů.
7xxx	Zn	<ul style="list-style-type: none"> • Obsahují 1–8 % zinku a další legující prvky. • Vyznačují se vysokou pevností a odolností proti korozi. • Používají se pro výrobu leteckých součástí, automobilových komponentů a nýtovacích materiálů.
8xxx	Ostatní	<ul style="list-style-type: none"> • Specifické vlastnosti dle konkrétního chemického složení.

Tab. 5 Řady slitin hliníku, sestaveno na základě [3][20][25]

Pokud tyto vlastnosti znázorníme graficky, tak dostaneme zhruba tyto závislosti (jedná se o velké zjednodušení sloužící pro obecnou představu):



Obr. 30 Obecná charakteristika řad slitin hliníku [26](přeloženo)

4.4. Koroze

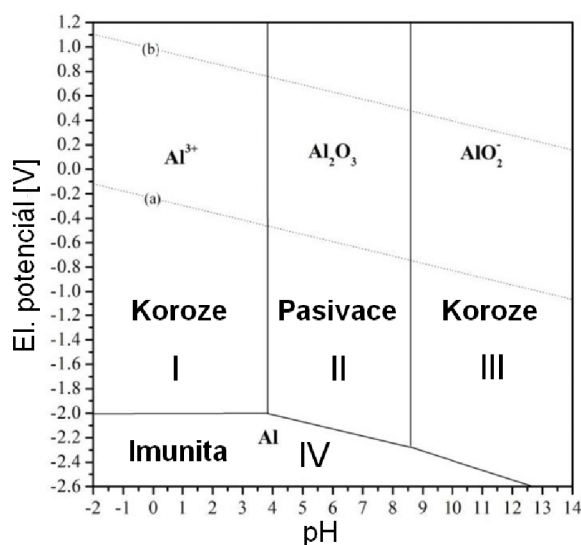
Základní definice tohoto jevu je: „Koroze představuje chemické nebo elektrochemické porušování, převážně kapalnými nebo plynnými látkami, heterogenní reakcí kovů nebo slitin, při níž přecházejí v oxidovaný stav. Oxidací v širším slova smyslu je každá reakce, při níž kov ztrácí elektrony.“ [27] Jinými slovy, koroze je postupné zhoršování vlastností materiálu (obvykle kovu), ke kterému dochází v důsledku reakce s okolním prostředím, kde se kov pomalu rozkládá na stabilnější formu, například oxid.

Třebaže je koroze zcela přirozený proces, který probíhá neustále, existují způsoby, jak jí předcházet nebo alespoň zpomalit. Pochopení toho, jak koroze funguje, je klíčové pro inženýry a konstruktéry, kteří chtějí zajistit dlouhou životnost produkovaných výrobků.

Pasivita kovu

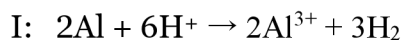
Jde o jev, kdy se kov stává odolným vůči korozi v prostředí, ve kterém by se za normálních okolností rozkládal. Dochází k ní, když se na povrchu kovu vytvoří tenká vrstva oxidu, která zabraňuje dalšímu pronikání korozních látek do kovu.

Hliník je jedním z kovů, které vykazují pasivitu. To znamená, že na jeho povrchu se spontánně vytváří tenká oxidová vrstva, která zabraňuje dalšímu rozpouštění kovu v korozním prostředí. Tloušťka této oxidační vrstva je pouze několik nanometrů a je složena z oxidu hlinitého (Al_2O_3). Nejvyšší korozní odolnost vykazuje ve své vysokočisté formě, kdy příměsi snižují tuto korozní odolnost. Schopnost hliníku vytvářet tuto ochrannou vrstvu je dána okolním prostředím, konkrétně závisí na hodnotě pH a elektrickém potenciálu, viz následující obrázek:



Obr. 31 E-pH diagram hliníku [28](přeloženo)

V oblasti imunity (IV) zůstává hliník nezměněn a v oblasti pasivace (II) vzniká oxid hlinitý. Oblasti koroze rozlišujeme na kyselou (I) a zásaditou (III). Ty lze popsat následujícími rovnicemi:



Rov. 6 [3]

Korozní potenciál

Elektrický potenciál materiálu hraje klíčovou roli v procesu koroze. Jedná se o tendenci materiálu uvolňovat elektrony a podléhat oxidaci. Aktivní kovy s nízkým elektrickým potenciálem, jako je hliník, jsou náchylnější ke korozi než prvky s vysokým potenciálem, jako je třeba zlato, platina a další ušlechtilé kovy. Rozdíly v elektrickém potenciálu mezi materiály mohou za určitých podmínek vést k elektrochemické korozi. Pokud jsou dva materiály s různými potenciály v kontaktu s elektrolytem, vzniká galvanický článek. V tomto článku materiál s nižším potenciálem (anoda) koroduje a materiál s vyšším potenciálem (katoda) se chrání. Tohoto jevu lze využít, kdy cíleně chráníme důležitý konstrukční prvek tzv. obětovanou anodou. V případě hliníku a jeho slitin se vhodným materiálem obětované anody jeví hořčík či zinek, viz následující tabulka:

Kov	Kor. potenciál E_{kor} [mV]
Níkl	+10
Nerezová ocel	-10
Měď	-120
Mosaz (60-40)	-200
Nízkouhlíkatá ocel	-500
Slitiny hliníku 1xxx, 3xxx, 6xxx	-720 až -750
Slitiny hliníku 5xxx	-770 až -790
Slitina hliníku 7072	-880
Zinek	-1020
Hořčík	-1650

Tab. 6 Korozní potenciál kovů vůči kalomelové elektrodě SCE (na základě [29])

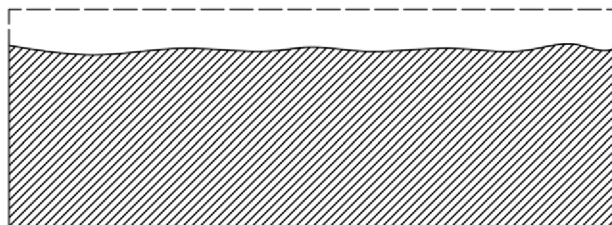
Korozní potenciál je ovšem důležitý i u intermetalických sloučenin, v případě hliníkových slitin v 3% roztoku NaCl jsou FeAl_3 , NiAl_3 , CuAl_2 , MnAl_6 , Al_2CuMg katodami a Mg_2Si , Al_2MgSi , Ag_2Al_3 , MgZn_2 anodami [20]. Jejich korozní potenciál je uveden v následující tabulce:

Intermetalid	Kor. potenciál E_{kor} [mV]
Mg_2Si	-1190
Al_3Mg_2	-1150
MgZn_2	-960
Al_6Mn	-760
Al_2Cu	-640
Al_3Fe	-470
Al_3Ni	-430

Tab. 7 Korozní potenciál intermetalid vůči kalomelové elektrodě SCE (na základě [30])

4.4.1. Rovnoměrná (uniformní) koroze

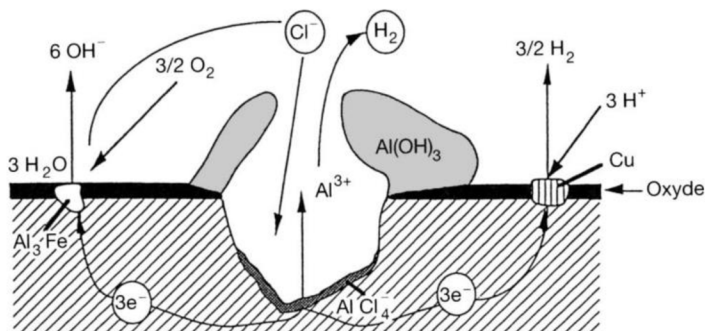
Tento typ koroze vzniká v podobě důlků o velmi malém průměru, řádově v mikrometrech, a vede k rovnoměrnému a plynulému poklesu tloušťky po celé ploše povrchu kovu. U hliníku se tento typ koroze projevuje zejména ve vysoce kyselých nebo alkalických prostředích, v nichž je rozpustnost přirozeného oxidového filmu vysoká. Rychlost rozpouštění filmu je vyšší než rychlost jeho tvorby, poměr obou rychlostí se však může v průběhu času měnit. Tuto rychlost lze snadno určit měřením úbytku hmotnosti [30].



Obr. 32 Uniformní koroze

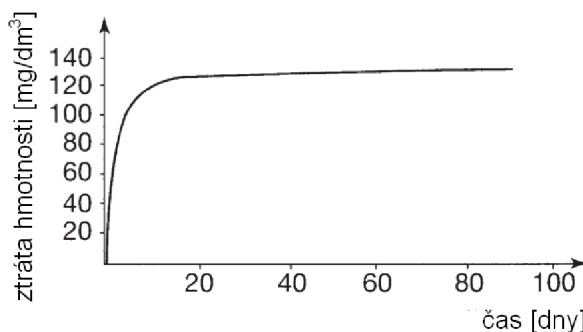
4.4.2. Důlková (bodová) koroze

Tato lokalizovaná forma koroze se vyznačuje tvorbou nepravidelně tvarovaných dutin na povrchu kovu. Jejich průměr a hloubka závisí na několika parametrech souvisejících s kovem, médiem a provozními podmínkami. Hliník je náchylný k důlkové korozi v prostředí s pH blízkým neutrálnímu, což v podstatě zahrnuje všechna přírodní prostředí, jako je povrchová voda, mořská voda či vlhký vzduch [20].



Obr. 33 Důlková koroze [30]

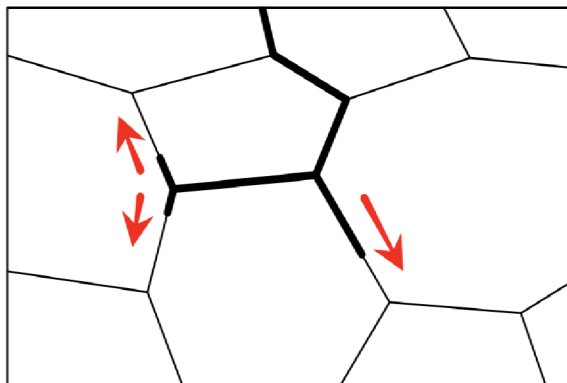
Důlková koroze je velmi složitý jev a ani dnes není její mechanismus zcela pochopen. Dobře známé jsou však podmínky, za kterých bodová koroze vzniká a šíří se, a způsoby, jak ji zpomalit. V důsledku toho je to dnes spíše zastarávání zařízení než důlková koroze, co ukončuje životnost většiny strojů a zařízení. Ztráta hmotnosti je funkcí třetí odmocniny času, jak je naznačeno zde:



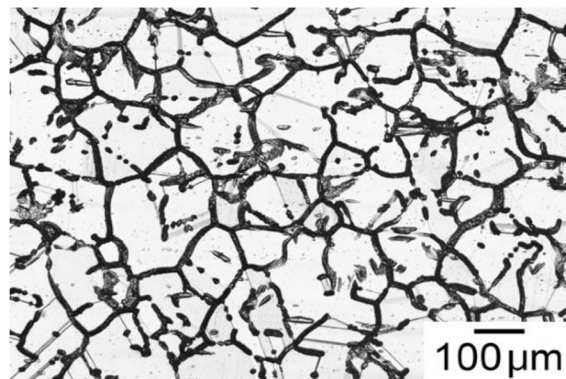
Obr. 34 Průběh úbytku hmoty v čase [30](přeloženo)

4.4.3. Mezikrystalová koroze

Mezikrystalová (též intergranulární) koroze je specifický typ korozního napadení, který se projevuje selektivním rozpouštěním materiálu podél hranic zrn. Jedná se o závažný problém, jelikož může vést k dramatickému snížení mechanických vlastností materiálu a jeho náhlému selhání.



Obr. 35 Průběh mezikrystalové koroze

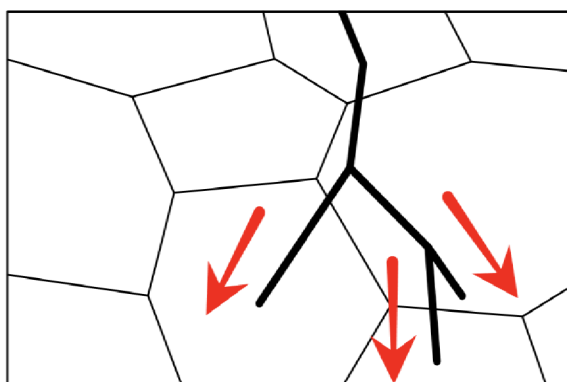


Obr. 36 Fotografie mezikrystalové koroze [31]

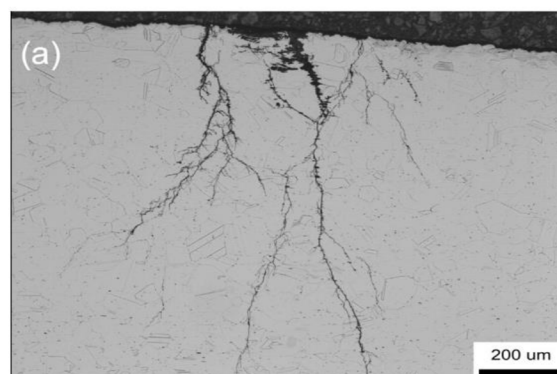
Hlavní příčinou mezikrystalové koroze je chemická a strukturní nehomogenita materiálu v oblastech hranic zrn. Tyto oblasti se mohou lišit v obsahu legujících prvků, fázovém složení a elektrochemických vlastnostech. V důsledku těchto rozdílů vznikají mikroskopické galvanické články, které vedou k rozpouštění materiálu na hranicích zrn.

4.4.4. Transkrystalová koroze

Transkrystalová (též transgranulární) koroze je typ korozního napadení, který se projevuje rozpouštěním materiálu napříč krystaly. Na rozdíl od mezikrystalové koroze, která se vyskytuje v oblastech hranic zrn, transkrystalová koroze postihuje samotné krystaly. Hlavní příčinou transkrystalové koroze je působení agresivního korozního prostředí, které narušuje ochrannou oxidační vrstvu na povrchu materiálu. Toto narušení umožňuje koroznímu prostředí proniknout do materiálu a rozpouštět ho.



Obr. 37 Průběh transkrystalové koroze

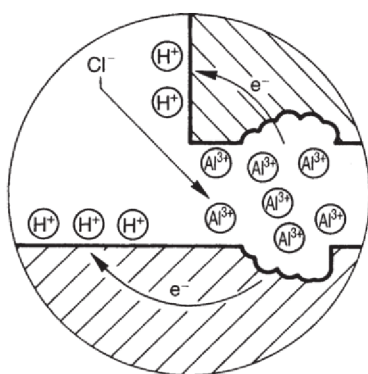


Obr. 38 Fotografie transkrystalové koroze [32]

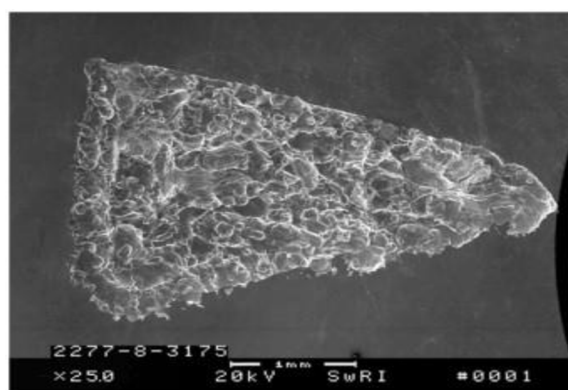
Tento typ koroze se nejčastěji vyskytuje u kovů a slitin, které jsou náchylné k elektrochemické korozi, například u oceli, hliníku a mědi. Rychlost koroze závisí na agresivitě prostředí, vlastnostech materiálu a dalších faktorech. Může vést k vážnému oslabení materiálu a jeho náhlému selhání.

4.4.5. Šterbinová koroze

Šterbinová koroze je typ korozního napadení, který se vyskytuje v úzkých šterbinách a dutinách, kde je omezená výměna elektrolytu. Toto omezení vede k lokálnímu snížení pH a koncentrace kyslíku, čímž se vytváří agresivní prostředí, které podporuje korozi.



Obr. 39 Průběh šterbinové koroze [30]

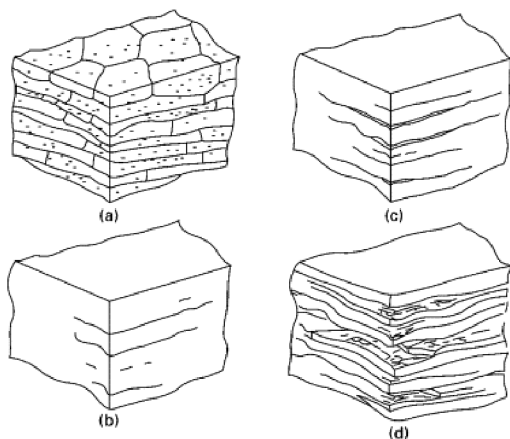


Obr. 40 SEM šterbinové koroze [33]

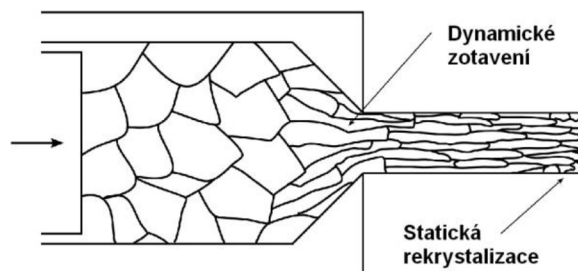
Typickým místem, kde se tato koroze vyskytuje, jsou například nýtované spoje, pod těsněními, v záhybech či pod usazeninami. Může se vyskytovat i v relativně neagresivních prostředích, pokud je v úzké šterbině přítomen agresivní elektrolyt, například chloridy [30].

4.4.6. Koroze po vrstvách

Exfoliační koroze je forma lokalizované koroze, ke které dochází, když se koroze šíří podél mezikrystalových hran rovnoběžně s povrchem materiálu. Produkty koroze jsou objemnější než původní kov, takže jejich vznikem vzrůstá napětí na hranicích zrn. Tyto produkty působí jako klín a tím oddělují vrstvy kovu, což vede k odlupování a poškození nejprve povrchu kovu, které pak s šířením koroze zasahuje i vnitřek materiálu.



Obr. 41 Průběh exfoliace [34]



Obr. 42 Zotavení a rekrytalizace během extruze

[29](přeloženo)

Tento druh korozního napadení se objevuje především u válcovaných a průtlačně lisovaných produktů, kdy při mechanickém tváření dochází k anizotropní přeměně materiálu. Jak je vidět na obr. 42, nejprve v místě zužení komory dochází k dynamickému zotavení, kdy nastává tvorba subzrn, jejichž disorientace závisí na parametrech extruze a na konkrétním materiálu. Dále dochází ke statické rekrytalizaci, což je děj, během kterého dochází k nahrazení původních deformovaných zrn materiálu novými neporušenými krystaly, přičemž se uplatňuje známý princip nukleace a růstu.

5. MPE trubka

Multiportová extrudovaná trubka (nebo též mikrokanálová trubka) je komponentou používanou ve výměnících tepla pro klimatizační systémy automobilů. V tělese trubky jsou vedle sebe vytvořeny kanály oddělené vnitřními můstky, které umožňují proudění chladiva a přenos tepla. Toto konstrukční řešení má vysoký poměr povrchu k objemu, čímž se výrazně zlepšuje účinnost přenosu tepla. V současné době jsou tak vzhledem k energetickým a ekologickým tlakům velmi perspektivním konstrukčním prvkem [35].



Obr. 43 Příkladů profilů MPE trubek [36]



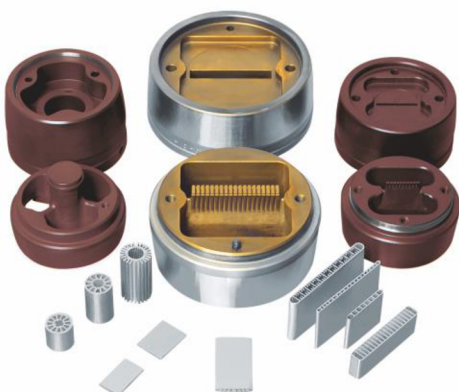
Obr. 44 Trubky zapájené v těle výměníku [37]

Při průtoku chladiva výměníkem tepla musí MPE trubka odolávat vysokému vnitřnímu tlaku. Zejména nová ekologická chladiva, jako je R744 (CO_2), pracují při vyšším tlaku (~ 13 MPa), než tradiční systémy na bázi R134 (~ 3 MPa). Proto je vyžadována odpovídající tlaková únosnost, což se stalo kritickým bodem mechanických vlastností trubky typu MPE. [38]. Mikrokanálové extrudované trubky jsou nejčastěji vyrobeny ze slitin hliníku, kdy vhodné jsou především dobře tvářitelné řady 1xxx (technicky čistý hliník), 3xxx (AlMn) a 6xxx (AlMgSi). Vysokopevnostní slitiny nelze kvůli vysokým přetvárným odporům tímto způsobem použít [20].

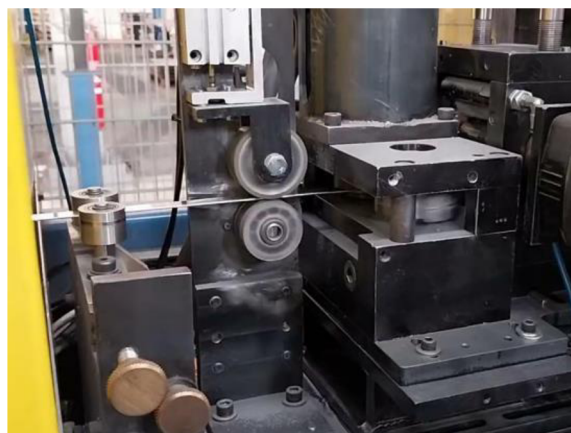
5.1. Výroba

Výroba těchto trubek probíhá pomocí průtlačného lisování, což je proces, při kterém je ingot z recipientu pod tlakem protlačován otvorem matrice. Jelikož během lisování materiál obtéká můstky, za nimiž vzniká podélný spoj, nazýváme tyto matrice komorové (obr. 45). To má výhodu v tom, že k rozdělování a následnému spojování proudů materiálu dochází anaerobně, což efektivně zamezuje tvorbě nežádoucích oxidů. Tyto matrice umožňují nepřetržité lisování profilů do svitků, přičemž je

i u tvarově složitých profilů s tenkou stěnou dosahováno velmi vysoké kvality povrchu [20].



Obr. 45 Komorová matrice [39]



Obr. 46 Produkce MPE trubek [3]

Teplota a rychlost extruze jsou dva klíčové parametry, které ovlivňují jakost a vlastnosti tvářených dílů. Jejich správná volba je nezbytná pro dosažení požadovaných výsledků. Vyšší teplota snižuje viskozitu, což usnadňuje tváření a umožňuje dosažení vyššího stupně deformace, čímž snižuje pravděpodobnost vzniku trhlin. Na druhou stranu, příliš vysoká teplota může vést k nežádoucí zrnitosti či segregaci fází. Vyšší rychlost extruze teoreticky umožňuje produkovat více dílů za kratší dobu, ovšem za cenu nižší jakosti povrchu a rozměrové přesnosti.

Výrobu lze obecně rozdělit na 3 fáze, kdy každá z fází probíhá v celku a nezávisle na ostatních [3]:

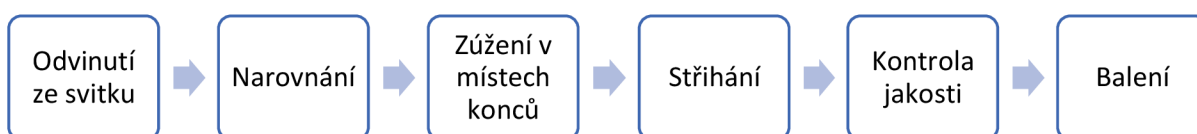
I. fáze:



II. fáze



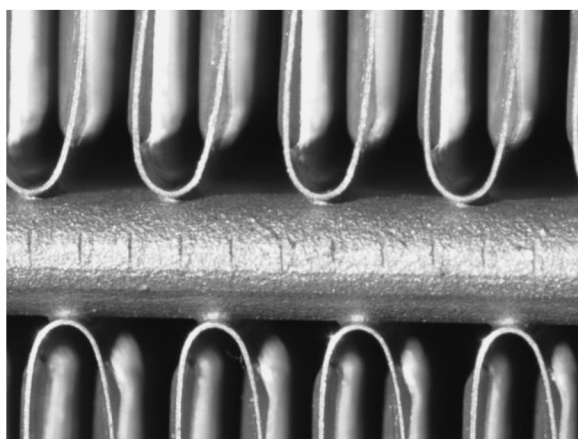
III. fáze



5.2. Tvrdé pájení

Jde o proces spojování kovů při teplotách nad 450 °C, při kterém se plnicí kov (pájka) zahřívá nad teplotu tání, ale nedosahuje se teploty tání spojovaných kovů. Kapalný plnicí kov je pak kapilárním působením vtahován do mezery mezi těsně přiléhajícími povrchy spoje. Vzhledem k významu smáčení a kapilárního působení je velmi důležitá jakost spojovaných povrchů a mezera mezi díly musí být relativně malá (obvykle menší než 0,2 mm). Pájení se uplatňuje zejména při spojování tenkostěnných dílů. Je obzvláště užitečné při vytváření velkoplošných spojů či spojů nepřístupných. Roztavený plnicí kov je pak kapilárními silami rozváděn mezi těsně přiléhajícími povrchy spoje. Protože pájka vzlíná podél styčných ploch mezi dvěma těsně přiléhajícími součástmi, je možné pájení i slepých spojů. Vodotěsné či plynotěsné spoje vytvořené tvrdým pájením vynikají svou odolností proti vysokým provozním tlakům a cyklickému namáhání.

Jelikož při pájení nedochází k roztavení základního kovu, umožňuje zachování přesných geometrických tolerancí s nízkým stupněm deformace. Kromě toho produkuje čisté spoje bez nutnosti dodatečné povrchové úpravy. Pájené spoje jsou pevné, a protože mezikus vytvořený přídavným kovem v pájeném spoji má ideální tvar pro snížení koncentrace napětí, nabízejí lepší únavovou pevnost než většina svarů. Pájením se snadno spojují i různorodé kovy, jako je hliník – ocel, hliník – titan, hliník – hořčík a tak dále. Plnicí kov může být přidán ve formě drátu, tenkého plechu nebo kovového prášku smíchaného s tavidlem [40].



Obr. 47 Pájený spoj trubka – fin [40]

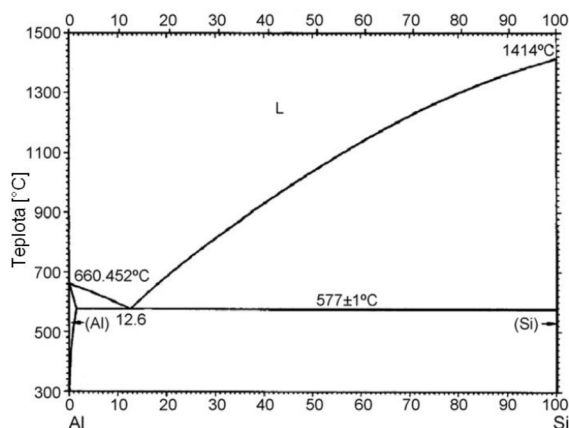


Obr. 48 Řez pájeným spojem[3]

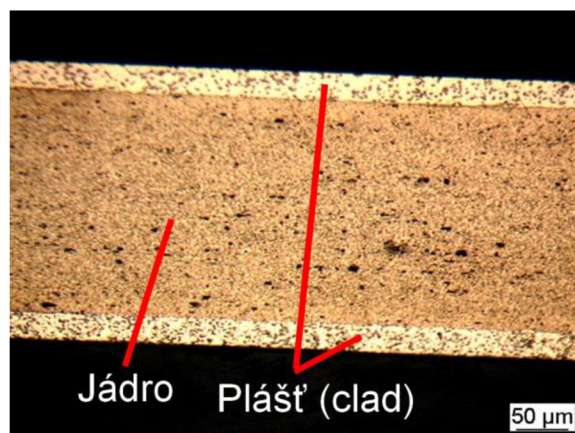
CLAD

Zajímavou alternativou přídavným pájkám jsou vícevrstvé materiály, které se nazývají plátované (či cladové). Jedná se v podstatě o sendvičový kompozit sestávající se z jádra, které zajišťuje pevnost a další požadavky na životnost, a z vrstvy tvořené pájkou, která se při pájecí teplotě rozpustí. Tu může od jádra může oddělovat další vrstva, která slouží jako difuzní bariéra. Obvykle se vyrábějí válcováním nebo pomocí vícevrstvého odlévání, kdy mezi materiály vzniká kovová vazba.

Nižší teploty tání, která je pro princip pájení cladů zásadní, se obvykle dosahuje použitím slitin z řady 4xxx, které obsahují křemík. Jak je vidět na obr. 49, 100% čistý hliník má teplotu tání 660 °C, kdežto binární slitina Al-Si s obsahem křemíku 12,6 %, kdy dosahuje eutektického bodu, má teplotu tání pouze 577 ± 1 °C. Cladová vrstva ovšem nemusí fungovat pouze jako pájka, ale používá se i jako obětovaná anoda, tedy jako korozní ochrana (viz kapitola 5.3.).



Obr. 49 Diagram Al-Si [41]



Obr. 50 Cladový materiál [3]

Tvrdé pájení v ochranné atmosféře

Pájení v ochranné atmosféře (anglicky CAB – Controlled Atmosphere Brazing) je v současné době vedoucí technologií pro výrobu tepelných výměníků z hliníkových slitin v automobilovém průmyslu. Plynná atmosféra je obvykle tvořena dusíkem, který zabraňuje oxidaci. Zároveň snižuje pórovitost spoje, což je nežádoucí jev, který snižuje výslednou pevnost a odolnost.

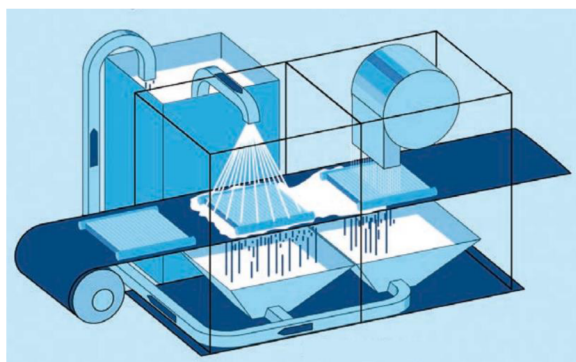
Postup pájení závisí na konkrétní konstrukci výrobku a technice nanášení tavidla (to na některých dílech může být nanášené předem). U automobilových výměníků tepla je nejběžnější postup následující:



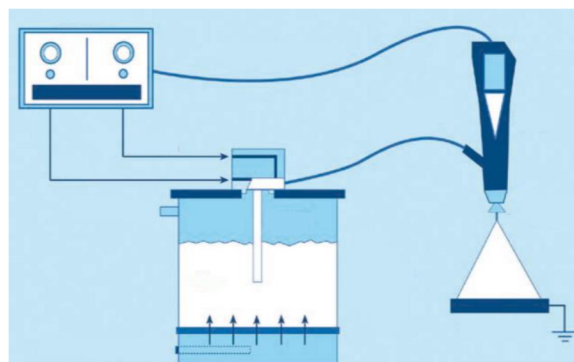
Na základě [40]

Tavidlo (flux)

Pro tvrdé pájení v ochranné atmosféře se používá směs hlinito-draselných fluoridů $KAlF_4$, K_2AlF_5 , které po roztavení vynikají svou smáčivostí hliníkových slitin, dále odstraňují nežádoucí oxidovou vrstvu Al_2O_3 a zamezují další oxidaci. Po pájení zůstává zpevněné tavidlo na povrchu slitiny jako tenká lesklá vrstva, která má velmi nízkou rozpustnost ve vodě. Tento zbytkový film může zůstat na povrchu materiálu, čímž poskytuje další ochranu proti korozním vlivům. Aplikace může probíhat mokrým způsobem, kdy je tryskou nanášen vodný roztok (obr. 51), a suchým způsobem, zde se využívá síly elektrostatického náboje, kdy elektricky nabitě částice tavidla drží na opačně nabitém výrobku, který je uzemněný (obr. 52).



Obr. 51 Mokrý nanášení tavidla [42]



Obr. 52 Suché nanášení tavidla [42]

5.3. Ochrana před korozí

Existuje mnoho způsobů antikorozi ochrany, uvedeny jsou zde ty, které se týkají MPE trubek a jsou podstatné pro praktickou část práce.

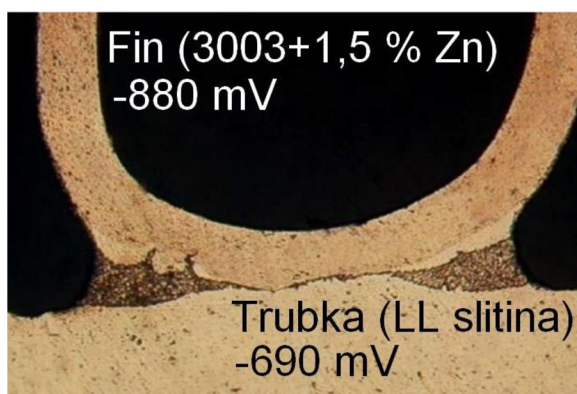
Výběr materiálu

Jako první je nutné zvážit výběr samotného materiálu, který záleží na mnoha faktorech, jako je provozní prostředí (tepelný výměník musí odolávat atmosferickým vlivům, výkyvům teplot, posypové soli,..), mechanické vlastnosti (odolnost proti cyklickému tlakovému namáhání), zpracovatelnost (obrobitelnost, pájitelnost,..), a samozřejmě na nákladech. Pokud daná slitina vyniká v jedné vlastnosti, tak je to

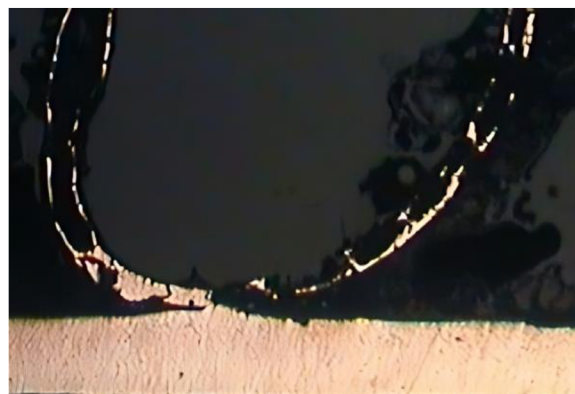
obvykle na úkor jiných vlastností. Například řada EN AW-2xxx (AlCu) má vynikající pevnost a odolnost proti únavě, ale má velmi nízkou odolnost proti korozi, viz kapitola 4.3.

Katodová ochrana

V případě tepelných výměníků na bázi MPE trubek se obvykle uplatňuje přístup, kdy fin je vyroben ze slitiny s vyšším korozním potenciálem (číselně jde o zápornější hodnotu) a slouží tak jako obětovaná anoda. Degradace finu sice může vést ke snížení účinnosti a tepelného výkonu výměníku, ale zamezí se tím korozi trubek a dalších důležitějších částí, která by vedla k úniku chladiva a posléze kompletní dysfunkci.



Obr. 53 Ochrana obětovanou anodou [3]



Obr. 54 Koroze finu [3]

Speciální povlaky

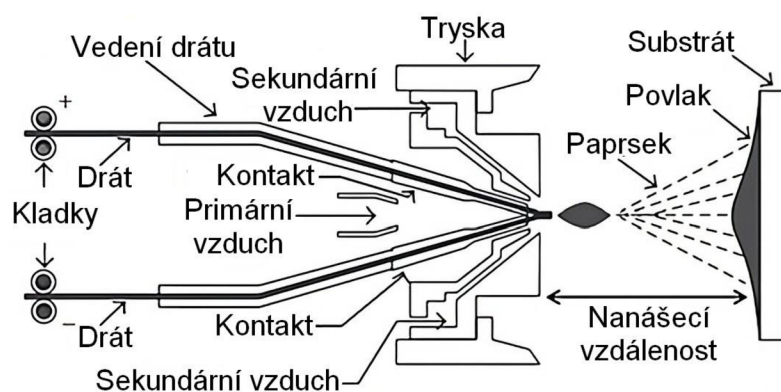
Další možností korozní ochrany je nanášení speciálních povlaků, které se aktivují až při procesu pájení, kdy dojde k jejich difuzi do substrátu. Ty mohou být tvořeny na bázi křemíku (směs Si, $K_{1-3}AlF_{4-6}$, $KZnF_3$ + pojivo – tzv. SilZnFlux) anebo na bázi hliníko-křemičité slitiny ($AlSi_{12}$, $KZnF_3$ + pojivo). V takovém případě má povlak trojí funkci:

- 1) Tavidlo odstraňuje aluminu (oxid hlinitý), chrání pájený spoj před oxidací a zlepšuje smáčivost pájky,
- 2) křemík difunduje do základního materiálu, čímž vytváří oblast s nižším bodem tání, která poté funguje jako pájka,
- 3) zinek zlepšuje protikorozní vlastnosti.

Průměrná vydatnost naneseného povlaku na bázi Si je $\sim 12-18$ gramů/ m^2 a v případě povlaku na bázi $AlSi_{12}$ to je $\sim 20-35$ gramů/ m^2 [43].

Metalizace elektrickým obloukem

Metalizace elektrickým obloukem, někdy nazývaná také jako TWAS (Twin Wire Arc Spray), je proces nanášení povlaků kovů na povrch jiných materiálů. Funguje na principu tavení kovového drátu pomocí elektrického oblouku a následné atomizace roztaveného kovu proudem stlačeného vzduchu. Atomizované kovové částice se pak nanášejí na povrch substrátu, kde se ochladí a zpevní. Taková vrstva může fungovat nejen protikorozně, ale může zlepšovat i jiné parametry, jako je otěruodolnost, elektrická vodivost a mnoho dalších. Na obr. 55 je schéma takového nanášení.

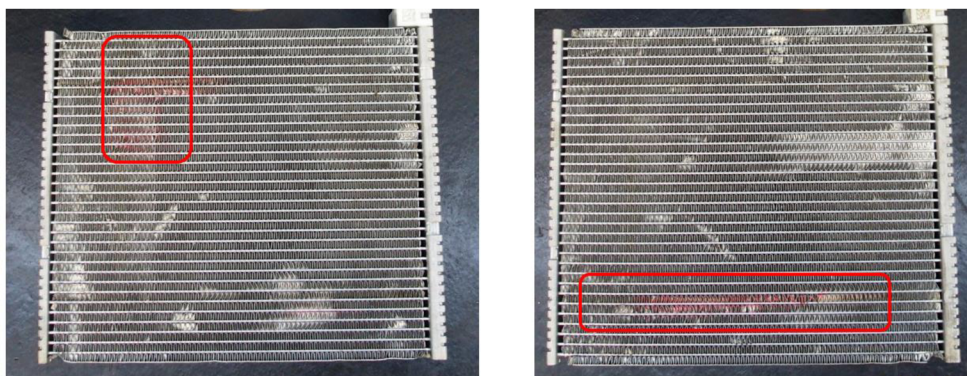


Obr. 55 Schéma nástřikové hubice [44](přeloženo)

6. Návrh testovací matice

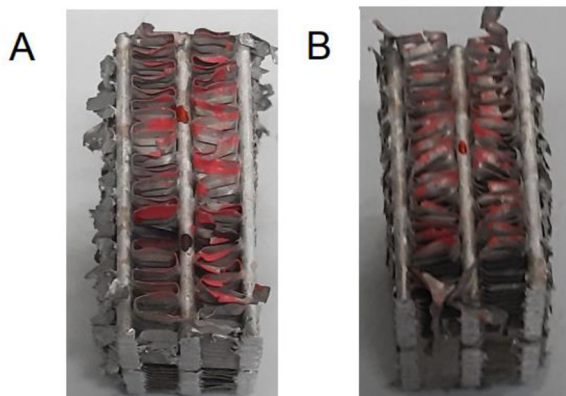
Touto kapitolou začíná praktická část diplomové práce. Je zde popsán řešený problém a chronologický postup jeho analýzy.

Během testu životního cyklu výměníku IGC (viz kapitola 3.5.1.), konkrétně v 6. bodě, kde se testuje plynotěsnost při tlaku 20,4 MPa po dobu jedné hodiny, došlo k selhání. Po provedení lokalizace ve vodní lázni byly zjištěny úniky v aktivní oblasti (oblast mikrokanálkových trubek + finu), viz následující obrázek:

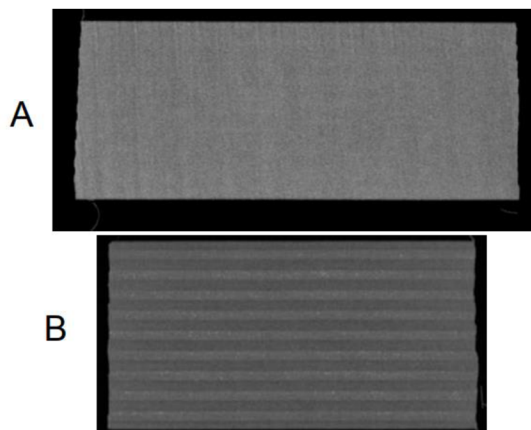


Obr. 56 Oblasti úniku IGC

Oblasti úniků A a B byly vyříznuty (obr. 57) a pomocí zobrazovací metody CT (computed tomography - výpočetní tomografie) byly pořízeny 3D skeny vzorků (obr. 58). Bohužel se touto metodou nepodařilo přesně lokalizovat zdroje úniku.



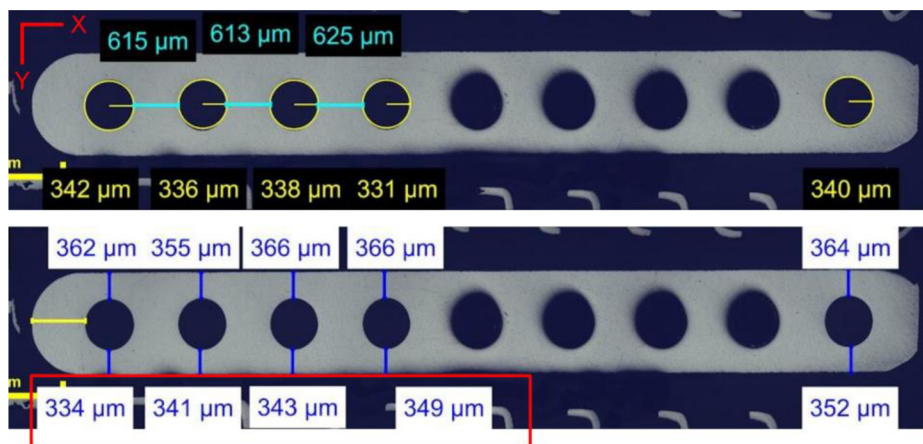
Obr. 57 Vzorky z oblasti úniku



Obr. 58 CT sken trubek

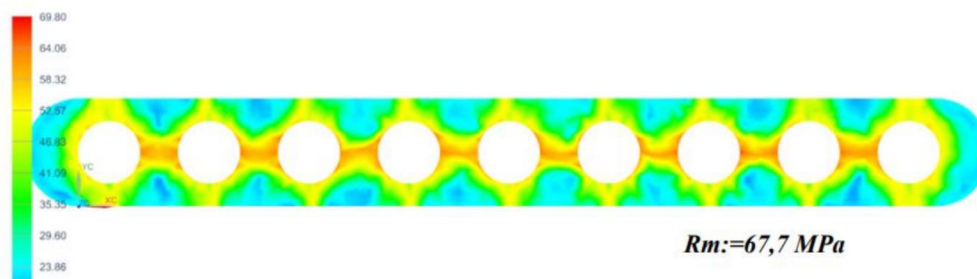
V další kroku byl proveden příčný řez trubkami poblíž těchto oblastí, aby mohla být zkontrolována geometrie profilu. Důležitými rozměry jsou průměry kanálek, rozteč kanálek a tloušťka stěn. Bylo zjištěno, že došlo k prodloužení ve směru osy Y, kdy původně kulaté kanálky získaly lehce oválný tvar, jakožto důsledek cyklického tlakování. Také byl zjištěn nevyhovující rozměr tloušťky stěny, který je označen

červeně, kdy maximální odchylka od požadované minimální tloušťky byla 16 μm , viz následující obrázek:



Obr. 59 Kontrola rozměrů trubky

Proto byla pomocí FEM (Finite Element Method – metoda konečných prvků) provedena simulace statického tlakového zatížení. Jak je vidět na obr. 60, nejvyšší koncentrace mechanického napětí je v místech můstku mezi kanálky, což vysvětluje ono prodloužení v ose Y.

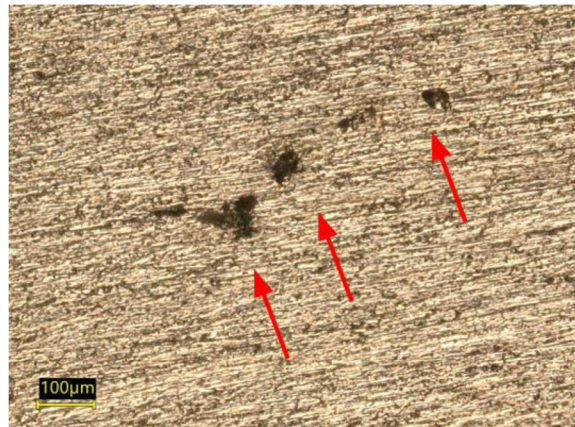


Obr. 60 FEM simulace

Pro přesnou lokalizaci úniků byla provedena další zkouška, a to kapilární (někdy též penetrační). Ta využívá vysokou vzlínavost a smáčivost kapalin s nízkým povrchovým napětím, které snadno proniknou do vad ústících na povrch. Pro lepší viditelnost může být indikační látka obarvena či obsahovat fluorescenční částice. Na obr. 61 jsou trubky zbavené finu a vyleštěné 3 μm roztokem a na obr. 62 je nalezený zdroj úniku.

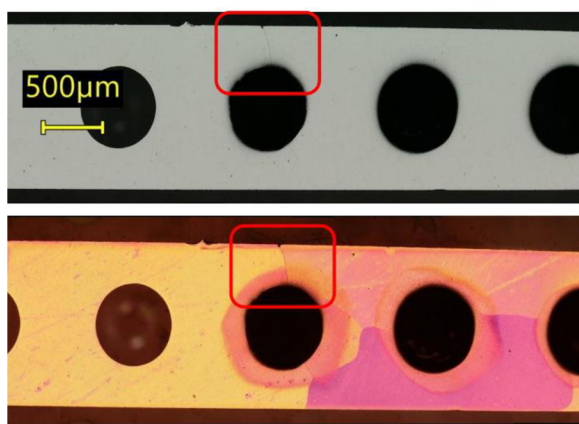


Obr. 61 Vyleštěné únikové oblasti

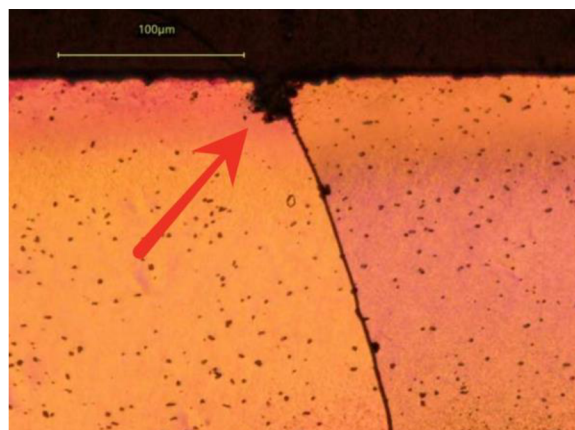


Obr. 62 Detail místa úniku pod mikroskopem

Dále byly zhotoveny řezy trubky v místech zjištěných úniků. Zde bylo zjištěno, že praskliny nepostupují zevnitř, kde je při tlakovém zatížení nejvyšší mechanické napětí (viz FEM analýza), ale k iniciaci dochází zvenku na povrchu trubek, kde nejdříve vznikne důlkové korozní napadení, které se posléze šíří po hranicích zrn, zatímco zrna samotná zůstávají neporušená. Jedná se tedy o korozi mezikrystalovou (viz kapitola 4.4.3.). Pro barevné zvýraznění jednotlivých zrn bylo použito elektrolytické leptání a polarizované světlo.



Obr. 63 Porovnání před a po elektrolyt. leptáním



Obr. 64 Detail vzniku korozního napadení

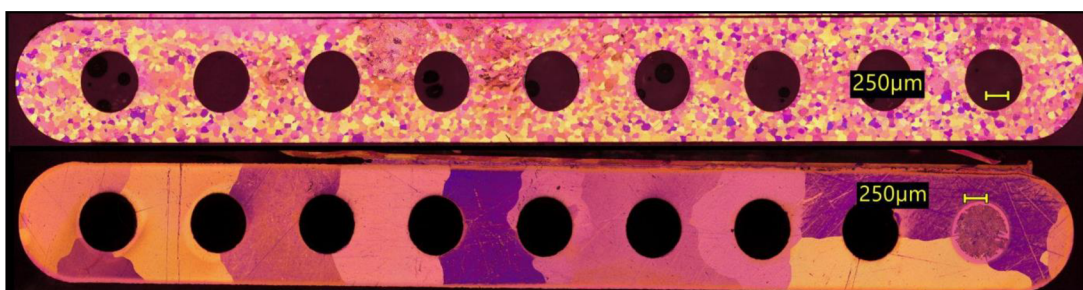
Dalším zjištěním přechodného kroku byla nápadná velikost zrn. Proto byla provedena další zkouška, tentokrát pro porovnání mikrostruktury před a po procesu tvrdého pájení komponentů tepelného výměníku v peci. Na obr. 65 je vidět, že jemnozrná mikrostruktura zásadním způsobem zhrubne, což je obecně nežádoucí jev, vedoucí ke zhoršení mechanických i antikoročních vlastností materiálu. Pro představu, rovnice 7 popisuje Hall-Petchův vztah, kdy při vzrůstající velikost zrna dochází ke

snižování meze kluzu. Dále dodavatel MPE trubek uvádí, že pevnost v tahu se z původních 97 MPa po pájení sníží o 28 % na hodnotu 70 MPa. Dodané trubky jsou ve stavu H111, to znamená, že materiál je „žíhaný a mírně deformačně zpevněný“ [20]. Nicméně to stále plně nevysvětlovalo nežádoucí korozní chování.

$$R_{P0,2} = K_1 + K_2 \cdot d^{-1/2}$$

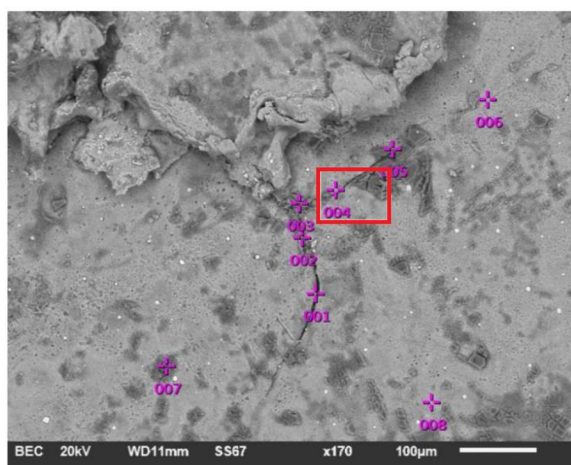
Rov. 7 Hall-Petchův vztah [45]

(K_1, K_2 – materiálové konstanty, d – průměr zrna)

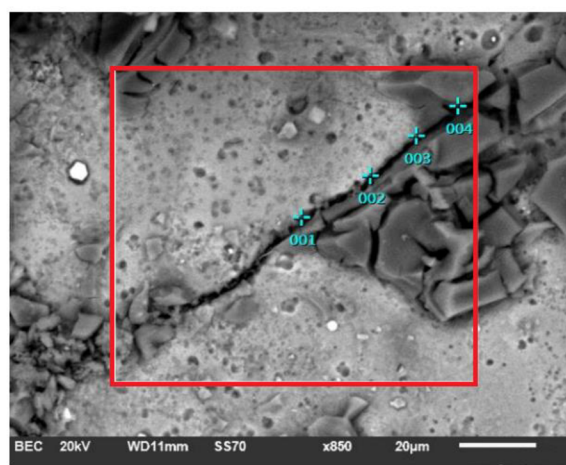


Obr. 65 Mikrostruktura před a po pájení

Proto byla provedena další analýza – pomocí technologie SEM (scanning electron microscope – rastrovací elektronový mikroskop) společně s EDX (Energy-Dispersive X-ray) byla zjištěna chemická kompozice materiálu. Byla vybrána oblast hranice zrn (obr. 66 a 67), kde dochází k propagaci koroze.



Obr. 66 SEM analýza



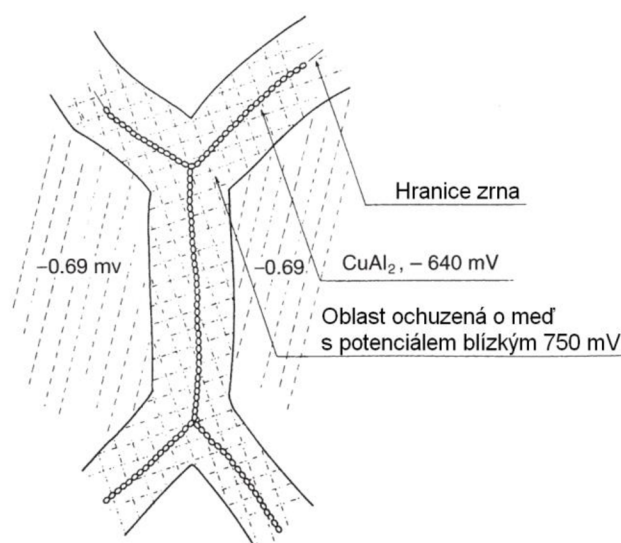
Obr. 67 Zkoumaná hranice zrna

Bylo zjištěno, že se mezi zrny nachází vysoká koncentrace mědi a zinku (označeno červeně), viz následující tabulka s výsledky ze čtyř měřících bodů:

001		002		003		004	
prvek	hm. %	prvek	hm. %	prvek	hm. %	prvek	hm. %
Al	93,65	F	1,24	O	2,52	F	4,77
S	0,35	Al	86,5	F	0,16	Al	91,97
Cl	0,21	Si	0,09	Al	87,84	Si	0,28
Mn	0,74	S	0,07	Si	0,05	S	0,23
Fe	1,11	K	0,04	S	0,12	K	0,12
Cu	1,54	Fe	2,21	Fe	2,34	Mn	0,37
Zn	2,40	Cu	5,95	Cu	3,65	Cu	0,69
		Zn	3,9	Zn	3,31	Zn	1,56

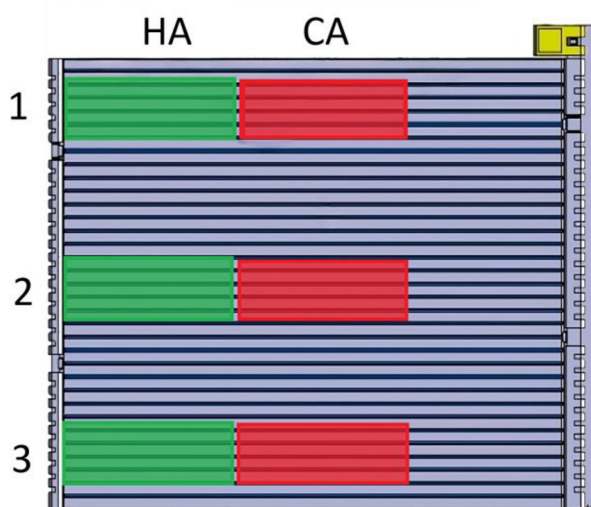
Tab. 8 Výsledky EDX

Je tedy nutné vzít v úvahu, co se v materiálu děje při teplotě tvrdého pájení a při chladnutí. Slitina trubky obsahuje hmotnostně 0,45 – 0,55 % mědi (konkrétní označení je součástí obchodního tajemství, dále bude referováno jako „slitina A“). Při pohledu na fázový diagram Al-Cu zjistíme, že již při teplotě cca 250 °C dochází k rozpouštění této fáze Al₂Cu. Při pomalém ochlazování, kdy zapájený blok opouští pec, dochází k precipitaci této fáze na hranici zrn, čímž vzniká oblast, která je o měď naopak ochuzená. Tato oblast má vyšší korozní potenciál, což znamená, že začne korodovat dříve než oblasti s nižším potenciálem. Tyto mikro galvanické články jsou potom spouštěcím mechanismem, kdy se materiál stává náchylným k mezikrystalové korozi.



Obr. 68 Precipitace katodické fáze na hranicích zrn [30](přeloženo)

Když takto strukturálně pozměněný materiál vystavíme cyklickému pulznímu tlakovému zatížení (viz kapitola 3.5.1.), dojde ke koroznímu praskání, kdy jako první začne selhávat mezikrystalová oblast, jde tedy o korozi iniciovanou únavou. Je proto nutné zjistit, jaká je závislost korozní odolnosti na mechanickém namáhání mikrokanálových trubek. Z tohoto důvodu byla sestavena testovací matice, kde se budou porovnávat MPE trubky vypreparované z rozdílně zatížených IGC výměníků. K tomu bude využito polarizačně akcelerované korozní testování (viz kapitola 3.5.2.), jakožto měřítko zestárnutí materiálu. U všech vzorků bude taktéž proveden metalografický výbrus a fotografická dokumentace. Postup přípravy vzorku je podrobně popsán v další kapitole, po které následuje kapitola zabývající se analýzou výsledků. Na obr. 69 je znázorněno, z jakých oblastí výměníku budou vytvářeny vzorky.



Obr. 69 Oblasti vzorků

(HA – header area, CA – core area)

7. Příprava vzorků

V této kapitole je krok po kroku popsán metalografický postup, použité nástroje, přístroje a materiály při přípravě vzorků, které byly určeny v kapitole předchozí.

7.1. Preparace trubek

Prvním krokem přípravy vzorků je z hotových bloků IGC vyextrahovat jednotlivé MPE trubky. Jelikož se jedná o tvrdě pájené komponenty, tak jde o zcela destruktivní proces. Na obr. 70 je tepelný výměník tak, jak vypadá po opuštění výrobní linky. Nejprve se uříznou vstupní a výstupní trubky s přípojovací přírubou. Poté se pomocí speciálních kleští vytrhne první vrstva finu kolem extrahovaných mikrokanálkových trubek. Druhá vrstva se vytluče pomocí speciálního dlátka a kladiva. Výsledek tohoto kroku je na obr. 71.

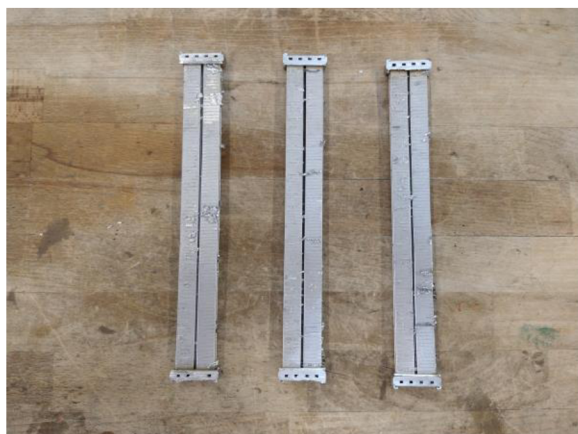


Obr. 70 IGC před přípravou



Obr. 71 IGC po odstranění finu

Dalším krokem je rozřezání bloku pomocí pásové pily. Nejprve ve svislé rovině podél trubek, čímž vzniknou dvojice, viz obr. 72. Poté se vyměří požadovaná oblast trubky, buď u dolního tanku nebo v jádře výměníku. Po řezu vznikne 12 trubek, kdy polovina je redundantní, což poskytuje prostor pro opakování testu v případě selhání.



Obr. 72 Dvojice MPE trubek



Obr. 73 Jednotlivé MPE trubky

7.2. Vyčištění a zalepení

Jelikož většina vzorků prošla zatížením pomocí tlakového pulzačního testu, tak jsou trubky zvenku, ale především zevnitř, silně znečištěny hydraulickým olejem. Tento mastný film by zkresloval výsledky korozního testu, proto je nutné trubky odmastit. Toho se dosáhne pomocí acetonu, což je organické rozpouštědlo. Trubky se vloží do acetonové lázně v ultrazvukové čističce, kde dojde k efektivnímu odstranění nežádoucího znečištění.

Poté je třeba zalepit jeden konec trubky tak, aby vzorek bezpečně těsnil při testovacím tlaku. K tomu se používá lepidlo Araldite 2014-2, které je na bázi dvousložkové epoxidové pryskyřice a vyniká svou adhezí, nestékavostí, pevností a chemickou odolností. Při teplotě 23 °C lepidlo dosahuje smykové pevnosti 10 MPa již po 5 hodinách [46].



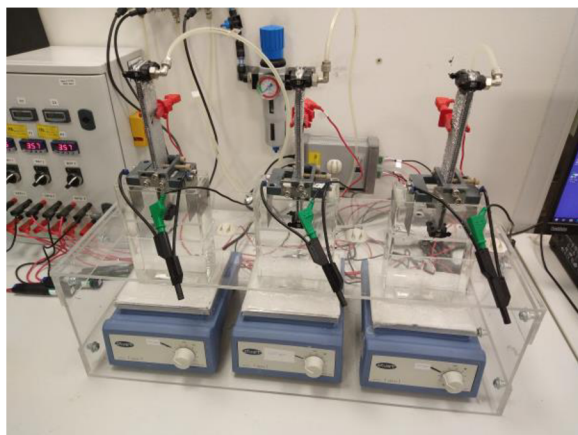
Obr. 74 Zalepené vzorky



Obr. 75 Vzorek před PACT

7.3. Koroze akcelerovaná polarizací

Princip tohoto testu je podrobně popsán v samostatné kapitole 3.5.2. Během tohoto kroku je klíčové utěsnění vzorku v tlakovací hlavici, jelikož únik by znamenal zkreslení výsledků, a tedy i neplatnost celého testu. Dále je nutné správné nastavení elektrolytického proudu a záznamové aparatury. Délka tohoto testu se v případě MPE trubek pohybuje řádově od jednotek po desítky hodin, dle materiálu, povrchové úpravy a míry zestárnutí. Pracoviště má kapacitu 3 vzorků, které jsou testovány nezávisle paralelně, jak je vidět na obr. 76. Na dalším obrázku je vidět detail vzorku ponořeného v roztoku jedlé soli.



Obr. 76 Pracoviště PACT



Obr. 77 Detail uchycení vzorku

Na konci testu, kdy dojde ke korozivnímu narušení materiálu v takové míře, že dojde ke ztrátě vnitřního tlaku, je nutné lokalizovat místo úniku, což se provádí vizuálně. Po opětovném natlakování v daném místě začnou unikat bublinky a toto místo se označí.

7.4. Zalití vzorku

Trubky s lokalizovanými úniky se pomocí nůžek na plech zkrátí tak, aby se na výšku vešly do formiček (obr. 78). Poté se formičky naplní zalévací hmotou Varikleer, která se skládá z práškové pryskyřice a tekutého tvrdidla, které se smíchají v poměru 2:1. Doba zpracování je 3 minuty a doba tuhnutí 15 minut [47]. Vzorky se během po zalití vloží do tlakového hrnce, čímž se dosáhne čirého materiálu bez vzduchových bublin. Výsledek tohoto kroku je na obr. 79.



Obr. 78 Vzorky před zalitím



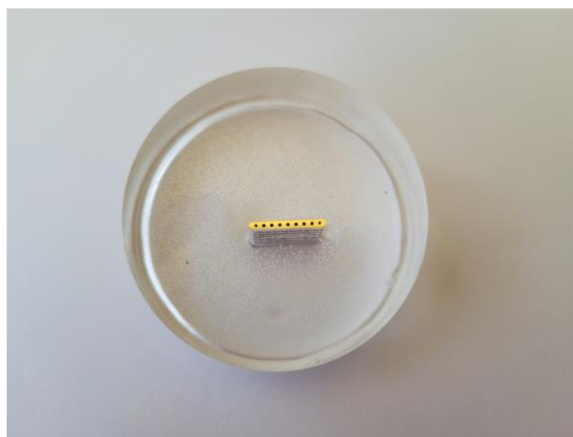
Obr. 79 Vzorky po zalití

7.5. Broušení a leštění

V tomto kroku je cílem se dostat na řez trubky v místě, kde došlo k úniku vzduchu při korozním testu. Toho se dosáhne broušením na automatické metalografické brusce/leštičce, v tomto případě byl použit typ Phoenix 4000 od výrobce Bühler (obr. 80). Brusným papírem na bázi karbidu křemíku o zrnitosti 80, poté 320, následuje 600 a nakonec 1200 se vzorek vybrousí do příslušného řezu, přičemž chlazení a odplavování materiálu zajišťuje proud vody. Důležité je taktéž použít vhodné otáčky a přítlak hlavy leštičky.



Obr. 80 Laboratorní bruska a leštička



Obr. 81 Vzorek po vyleštění

Nakonec je potřeba vzorek vyleštit do vysokého lesku, čehož se dosáhne leštícím plátnem, na které se nejdříve aplikuje suspenze s diamantovým abrazivem o střední velikosti částic 3 μm a poté roztok se zásaditou koloidní silikou o střední velikosti částic 50 nm. Na rozdíl od broušení se u leštění používá opačný smysl otáčení hlavy vůči unašeci plátna, aby nedocházelo k zakulacování hran. Výsledek procesu leštění je na obr. 81.

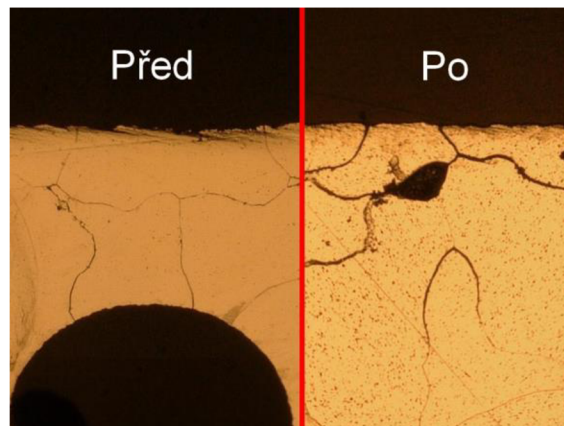
7.6. Leptání na zrno

Aby lépe vynikla mikrostruktura materiálu, je vhodné vzorek leptat. Tím se zvýrazní vady, odstraní zoxidovaná vrstva a případné nečistoty. Na obr. 82 je vzorek během leptání a na obr. 83 porovnání vzorku před a po leptání.

Jako leptací kapalina se použije Kellerovo činidlo, což je vodný roztok, jež objemově obsahuje 2,5 % HNO_3 (kyseliny dusičné), 1,5 % HCl (kyseliny chlorovodíkové) a 1 % HF (kyseliny fluorovodíkové)[3]. Toto činidlo se nakape na oblast vzorku s trubkou a nechá 8 minut působit. Poté se vzorek opláchne demineralizovanou vodou a nakonec ethanolem.



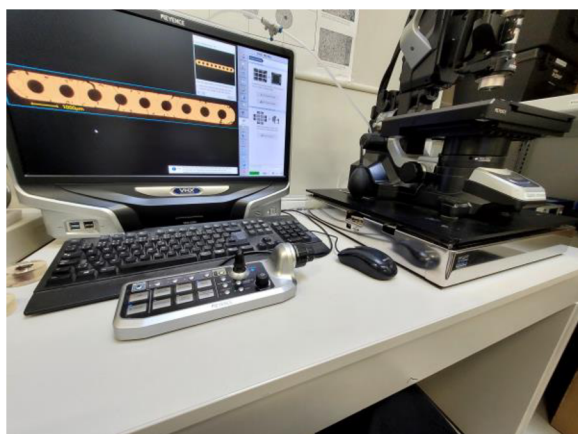
Obr. 82 Proces leptání



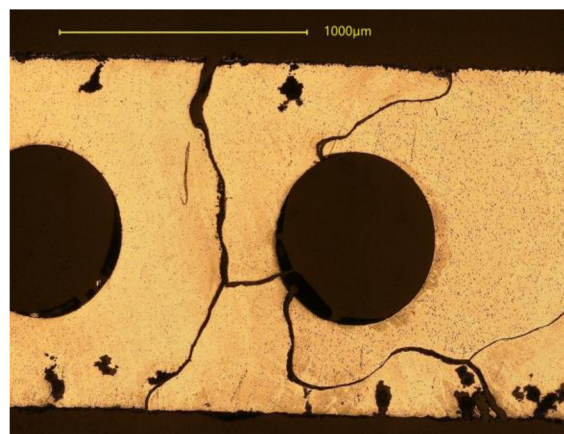
Obr. 83 Porovnání před a po leptání

7.7. Nasnímání digitálním mikroskopem

Posledním krokem je mikroskopie. Pomocí digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000 (obr. 84) je celý řez nasnímán v 200x zvětšení (obr. 85). To probíhá tak, že se na stolku mikroskopu vzorek nastaví přesně do vodorovné roviny a v softwaru se vyznačí žádaná oblast. Pomocí funkce „stiching“ dojde k automatickému fotografování a posuvu stolku dle vyznačené oblasti. Nakonec se samostatné dílčí snímky spojí v jeden velký celistvý. Takto se nasnímá všech 6 vzorků z jednoho výměníku.



Obr. 84 Snímání mikroskopem



Obr. 85 200x zvětšení

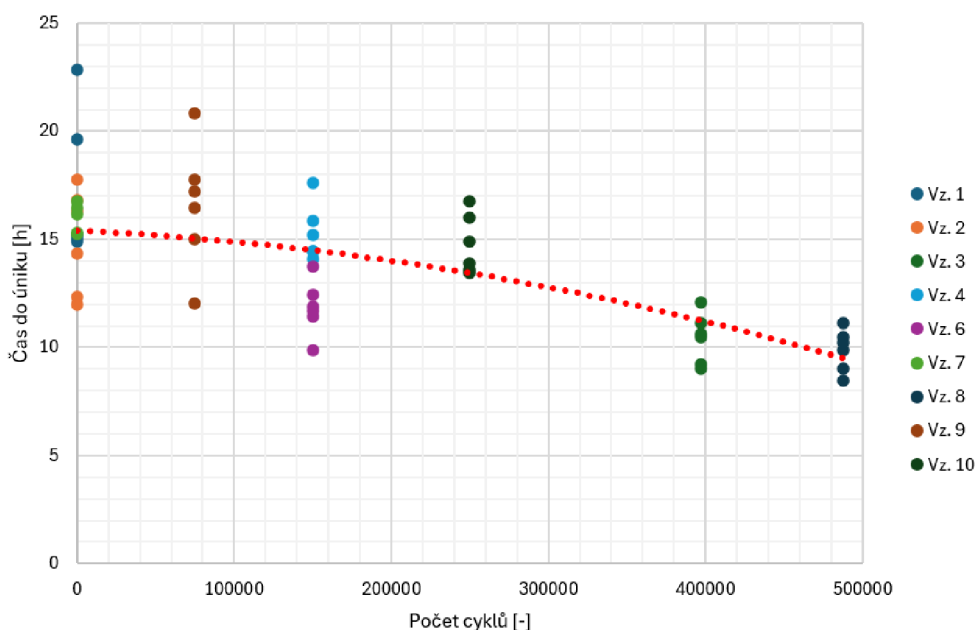
8. Analýza výsledků testování

Během analýzy výsledků bylo zjištěno několik zajímavých skutečností (popis a fotografie vzorků je v příloze). První z nich je, že v závislosti na počtu cyklů tlakového zatížení se podstatně mění charakter koroze multiportové trubky. Zatímco nezatížené vzorky (č. 1, 2 a 7) vykazovaly důlkovou korozi (tzv. pitting), tak u cyklicky zatížených vzorků převažuje praskání materiálu způsobené mezikrystalovou korozí. Zajímavostí je vzorek se zvýšeným tlakovým rozsahem (č. 5), který byl místo standardního rozsahu 5-17 MPa vystaven hodnotám tlaku 4-20 MPa, což se projevilo podstatně hustší a rozvětvenější strukturou prasklin, která postupovala transkrystalově.

Dalším zjištěním bylo, že vzorky s nevyhovující extruzí z hlediska geometrie (č. 1 a 3) nevykazují zhoršené vlastnosti oproti vzorkům se správným extruzním profilem (příliš vysoká rychlost protlačování a nedostatečná kontrola teploty), nejedná se tedy v tomto rozsahu z hlediska odolnosti o relevantní faktor.

Dále se ukázalo, že není signifikantní rozdíl ve výdrži trubek od asijského dodavatele A (č. 1-4), proti trubkám od evropského dodavatele B (č. 6-10), což je pozitivní z hlediska možné substituce při výpadku dodávek.

Ze změřených časů do úniku byl sestaven graf, který je níže. V grafu není zahrnut vzorek č. 5, jelikož ten byl zatížený vyšším tlakovým rozsahem, tudíž je z tohoto hlediska s ostatními vzorky neporovnatelný. Dále u vzorků č. 1 a 5 se nezdařilo testování trubek ze všech 6 oblastí, kdy v případě vzorku 1 došlo k selhání v oblasti CA1 a u vzorku 5 v oblasti CA3 (viz. obr 69), konkrétně šlo o nedostatečné utěsnění vzorků, což vedlo k předčasnému úniku. Do grafu byla taktéž zakreslena polynomická spojnice trendu 2. stupně, která vykazuje koeficient determinace $R^2=0,62$.



Obr. 86 Závislost času do úniku na počtu cyklů

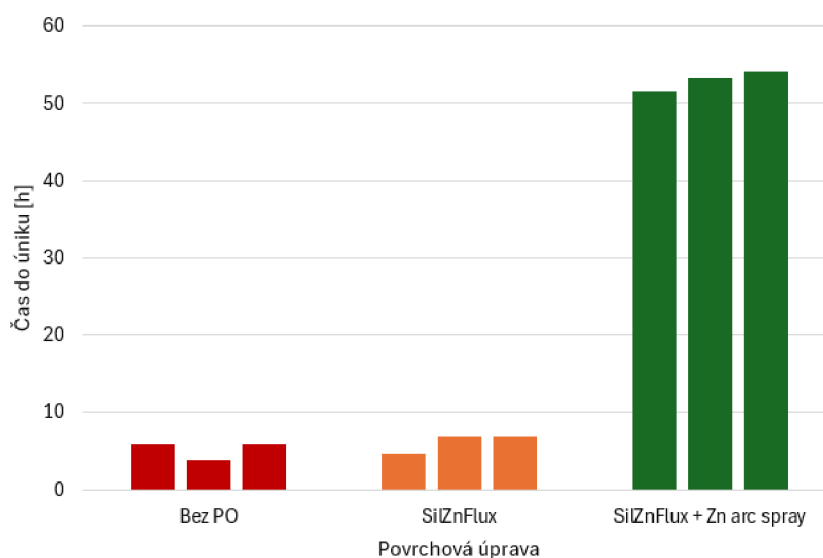
8.1. Doporučená opatření

Po analýze výsledků se jako možná řešení problému nedostatečné korozní odolnosti po cyklickém tlakovém namáhání nabízely dva hlavní směry, kam se ubírat dále – buď změna základního materiálu mikrokanáلكové trubky, anebo vylepšení povrchové úpravy, která by zajišťovala vyšší stupeň ochrany.

Po konzultaci s dodavatelem MPE trubek byla navržena změna materiálu ze slitiny A (Cu 0,4-0,55 %) na slitinu B (Cu max. 0,1 %), čímž by se mělo předejít tvorbě intermetalik CuAl_2 na hranicích zrn. To by mělo zaručit prodloužení únavové životnosti a korozní odolnosti (viz kapitola 4.3.). Jedná se ovšem o velký konstrukční zásah, z kterého by potenciálně mohly pramenit další neočekávané problémy. Navíc by to znamenalo nutnost pořízení nové komorové matrice, jelikož slitiny mají rozdílné chování při průtlačném lisování, což je značně nákladná položka.

Druhým řešením, ke kterému se společně s dodavatelem došlo, je nanosení metalického ochranného povlaku během procesu průtlačného lisování metodou arc spray (viz kapitola 5.3.). Konkrétně se jedná o nanosení zinkové vrstvy o vydatnosti 5-18 g/m² [43], která trubce poskytuje katodovou ochranu, kdy zinek funguje jako obětovaná elektroda, čímž chrání základový materiál.

Bylo rozhodnuto vydat se cestou metalizace zinkem. Dodané vzorky MPE trubek s novou úpravou byly otestované a dosavadní výsledky se jeví nadějně (viz obr. 87). Jedná se ovšem o cyklicky nezatížené trubky, které navíc neprošly ani procesem pájení, kdy probíhají další nežádoucí změny v materiálu, jako je změna mikrostruktury (viz kapitola 5.2.). Proto je nutné i nadále pokračovat v investigaci a zkoumat chování a vlastnosti mikrokanálových trubek v dalších fázích výroby a během své funkční životnosti.



Obr. 87 Porovnání povrchových úprav

9. Závěr

V teoretické části byl nejdřív stručně popsán tepelný výměník z hlediska funkce, nastíněn fyzikální princip a trend v používaných chladivech, kdy se z důvodu ekologických požadavků přechází od chladiv typu HFC a HFO k chladivům přírodním, jako je R744, což vede k vyšším materiálovým a konstrukčním nárokům. Dále jsou popsány zkoušky tepelných výměníků R744, konkrétně zkouška životního cyklu, což je soubor dílčích akcelerovaných testů simulující skutečný provoz. Taktéž byl popsán princip polarizací akcelerovaného korozního testu, kterým se ověřuje materiál z hlediska korozního chování. Následně byl popsán hliník a jeho slitiny s důrazem na princip koroze a její dělení. Dále je v teoretické části popsána multiportová extrudovaná trubka, včetně její výroby, tvrdého pájení a způsoby, jak jí chránit před korozi.

V praktické části byl nejdřív popsán počáteční problém, kdy při zkoušce životnosti IGC výměníku, konkrétně při testu plynotěsnosti, docházelo k selhání v místě aktivní oblasti, tedy v oblasti multiportových trubek a finu. Po prvotním provedení skenu pomocí výpočetní tomografie (CT) se nepodařilo lokalizovat úniky. Byly tedy ověřeny rozměry trubek, jako je průměr kanálku, rozteč kanálků a tloušťka stěny, jelikož se jedná o důležité parametry pro pevnost a odolnost trubky při tlakovém namáhání. Bylo zjištěno celkové prodloužení trubek v ose Y, a proto byla provedena metodou konečných prvků analýza statického zatížení pro zjištění distribuce napětí v příčném řezu, kdy jako nejslabší místa se jeví můstky mezi jednotlivými kanálky, což sice vysvětluje ono prodloužení, nikoliv však únik samotný. Plochá část trubky byla tedy v místě úniku vyleštěna 3mikronovou suspenzí a posléze byla provedena kapilární zkouška, kdy se konečně povedlo nalézt úniková místa. V těchto místech byl proveden příčný řez a metalografický výbrus, kdy na povrchu trubky byla zjištěna důlková koroze přecházející v praskliny postupující až k vnitřním kanálkům. Proto byl proveden další krok – elektrolytické leptání a nafocení pod polarizovaným světlem, čímž se potvrdila domněnka, že k šíření dochází zvenku po hranicích zrn hliníkové slitiny. Následujícím krokem analýzy problému bylo opětovné provedení elektrolytického leptání s tím, že se porovnávala mikrostruktura multiportové trubky před a po procesu tvrdého pájení. Zde bylo zjištěno, že dochází k rekrytalizaci, kdy se jemnozrná struktura přemění na strukturu hrubozrnou, což je obecně nežádoucí jev, vedoucí ke zhoršením vlastností materiálu. Posledním krokem bylo využití elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) s funkcí disperzního rentgenového spektrometru (EDX), kde cílem bylo zjistit chemické složení na hranicích zrn. Tímto bylo zjištěno, že zde dochází k precipitaci katodické fáze CuAl_2 , čímž vzniká oblast s vyšším korozním potenciálem blízkým 750 mV. Když se tato mikrostrukturální změna spojí s únavou materiálu z cyklického

tlakového namáhání, tak výsledkem je korozivní praskání, které ústí v úplnou neschopnost trubky plnit svou funkci.

Proto bylo přistoupeno k návrhu testovací matice, jejímž úkolem bylo zjistit, jaká je závislost mezi cyklickým tlakovým namáháním a zestárnutím materiálu. Jako měřítko tohoto zestárnutí byl zvolen polarizací akcelerovaný korozní test, kdy se trubky natlakují vzduchem, ponoří do solného roztoku a průchodem elektrického proudu dojde k vytvoření ideálních korozních podmínek, kdy se měří čas do poklesu tlaku spojeného se selháním trubky. K tomuto testování bylo vybráno 10 rozdílně zatížených IGC výměníků z hlediska počtu tlakových cyklů, kdy z každého bloku výměníku bylo vypreparováno 6 vzorků z různých oblastí tak, aby byla zohledněna heterogenita vznikající během výroby. V práci je podrobně popsán postup výroby vzorků od samotného získání trubek ze zapájeného výměníku, přes čištění, lepení, korozní test, zalití vzorků, broušení a leštění, leptání až po snímání digitálním mikroskopem.

Během analýzy bylo zjištěno, že v závislosti na počtu cyklů se signifikantně mění mikrostruktura trubky, kdy u nezatížených vzorků dochází k důlkové korozi a u zatížených vzorků převažuje koroze mezikrystalová. Dále bylo zjištěno, že vzorky s nevyhovujícím extruzním profilem v tomto srovnání nevykazují horší výsledky. Taktéž se ukázalo, že trubky od výrobce A a od výrobce B nevykazují rozdíl. Naměřené hodnoty byly zakresleny do grafu s polynomickou spojnicí trendu, která nejlépe vystihuje průběh hodnot.

Na základě výsledků proběhla diskuze s dodavatelem multiportových extrudovaných trubek ohledně možného řešení korozního praskání. Z navržených variant byla vybrána aplikace zinkového povlaku metodou obloukového stříkání. Předběžné výsledky zkoušek, kdy byly otestované dodané vzorky s novou povrchovou úpravou, se zdají nadějně. Oproti dosavadní ochraně trubek typu SilZnFlux dosahuje zinkové stříkání zlepšení parametru výdrže do úniku při PACT o 760 % (z 6 hodin na 53 hodin). Je ovšem nutné podotknout, že se jedná o trubky, které neprošly ani procesem tvrdého pájení, ani zkouškou životního cyklu, jsou tedy tepelně i tlakově nezatížené. Je proto potřeba dalšího výzkumu, aby bylo zjištěno, zda změna povrchové úpravy skutečně povede k žádanému zlepšení materiálových vlastností.

10. Použitá literatura

- [1] LEMORT, Vincent; OLIVIER, Gérard a DE PELSEMAEKER, Georges. *Thermal Energy Management in Vehicles (Automotive Series)*. John Wiley and Sons, 2023. ISBN 9781119251750.
- [2] Valeo. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.valeo.com/>. [cit. 2023-10-05].
- [3] *Interní dokumenty společnosti Valeo*.
- [4] CVUT. *Výměníky tepla v energetice*. Online. Dostupné z: <https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/PRO1-n%C3%A1vrh-v%C3%BDm%C4%9Bn%C3%ADku.pdf>. [cit. 2024-02-01].
- [5] ALFA LAVAL. *How does a plate heat exchanger work*. Online. Dostupné z: <https://www.alfalaval.my/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/heat-exchanger/how-plate-heat-exchanger-work/>. [cit. 2024-03-23].
- [6] MORAN, Michael J. a SHAPIRO, Howard N. *Fundamentals of engineering thermodynamics: SI version*. Fifth edition. John Wiley & Sons, 2006. ISBN 9780470030370.
- [7] CHEMISTRY LEARNER. *First Law of Thermodynamics*. Online. Dostupné z: <https://www.chemistrylearner.com/laws-of-thermodynamics/first-law-of-thermodynamics>. [cit. 2024-03-15].
- [8] HVAC/R & SOLAR. *REFRIGERATION CYCLE DIAGRAM EXPLAINED*. Online. Dostupné z: <https://hvac-eng.com/refrigeration-cycle-diagram-explained/>. [cit. 2024-03-16].
- [9] SUGARMAN, Samuel C. *HVAC Fundamentals*. Fairmont Press, 2007. ISBN 9780881735598,0881735590.
- [10] GRYGIERZEC, Jan a WERLE, Sebastian. Critical evaluation of R134a, R1234yf and R744 in passenger car cooling systems. *Journal of Power Technologies* 100. Roč. 2020, č. 3, s. 232-239.
- [11] EVROPSKÝ PARLAMENT. *DOPORUCENÍ k návrhu rozhodnutí Rady o uzavření kigalské změny Montrealského protokolu o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, jménem Evropské unie*. Online. Dostupné z: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2017-0237_CS.html. [cit. 2024-03-15].

- [12] NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE PUBCHEM. *1,1,1,2-Tetrafluoroethane*. Online. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1_1_1_2-Tetrafluoroethane. [cit. 2024-03-23].
- [13] NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE PUBCHEM. *2,3,3,3-Tetrafluoropropene*. Online. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2776731>. [cit. 2024-03-12].
- [14] BOUTONNET, Jean Charles; BINGHAM, Pauline; CALAMARI, Davide; ROOIJ, Christ de; FRANKLIN, James et al. Environmental Risk Assessment of Trifluoroacetic Acid. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 1999/01/01, roč. 5, č. 1, s. 59-124. ISSN 1080-7039. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10807039991289644>.
- [15] NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE PUBCHEM. *Carbon Dioxide*. Online. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/280>. [cit. 2024-03-24].
- [16] *Protokol externí laboratoře*. 2024.
- [17] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. *SAE J2842, R-1234yf and R744 Design Criteria and Certification for OEM Mobile Air Conditioning Evaporator and Service Replacements*. 2011.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9227:2022, *Corrosion tests in artificial atmospheres*.
- [19] *Periodická tabulka: Výskyt prvků v zemské kůře*. Online. 2023. Dostupné z: <http://www.prvky.com/zemska-kura.html>. [cit. 2023-10-06].
- [20] *Encyklopedie hliníku*. Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [21] INTERNATIONAL ALUMINIUM. *Statistics*. Online. Dostupné z: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>. [cit. 2024-03-16].
- [22] NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE PUBCHEM. *Aluminum*. Online. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5359268>. [cit. 2024-03-12].
- [23] VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Bauxit*. Online. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/rudy/bauxit.html>. [cit. 2024-03-28].
- [24] *Chemical elements*. Online. Dostupné z: <https://images-of-elements.com/aluminium.php>. [cit. 2024-03-16].

- [25] ČESKY NORMALIZAČNÍ INSTITUT. 421401, ČSN EN 573-1 (421401) *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 1: Číselné označování*. 2005.
- [26] ALUMINIUM GUIDE. *Corrosion resistance of aluminum and aluminum alloys*. Online. Dostupné z: <https://aluminium-guide.com/en/korroziya-alyuminiya/>. [cit. 2024-03-26].
- [27] CHOTĚBORSKY, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [28] DEISSMANN, Guido; HANEKE, Kirsten; FILBY, A. a WIEGERS, Rob. *Corrosion behaviour of spent research reactor fuel under OPERA repository conditions*. 2016/10/01.
- [29] LAM, Phuong Vy Thi. *Intergranular Corrosion of Extruded AlMgSi(Cu,Zn) Alloys*. 2016. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136071457>.
- [30] VARGEL, Christian. *CORROSION OF ALUMINIUM*. 1th edition. Elsevier Science, 2004. ISBN 9780080444956.
- [31] IDA, Noriyuki; NISHIMOTO, Masashi; MUTO, Izumi a SUGAWARA, Yu. Role of MnS in the intergranular corrosion and depassivation of sensitized Type 304 stainless steel. Online. *Npj Materials Degradation*. 2024, roč. 8, č. 1. ISSN 2397-2106. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00419-5>. [cit. 2024-03-25].
- [32] ROFFEY, P. a DAVIES, E.H. The generation of corrosion under insulation and stress corrosion cracking due to sulphide stress cracking in an austenitic stainless steel hydrocarbon gas pipeline. Online. *Engineering Failure Analysis*. 2014, roč. 44, s. 148-157. ISSN 13506307. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.004>. [cit. 2024-03-25].
- [33] CRAGNOLINO, Gustavo A. Corrosion fundamentals and characterization techniques. Online. In: *Techniques for Corrosion Monitoring*. Elsevier, 2008, s. 6-45. ISBN 9781845691875. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9781845694050.6>. [cit. 2024-03-25].
- [34] BOBBY KANNAN, M.; BALA SRINIVASAN, P. a RAJA, V.S. Stress corrosion cracking (SCC) of aluminium alloys. Online. In: *Stress Corrosion Cracking*. Elsevier, 2011, s. 307-340. ISBN 9781845696733. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9780857093769.3.307>. [cit. 2024-03-22].

- [35] FANG, Wenli; TANG, Ding; WANG, Huamiao; LI, Dayong a PENG, Yinghong. Optimization of die design for thin-walled flat multi-port tube with the aid of finite element simulation. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020, roč. 277. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116418>. [cit. 2024-03-24].
- [36] TANG, Ding; FANG, Wenli; FAN, Xiaohui; ZOU, Tianxia; LI, Zihan et al. Evolution of the Material Microstructures and Mechanical Properties of AA1100 Aluminum Alloy within a Complex Porthole Die during Extrusion. Online. *Materials*. 2019, roč. 12, č. 1. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12010016>. [cit. 2024-03-24].
- [37] B&S COOLERS. *MPE TUBES*. Online. Dostupné z: <https://bscoolers.com/nase-systemy-mpe-chlazení-vov>. [cit. 2024-03-25].
- [38] FANG, Wenli; TANG, Ding; WANG, Huamiao; LI, Dayong a PENG, Yinghong. Optimization of die design for thin-walled flat multi-port tube with the aid of finite element simulation. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020, roč. 277. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116418>. [cit. 2024-03-24].
- [39] LIGHT METAL AGE. *WEFA Cedar Celebrates Its Ten-Year Anniversary*. Online. Dostupné z: <https://www.lightmetalage.com/news/marketplace/supplier-news/wefa-cedar-celebrates-its-ten-year-anniversary/>. [cit. 2024-03-24].
- [40] SEKULIC, Dušan P. (ed.). *Advances in brazing: science, technology and applications*. Woodhead Publishing in materials. Oxford: Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0857094230.
- [41] LI, Wenya; ZHANG, Chao; GUO, X.P.; ZHANG, Gaoke; LIAO, Hanlin et al. Deposition characteristics of Al–12Si alloy coating fabricated by cold spraying with relatively large powder particles. *Applied Surface Science - APPL SURF SCI*. 2007/06/01, roč. 253, s. 7124-7130. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.02.142>.
- [42] *Solvay Special Chemicals: NOCOLOK Encyclopedia*. 2013.
- [43] *HE Tubing: Alloy description, material data sheets and overview of available (flux) coatings*.

-
- [44] ISMAIL, Nur Suhaili; FADIL, Nor Akmal a ABU BAKAR, Tuty Asma. Influence of Zn and Mg alloying elements on the mechanical properties of Al coating deposited via twin wire arc spray process. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2024. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.12.057>. [cit. 2024-03-27].
- [45] VOJTECH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VSCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [46] *Technický list: Araldite® 2014 Structural Adhesive*. 4th rev. 2014.
- [47] *Technický list: Varikleer*. Číslo verze 5. 2017.

11. Seznam zkratek, obrázků a tabulek

Zkratka	Význam
CFC	Chlorofluorocarbon
CT	Computed Tomography
CAB	Controlled Atmosphere Brazing
EDX	Energy-Dispersive X-ray
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EU	Evropská Unie
FCC	Face-Centered Cubic
FEM	Finite Element Method
GWP	Global Warming Potential
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning
HFC	Hydrofluorocarbon
HFO	Hydrofluoroolefin
HCFC	Hydrochlorofluorocarbon
IGC	Inner Gas Cooler
MPE	Multi-Port Extrusion
ODP	Ozone Depletion Potential
OGC	Outer Gas Cooler
PACT	Polarized Accelerated Corrosion Test
PTC	Positive Temperature Coefficient
R134a	1,1,1,2-tetrafluorethan
R1234yf	2,3,3,3-tetrafluorpropen
R744	oxid uhličitý (CO ₂)

SCE	Saturated Calomel Electrode
SEM	Scanning Electron Microscope
TWAC	Twin Wire Arc Spray

Obrázky:

Obr. 1 Jednotka HVAC [1]	9
Obr. 2 Logo společnosti [2]	10
Obr. 3 Výrobní závod v Žebráku	11
Obr. 4 Výměníky dle pracovního pochodu [4].....	12
Obr. 5 Výměníky dle typu proudění [4].....	13
Obr. 6 Deskový výměník [5].....	14
Obr. 7 Řez mezichladiče stlačeného vzduchu [1]	14
Obr. 8 Vizualizace I. termodynamického zákona [7](přeloženo).....	16
Obr. 9 Vizualizace II. termodynamického zákona.....	16
Obr. 10 Obecný Mollierův diagram [8](přeloženo)	18
Obr. 11 Mollierův diagram [8] (přeloženo).....	18
Obr. 12 Molekula 1,1,1,2-Tetrafluoroethanu [12].....	20
Obr. 13 Molekula 2,3,3,3-tetrafluorpropenu [13]	21
Obr. 14 Molekula oxidu uhličitého [15]	22
Obr. 15 Schéma HVAC elektromobilu	23
Obr. 16 Popis výměníku IGC	23
Obr. 17 Manipulační zkouška [16].....	24
Obr. 18 Klimatická komora [16].....	25
Obr. 19 Teplotní testovací profil.....	25
Obr. 20 Testovací pracoviště [16].....	26
Obr. 21 Tlakový testovací profil.....	26
Obr. 22 Korozní komora [16]	26
Obr. 23 Oblast úniku.....	27
Obr. 24 Testovací profil tlakové pevnosti	27
Obr. 25 Schéma PACT [3]	28
Obr. 26 Produkce primárního hliníku, na základě dat[21].....	30
Obr. 27 Bauxit [23]	32
Obr. 28 Primární hliník [24].....	32
Obr. 29 Značení slitin hliníku dle ČSN EN 573-1 [25]	33
Obr. 30 Obecná charakteristika řad slitin hliníku [26](přeloženo)	34
Obr. 31 E-pH diagram hliníku [28](přeloženo).....	35
Obr. 32 Uniformní koroze	37
	70

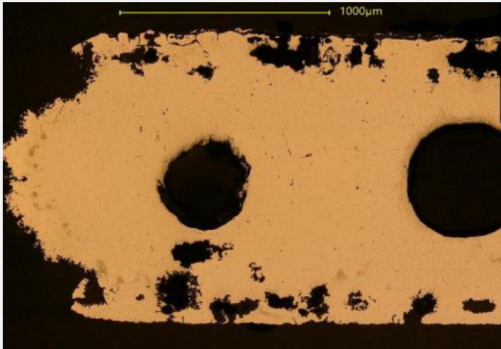
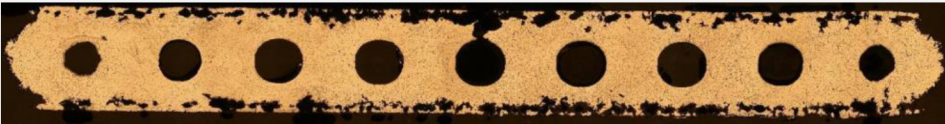
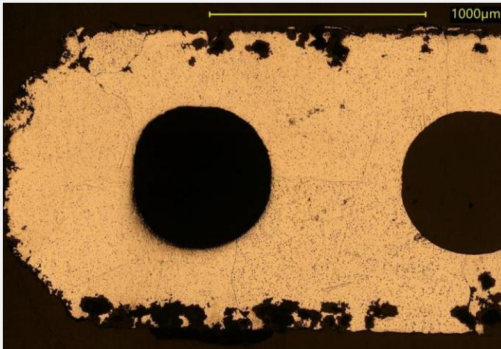

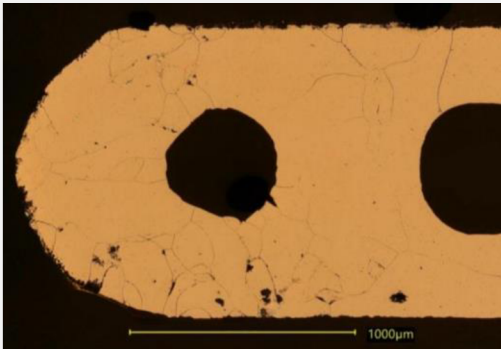

Obr. 33 Důlková koroze [30]	38
Obr. 34 Průběh úbytku hmoty v čase [30](přeloženo).....	38
Obr. 35 Průběh mezikrystalové koroze.....	39
Obr. 36 Fotografie mezikrystalové koroze [31].....	39
Obr. 37 Průběh transkrystalové koroze.....	39
Obr. 38 Fotografie transkrystalové koroze [32]	39
Obr. 39 Průběh šterbinové koroze [30]	40
Obr. 40 SEM šterbinové koroze [33]	40
Obr. 41 Průběh exfoliace [34].....	41
Obr. 42 Zotavení a rekrytalizace během extruze	41
Obr. 43 Příklady profilů MPE trubek [36].....	42
Obr. 44 Trubky zapájené v těle výměníku [37]	42
Obr. 45 Komorová matrice [39]	43
Obr. 46 Produkce MPE trubek [3].....	43
Obr. 47 Pájený spoj trubka – fin [40]	44
Obr. 48 Řez pájeným spojem[3].....	44
Obr. 49 Diagram Al-Si [41].....	45
Obr. 50 Cladový materiál [3]	45
Obr. 51 Mokrý nanášení tavidla [42]	46
Obr. 52 Suché nanášení tavidla [42]	46
Obr. 53 Ochrana obětovanou anodou [3].....	47
Obr. 54 Koroze finu [3]	47
Obr. 55 Schéma nástřikové hubice [44](přeloženo)	48
Obr. 56 Oblasti úniku IGC	49
Obr. 57 Vzorky z oblasti úniku	49
Obr. 58 CT sken trubek.....	49
Obr. 59 Kontrola rozměrů trubky.....	50
Obr. 60 FEM simulace	50
Obr. 61 Vyleštěné únikové oblasti	51
Obr. 62 Detail místa úniku pod mikroskopem.....	51
Obr. 63 Porovnání před a po elektrolyt. leptáním	51
Obr. 64 Detail vzniku korozního napadení	51
Obr. 65 Mikrostruktura před a po pájení	52
Obr. 66 SEM analýza	52
Obr. 67 Zkoumaná hranice zrna.....	52
Obr. 68 Precipitace katodické fáze na hranicích zrn [30](přeloženo)	53
Obr. 69 Oblasti vzorků.....	54
Obr. 70 IGC před přípravou.....	55
Obr. 71 IGC po odstranění finu	55

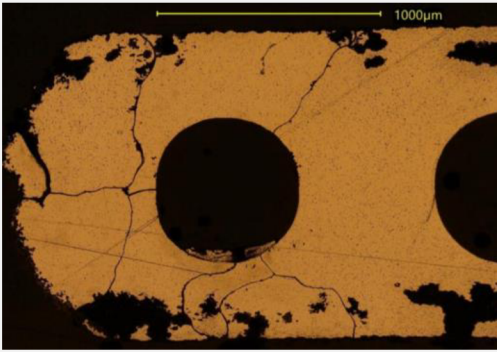

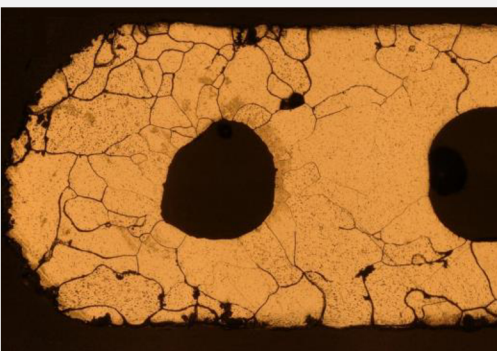
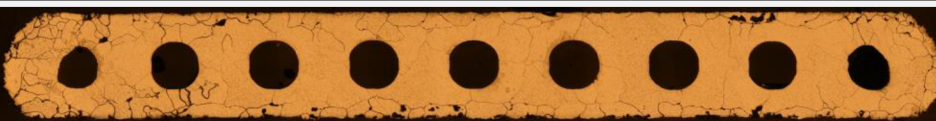
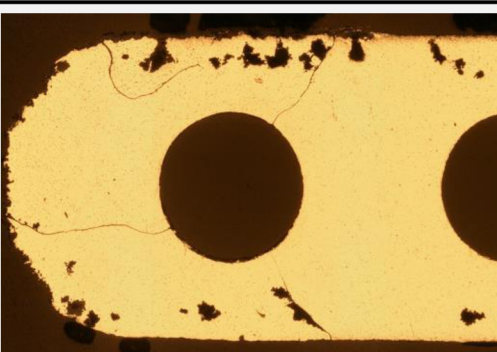
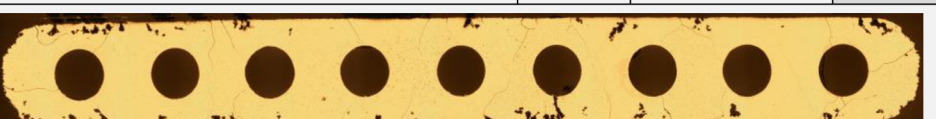
Obr. 72 Dvojice MPE trubek.....	55
Obr. 73 Jednotlivé MPE trubky	55
Obr. 74 Zalepené vzorky	56
Obr. 75 Vzorek před PACT.....	56
Obr. 76 Pracoviště PACT.....	57
Obr. 77 Detail uchycení vzorku	57
Obr. 78 Vzorky před zalitím.....	57
Obr. 79 Vzorky po zalití	57
Obr. 80 Laboratorní bruska a leštička	58
Obr. 81 Vzorek po vyleštění.....	58
Obr. 82 Proces leptání.....	59
Obr. 83 Porovnání před a po leptání	59
Obr. 84 Snímání mikroskopem	59
Obr. 85 200x zvětšení	59
Obr. 86 Závislost času do úniku na počtu cyklů.....	60
Obr. 87 Porovnání povrchových úprav.....	61

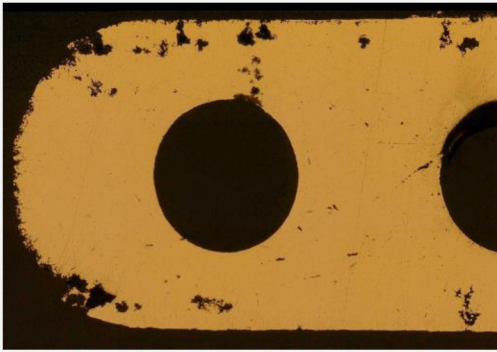
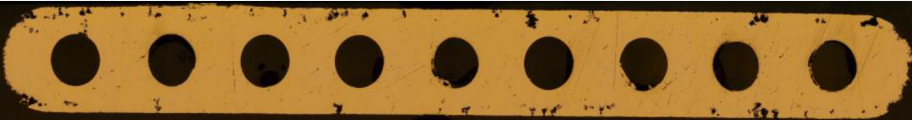
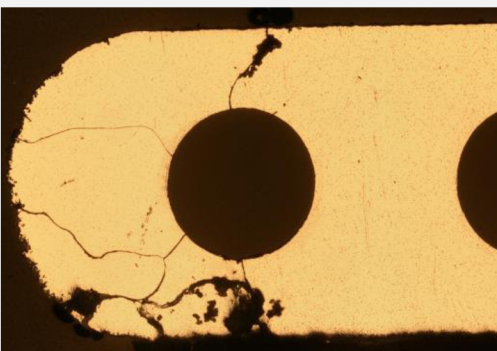

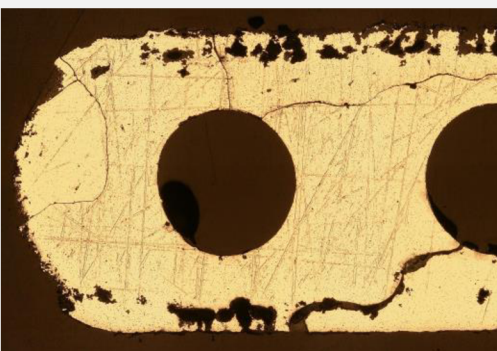
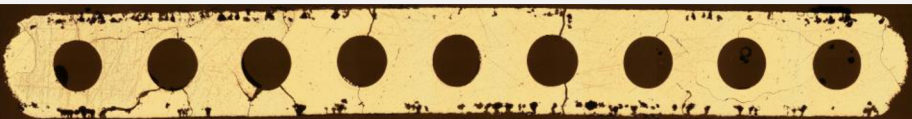
Tabulky:

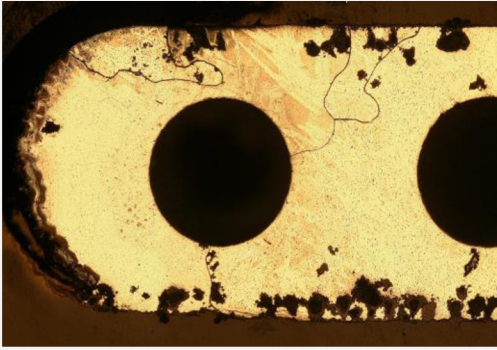
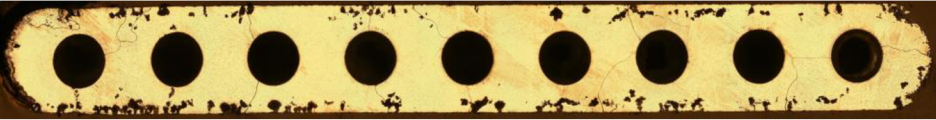
Tab. 1 Porovnání chladičů, sestaveno na základě [7][8]	19
Tab. 2 Teplotní testovací profil, na základě [12]	25
Tab. 3 Testovací profil tlakové pevnosti; na základě [12]	27
Tab. 4 Přehled základních vlastností hliníku, sestaveno na základě [18]	31
Tab. 5 Řady slitin hliníku, sestaveno na základě [8][16][21]	34
Tab. 6 Korozní potenciál kovů vůči kalomelové elektrodě SCE [25]	36
Tab. 7 Korozní potenciál intermetalidů vůči kalomelové elektrodě SCE [26] ..	37
Tab. 8 Výsledky EDX.....	53
Tab. 9 Přehled vzorků	76

12. Přílohy

Vz.	Fotografie	Popis		Čas úniku [h]		
1		výr.	A	HA1	22:51	
		t_m	X	HA2	15:12	
		Δp		HA3	14:55	
		n		CA1	*	
		pozn.		nevyhovující extruze, nezatíženo	CA2	19:36
			CA3	15:03		
			Ø	17:31		
						
	2		výr.	A	HA1	12:19
			t_m	X	HA2	17:46
Δp			HA3		11:59	
n			CA1		14:21	
pozn.			nezatíženo		CA2	16:17
			CA3	16:49		
			Ø	14:55		
						
3			výr.	A	HA1	10:28
			t_m	165 °C	HA2	9:02
	Δp		5-17 MPa	HA3	11:07	
	n		396 925	CA1	9:12	
	pozn.		nevyhovující extruze	CA2	12:05	
			CA3	10:36		
			Ø	10:25		
						

Vz.	Fotografie	Popis		Čas úniku [h]	
4		výr.	A	HA1	15:51
		t_m	165 °C	HA2	14:28
		Δp	5-17 MPa	HA3	14:06
		n	150 000	CA1	15:11
		pozn.		CA2	14:28
	CA3			17:38	
	Ø			15:17	
					
5		výr.	A	HA1	10:21
		t_m	165 °C	HA2	10:46
		Δp	4-20 MPa	HA3	10:06
		n	120 800	CA1	13:41
		pozn.	vyšší tlakový rozsah, nevyhovující extruze	CA2	8:34
	CA3			*	
	Ø			10:41	
					
6		výr.	B	HA1	13:45
		t_m	165 °C	HA2	11:26
		Δp	5-17 MPa	HA3	12:27
		n	150 000	CA1	9:52
		pozn.		CA2	11:42
	CA3			11:53	
	Ø			11:51	
					

Vz.	Fotografie	Popis		Čas úniku [h]	
		výr.	B	HA1	HA2
7		t_m	X	HA1	16:44
		Δp		HA2	16:26
		n		HA3	15:19
		pozn.		nezatíženo	CA1
			CA2	16:10	
			CA3	24:16	
			Ø	17:22	
					
8		výr.	B	HA1	10:14
		t_m	165 °C	HA2	8:27
		Δp	5-17 MPa	HA3	9:51
		n	487 542	CA1	10:28
			CA2	9:02	
			CA3	11:07	
			Ø	9:51	
					
9		výr.	B	HA1	17:14
		t_m	165 °C	HA2	16:27
		Δp	5-17 MPa	HA3	20:49
		n	75 000	CA1	12:02
			CA2	14:59	
			CA3	17:45	
			Ø	16:33	
					

Vz.	Fotografie	Popis		Čas úniku [h]	
		výr.			
10		výr.	B	HA1	13:25
		t_m	165 °C	HA2	13:35
		Δp	5-17 MPa	HA3	16:45
		n	250 000	CA1	14:54
		pozn.		CA2	16:00
	CA3			13:52	
	Ø			14:45	
					

Tab. 9 Přehled vzorků

(t_m – teplota média, Δp – tlakový rozsah, n – počet cyklů)