

Diplomová práce

Analýza pájeného spoje trubek používaných pro výrobu klimatizace automobilů

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Tomáš Ressel

Vedoucí práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

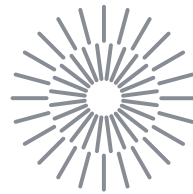
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Analýza pájeného spoje trubek používaných pro výrobu klimatizace automobilů

Jméno a příjmení:

Bc. Tomáš Ressel

Osobní číslo:

S22000209

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Zadávací katedra:

Katedra strojírenské technologie

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Charakteristika technologií svařování a pájení. Metody nerozebíratelného spojování materiálů.
2. Způsoby destruktivního a nedestruktivního testování svařovaných a pájených spojů.
3. Pro zvolený díl klimatizace automobilu provést analýzu pájeného spoje z hlediska změny struktury materiálu, tvrdosti (mikrotvrdosti) v okolí pájeného spoje a změny mechanických vlastností spojovaného materiálu důsledkem tepelného namáhání.
4. Statistické vyhodnocení experimentu.
5. Diskuze a závěr.

Rozsah grafických prací: obrázky, tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] NEUMANN, H. Teorie svařování. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN: 978-80-7494-171-9.
[2] MUSIL, M., MORAVEC, J. a kol. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. Skripta IWE (International Welding Engineer). 2017.
[3] KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení. Skripta IWE (International Welding Engineer). 2016.
[4] RUŽA, V. Pájení. 2. vyd. Praha: SNTL, 1988. 456 s. ISBN 04-216-88.
[5] VOJTĚCH, D. Kovové materiály. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
[5] NEUBAUER, J., M. SEDLAČÍK a O. KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.

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

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

Datum zadání práce: 6. listopadu 2023

Předpokládaný termín odevzdání: 6. května 2025

L.S.

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

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 6. listopadu 2023

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

Analýza pájeného spoje trubek používaných pro výrobu klimatizace automobilů

Abstrakt

V rámci diplomové práce je posuzována kvalita a vlastnosti pájených spojů používaných v trubkách klimatizačních systémů automobilů, které jsou klíčové pro vedení chladícího média. S ohledem na důležitost těchto spojů pro celkovou funkčnost a výkonnost klimatizačních systémů, se práce soustředí na zkoumání vlivu procesů pájení na kvalitu a vlastnosti materiálů spojů. V teoretické části je představen přehled základních principů spojování materiálů nerozebíratelnými spoji, s důrazem na rozdíly mezi svařováním a pájením a jejich specifické použití v praxi. Dále jsou zkoumány standardní metody testování spojů rozdělené na destruktivní a nedestruktivní, aby byly objasněny jejich výhody a omezení při hodnocení kvality a integrity spojů.

Experimentální část práce se soustředí na analýzu pájeného spoje, konkrétně na změny v mikrostrukturách materiálů, tvrdosti v okolí spoje a na mechanické vlastnosti materiálu ovlivněné tepelným namáháním během pájení. Byly provedeny testy za účelem identifikace klíčových faktorů, které ovlivňují kvalitu a mechanické vlastnosti v dané oblasti.

Výběr tématu této diplomové práce byl motivován snahou o redukci materiálového odpadu a nákladů ve výrobních procesech v automobilovém průmyslu tím, že se zaměřuje na trubky a pájené spoje s vizuálními nedostatky, jako je opálení (napálení), které jsou obvykle vyřazovány navzdory potenciálně zachovaným mechanickým vlastnostem materiálu. Práce zkoumá, jak povrchové vady, tak i vnitřní vady, které ovlivňují funkčnost a spolehlivost těchto spojů, s cílem vyvrátit běžnou představu, že takové nedostatky nutně snižují kvalitu spoje.

Klíčová slova

Pájený spoj, klimatizace, hliník, tvrdost, mikrotvrdost, opálení, napálení, krupička.

Brazing joint analysis of tubes used for automotive air conditioning production

Abstract

The quality and properties of braze joints used in pipes of car air-conditioning systems, which are crucial for the coolant conduction, are assessed in this thesis. Given the importance of these joints to the overall functionality and performance of air conditioning systems, the thesis focuses on investigating the effect of brazing processes on the quality and properties of the joint materials. The theoretical part presents an overview of the basic principles of joining materials by non-separable joints, with emphasis on the differences between welding and brazing and their specific applications in practice. Standard methods of testing joints, divided into destructive and non-destructive methods, are also examined to clarify their advantages and limitations in assessing the quality and integrity of joints.

The experimental part of the thesis focuses on the analysis of the brazing joint, specifically on the changes in the microstructures of the materials, the hardness around the joint and the mechanical properties of the material affected by thermal stresses during brazing. Tests were performed to identify the key factors that affect the quality and mechanical properties in the area.

The choice of the topic for this thesis was motivated by the desire to reduce material waste and costs, in automotive manufacturing processes by focusing on tubes and braze joints with visual defects such as scorch marks, which are usually discarded despite potentially retaining mechanical properties. The work examines both surface defects and internal defects that affect the functionality and reliability of these joints, with the aim of dispelling the common perception that such defects necessarily reduce the quality of the joint.

Keywords

Brazing joint, conditioning, aluminium, hardness, microhardness, tanning, burn-in, crust structure.

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Taktéž bych chtěl poděkovat Ing. Martinovi Švecovi, Ph.D. za vstřícnost, ochotu a pomoc při získání potřebných informací a podkladů.

Další poděkování bych rád věnoval své rodině, a to za trpělivost a především důvěru, ve studiu a podporu v těch nejtěžších chvílích. Poslední poděkování bych rád věnoval nejbližšímu kruhu přátel, bez kterých bych si nedokázal odpočinout, najít sílu a energii na zdolání všech překážek.

Speciální poděkování patří také firmě Y za jejich profesionální přístup a umožnění provedení klíčových testů, které byly zásadní pro realizaci této práce. Jejich podpora a spolupráce výrazně přispěly k úspěšnému dokončení této práce.

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 12 |
| 2 | Teoretická část | 13 |
| 2.1 | Metody nerozebíratelného spojování materiálů | 14 |
| 2.1.1 | Metoda svařování..... | 14 |
| 2.1.2 | Metoda pájení | 15 |
| 2.1.3 | Metoda nýtování | 16 |
| 2.1.4 | Metoda lepení | 18 |
| 2.1.5 | Metoda tlakového spoje | 20 |
| 2.2 | Charakteristika technologií svařování a pájení | 23 |
| 2.3 | Technologie svařování | 24 |
| 2.3.1 | Svařování s využitím tepla | 26 |
| 2.3.2 | Svařování s využitím tlaku | 28 |
| 2.3.3 | Svařování s využitím tepla a tlaku | 29 |
| 2.3.4 | Teplotně ovlivněná oblast při svařování – napětí a deformace | 33 |
| 2.4 | Technologie pájení | 36 |
| 2.4.1 | Pájení vlnou | 38 |
| 2.4.2 | Pájení přetavením | 39 |
| 2.4.3 | Pájení konvekční metodou | 40 |
| 2.4.4 | Pájení infračerveným zářením | 40 |
| 2.4.5 | Pájení kondenzační metodou | 41 |
| 2.4.6 | Pájení laserem..... | 42 |
| 2.4.7 | Mechanizované pájení plamenem..... | 43 |
| 2.4.8 | Pájení indukční | 44 |
| 2.5 | Způsoby destruktivního a nedestruktivního testování svařovaných a pájených spojů | 46 |
| 2.5.1 | Testování svařovaných spojů..... | 46 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.5.2 | Testování pájených spojů | 48 |
| 2.6 | Použité metody pro pájený vzorek | 50 |
| 2.6.1 | Zkouška tvrdosti dle Vickerse (mikrotvrdość) | 50 |
| 2.6.2 | Mikroskopická analýza materiálu pomocí elektronového mikroskopu | 52 |
| 2.6.3 | Metoda výpočetní tomografie | 53 |
| 3 | Experimentální část | 55 |
| 3.1 | Představení testovaného dílu klimatizace | 55 |
| 3.2 | Materiálové specifikace | 57 |
| 3.2.1 | Chemické složení – trubka (EN AW-3003) | 57 |
| 3.2.2 | Chemické složení – union (EN AW-6063) | 57 |
| 3.2.3 | Chemické složení – pájecí drát (KSW-31R) | 57 |
| 3.3 | Nastavení stroje a teplotní profil | 58 |
| 3.4 | Provedení experimentální části | 60 |
| 3.4.1 | Héliový test | 61 |
| 3.4.2 | Vizuální kontrola | 62 |
| 3.5 | Vyhodnocení SEM a EDS analýzy povrchové vrstvy | 63 |
| 3.6 | Metoda výpočetní tomografie (CT) – pájený spoj | 66 |
| 3.7 | Příprava vzorků pro experiment | 70 |
| 3.8 | Podmínky pro měření mikrotvrdości | 73 |
| 3.9 | Měření a grafické znázornění mikrotvrdości | 74 |
| 3.10 | Vyhodnocení SEM a EDS analýzy vnitřní vrstvy | 83 |
| 4 | Statistické vyhodnocení experimentu | 90 |
| 5 | Závěr | 93 |
| | Použitá literatura | 96 |
| | Seznam příloh | 100 |

Seznam zkratek

| | | |
|-----------------|---|------------------------|
| E | Youngův modul pružnosti v tahu | [MPa] |
| I | Intenzita elektrického proudu | [A] |
| IR | Infračervené světlo | [nm] |
| Q | Vnesené teplo | [J] |
| R | Celkový elektrický odpor v místě svaru | [Ω] |
| R_e | Mez kluzu v tahu | [MPa] |
| R_m | Mez pevnosti v tahu | [MPa] |
| $R_{p0,2}$ | Smluvní mez kluzu | [MPa] |
| T | Aktuální teplota vzorku | [$^{\circ}\text{C}$] |
| T_0 | Počáteční teplota vzorku | [$^{\circ}\text{C}$] |
| W_A | Adhezní práce | [J] |
| W_B | Kohézní práce | [J] |
| ΔT | Změna teploty (rozdíl) | [$^{\circ}\text{C}$] |
| Δl | Změna délky vzorku | [mm] |
| l_0 | Počáteční délka vzorku | [mm] |
| t | Stanovený čas | [s] |
| u | Aritmetický průměr délek uhlopříček vtisku | [mm] |
| α | Lineární součinitel teplotní roztažnosti | [1/K] |
| ε | Poměrné prodloužení vzorku | [-] |
| λ | Tepelná vodivost materiálu | [W/m·K] |
| σ | Napětí vznikající uvnitř vzorku | [MPa] |
| CO ₂ | Oxid uhličitý | |
| CT | Výpočetní tomografie | |
| EDS | Energiově disperzní spektroskopie | |
| FBP | Filtrovaná zpětná projekce | |
| HV | Vickersovo tvrdostní číslo | |
| HV0,01 | Vickersovo tvrdostní číslo při zatížení 10g | |
| HV0,1 | Vickersovo tvrdostní číslo při zatížení 100g | |
| HV1 | Vickersovo tvrdostní číslo při zatížení 1000g | |
| MIG | Metal Inert Gas | |
| MAG | Metal Active Gas | |
| NG | Špatný kus | |

| | |
|---------|---|
| Nd: YAG | Neodymium-doped yttrium aluminum garnet |
| OK | Dobrý kus |
| SE | Sekundární elektrony |
| SEM | Skenovací elektronový mikroskop |
| TEM | Transmisní elektronový mikrosko |
| TIG | Tungsten Inert Gas |
| TOZ | Teplotně ovlivněná oblast |

1 Úvod

Výběr tématu této diplomové práce byl motivován snahou o redukci materiálového odpadu a nákladů, ve výrobních procesech v automobilovém průmyslu tím, že se zaměřuje na trubky a pájené spoje s vizuálními nedostatky, jako je opálení (napálení), které jsou obvykle vyřazovány navzdory potenciálně zachovaným mechanickým vlastnostem materiálu. Práce zkoumá, jak povrchové vady ovlivňují funkčnost a spolehlivost těchto spojů s cílem vyvrátit běžnou představu, že takové nedostatky nutně snižují kvalitu spoje.

Automobilový průmysl se stále snaží inovativně zvyšovat komfort a efektivitu vozidel. Konstrukce klimatizačního systému se hlavně zaměřuje na funkčnost a správné spojení trubek, jako jeden z důležitých aspektů. Tato diplomová práce zkoumá detailněji spojení trubek pomocí technologie pájení, použitých v klimatizačních systémech vozidel, přičemž klade důraz na specifické vlastnosti hliníkových slitin a daného pájeného spoje.

Komponenty klimatizačních jednotek jsou vyrobeny ze slitin hliníku, které jsou pro svojí nízkou měrnou hmotnost a excelentní tepelnou konduktivitu výhodným konstrukčním materiálem. Navzdory tomu, spojování hliníku technologií pájení představuje své specifické technické výzvy. Cílem této práce není jen poskytnout hlubší pohled na vlastnosti pájených spojů, ale též prozkoumat případné strukturní změny součástí v jeho okolí. Dalším cílem je pokusit se rozlišit pomocí vizuální kontroly díly s odpovídajícím a nevhodným stupněm kvality. Důraz při analýze pájených spojů, bude kladen na jejich vizuální podobu, odolnost, stabilitu a další mechanické vlastnosti. Detailní studie napálení trubek a vizuální kontroly, budou rovněž provedeny s cílem identifikovat klíčové charakteristiky, které ovlivňují daný pájený spoj a jeho okolí.

Nechceme jen poskytnout analýzu stávajícího stavu, nýbrž chceme přispět ke stanovení nejvhodnějších parametrů pro pájenou část trubkových spojů v klimatizačním systému. Usilujeme o to, aby byly tyto spoje nejen bezpečné a efektivní, taktéž chceme zajistit snadno proveditelný postup pro vizuální kontrolu rozpoznání mezi komponentami zodpovídající se normám vysoké kvality, která je dána výrobcem nebo požadavky zákazníka.

2 Teoretická část

Tato část diplomové práce se podrobně věnuje analýze pájených spojů, které představují klíčovou technologii v rámci nerozebíratelných spojů. Pájení jakožto proces spojování materiálů je zásadní díky své schopnosti rychle a efektivně spojit součásti s minimálním narušením jejich základní struktury. Tepelné zpracování zde hraje velkou roli, také je nezbytnou součástí pájení, může výrazně ovlivnit mikrostrukturu materiálů na spojovaném místě, což má přímý dopad na mechanické vlastnosti a dlouhodobou stabilitu spoje.

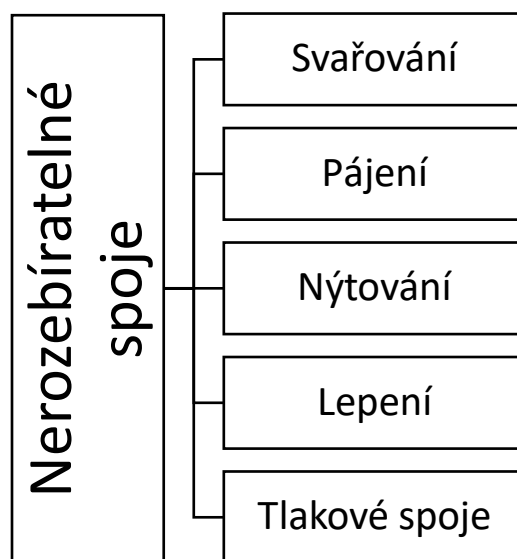
V rámci teoretického zkoumání jsou dále rozebrány metody nerozebíratelných spojení, zahrnující jak svařování, tak i pájení. Tyto technologie jsou rozebrány s ohledem na jejich principy, aplikace a specifické výhody či omezení. Zatímco svařování je často využíváno pro vytváření pevných a odolných spojů v náročných aplikacích, pájení nabízí jemnější, ale vysoce přesné způsoby spojení, které jsou ideální pro komplexní nebo citlivé komponenty.

Dále se práce zaměřuje na základní metody testování nerozebíratelných spojů. Tyto metody lze rozdělit na nedestruktivní a destruktivní, přičemž každá skupina nabízí unikátní přístupy k hodnocení kvality a integrity spojů. Nedestruktivní metody, jako je ultrazvukové testování, rentgenová inspekce nebo vizuální hodnocení, umožňují detekci potenciálních vad bez poškození testovaného spoje. Na druhé straně destruktivní testování, včetně tahových testů nebo mikroskopické analýzy, poskytuje přímé informace o mechanických vlastnostech a strukturální integritě spojů za cenu zničení testovaného vzorku.

Tato část práce tak poskytuje ucelený přehled o technologiích nerozebíratelných spojů a metodách jejich testování, s důrazem na pájené spoje. Prostřednictvím detailního zkoumání různých aspektů pájení a svařování a přístupů k jejich testování, práce usiluje o poskytnutí hlubokého pochopení těchto zásadních technologií, které jsou nezbytné pro vývoj a udržení kvality v moderním inženýrství a výrobních procesech.

2.1 Metody nerozebíratelného spojování materiálů

Jak z názvu můžeme pochytit, jedná se o trvalá spojení materiálu, které bez poškození nelze rozdělit. Mezi výhodu se zde řadí vysoká pevnost, odolnost proti prostředí nebo také nižší výrobní náklady oproti metodě rozebíratelných spojů. Velkou nevýhodou jsou opravy nebo údržba součástí, které jsou spojeny nerozebíratelnou metodou, jako například svařováním, pájením nebo nýtováním, základní rozdělení viz obr. 2.1. Dále také omezení z hlediska spojovaných materiálů, poškození a flexibility spojovaných materiálů [1, 2].



Obr. 2.1 Základní rozdělení metod nerozebíratelného spojování materiálu [1]

2.1.1 Metoda svařování

Tato metoda má nezastupitelnou roli v tvorbě nerozebíratelných spojů, patří mezi nejvyužívanější metody. Tento proces je založený na metalurgických principech, umožňuje trvalé spojení materiálů pomocí aplikace tepla, tlaku nebo jejich kombinace, čímž vytváří spoje na mikroskopické úrovni s využitím různých fyzikálních jevů, včetně světla, zvuku a tepla. Mezi metody svařování patří široká paleta technik, z nichž ISO 4063 rozlišuje až 93 typů, z čehož přibližně 31 tvoří základní a nejčastěji využívané techniky [1, 2, 3].

Základní rozdělení, dle působení a příslušné metody:

- **Svařování s využitím tepla (tavné)** – elektrickým obloukem (MIG/MAG), plamenem, laserem.
- **Svařování s využitím tlaku** – odporové (bodové, švové, ...), indukční, třením.
- **Svařování s využitím tepla a tlaku** – ultrazvukem, za studena.

Slouží nejen k spojování různorodých materiálů, ale také k jejich dělení, od kovů až po plasty a keramiku. Tato flexibilita a univerzálnost je využita v téměř všech odvětvích, jako je automobilový průmysl, stavebnictví, kosmonautika a také v lodím průmyslu. Přídavný materiál použitý během svařovacího procesu, je zásadní pro kvalitu a odolnost svaru. U MIG/MAG svařování může být drát obalený nebo plněný, kde plnění může obsahovat různé legovací prvky nebo látky zajišťující stabilní oblouk a ochranu svaru. Obalené elektrody obsahují jak kovové jádro, tak ochranný obal, který stabilizuje oblouk a chrání svar před atmosférou, přidává také do svaru legující prvky pro zlepšení výsledného svarového spoje. Jednou z nevýhod je velké tepelné ovlivnění svařovaného materiálu díky velkému vnesení tepelné energie, která způsobí, jak změny ve struktuře, tak také vznik velkých vnitřních napětí a deformací, samozřejmě záleží na použité technologii [1, 2, 3].

2.1.2 Metoda pájení

Pájení je proces, který umožňuje vytváření nerozebíratelných spojů prostřednictvím aplikace tepla a pájky, která se taví při nižších teplotách, než jsou teploty tavení základních materiálů. Tento proces spočívá v difuzi a vzájemné rozpustnosti pájky a základního materiálu na rozdíl od svařování, kde se využívají přídavné materiály s podobným složením, jako má základní materiál. Pájení se odlišuje výrazným rozdílem ve složení kovů ve spoji a je spojeno s použitím tavidel, která usnadňují tvorbu spoje, buď jako samostatný prvek nebo jako součást pájky [1, 2].

Proces pájení zahrnuje několik klíčových kroků, včetně přípravy, očištění pomocí tavidel a použití tepla pro roztavení a aplikaci pájky. Výsledný spoj vzniká natavením pájky, která smáčí povrch základního materiálu, čímž vytváří spoj díky difuzním procesům a mezifázovému rozhraní mezi roztavenou pájkou a pevným kovem, což vede k vytvoření kovové vazby [1, 2].

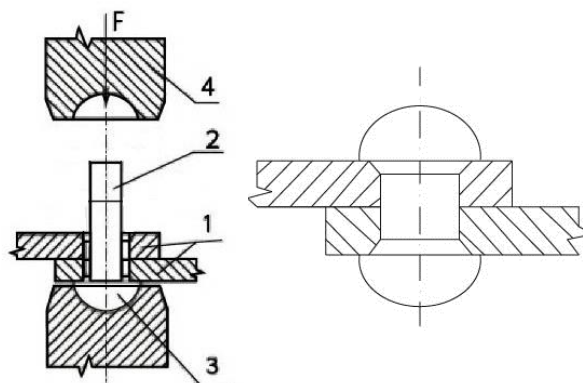
V porovnání s tavným svařováním, které vyžaduje vyšší teploty, než je teplota tavení základního materiálu, jsou teploty pájení výrazně nižší, typicky od 50 °C do 450 °C pro měkké pájení a od 450 °C do 1 200 °C pro tvrdé pájení. Výhody pájení zahrnují minimální tepelné ovlivnění materiálů, což vede k nižší spotřebě energie, menšímu vnitřnímu napětí a méně strukturálním změnám základního materiálu [1, 2].

2.1.3 Metoda nýtování

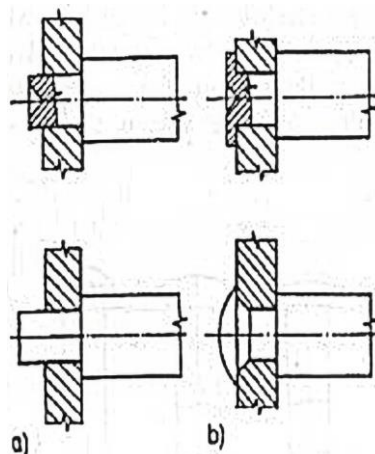
V nynější době dosti opomíjená metoda, protože v některých oblastech byla nahrazena modernějšími metodami, jako je svařování či lepení. Navzdory tomu existují specifické aplikace, kde nýtování zůstává stálou volbou díky svým unikátním vlastnostem. Základní techniky zahrnují lisování, kování, kývavé nýtování a radiální bodové nýtování. Spojení součástí je zajištěno tvárnou deformací nýtu, kdy nýtový spoj drží pohromadě pomocí tření mezi spojovacími materiály. Tato metoda je prováděna, jak za studena (tvarový styk), tak za tepla (silový styk) [1, 2].

Základní rozdělení nýtování:

- **Nepřímé** – hlava nýtu, je vytvořena pomocí hlavičkáře (nástroj–definovaná geometrie), sevření spojovaných součástí mezi hlavy nýtu (Obr 2.2).
- **Přímé** – hlava nýtu, je vytvořena napěchováním a roznýtováním, za pomoci různých nástrojů, které nemají definovanou geometrii (Obr. 2.3).



Obr. 2.2 Nepřímé nýtování; 1) spojované materiály, 2) dřík nýtu, 3) opěrná hlava nýtu a 4) hlavičkář (nástroj) [2]

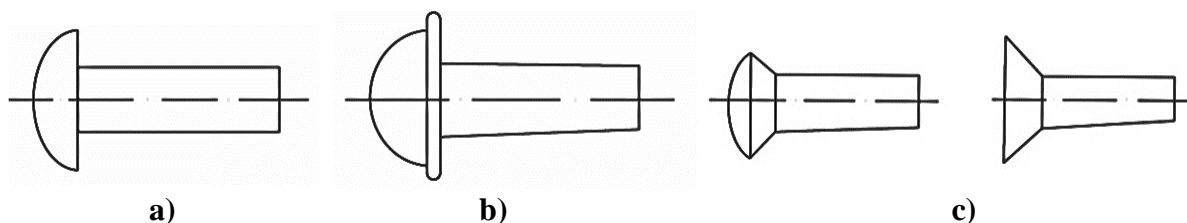


Obr. 2.3 Přímé nýtování; a) před nýtováním, b) po nýtování [2]

Nýty mohou být plné nebo duté, přičemž se vyrábějí z různých materiálů, včetně měkké oceli, mosazi, hliníku a dalších materiálů. Nýty mají různé typy hlav, jako je čočkovitá, půlkulatá nebo zápustná. Plné nýty jsou používány v takřka většině nýtovaných spojení, duté nýty jsou vhodné pro spojování materiálů, kde je za potřeby použití menších nýtovacích sil [1, 2].

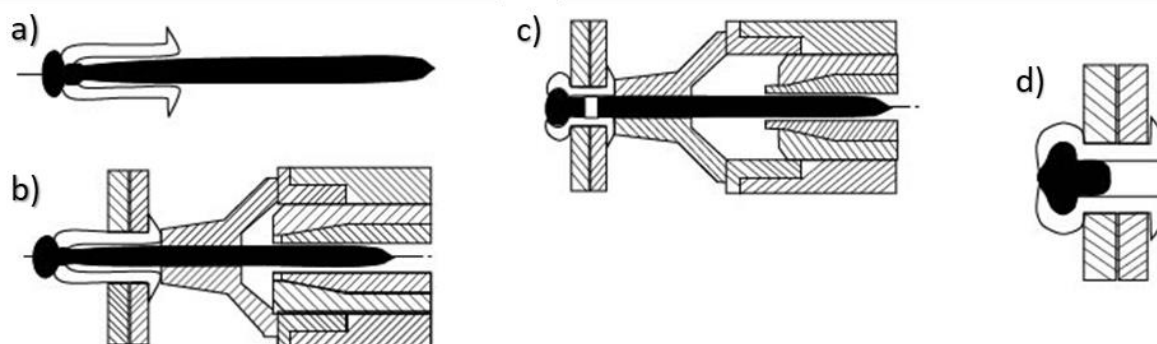
Podle tvaru a způsobu použití, zobrazení na obr. 2.4 [2]:

- **Konstrukční nýty**
- **Kotlové nýty**
- **Zápustné nýty**
- **Drobné nýty**
- **Speciální nýty** – nýty duté, s trnem, rozpěrné, nýtovací matice a výbušné (Obr. 2.4).



Obr. 2.4 Různé tvary nýtů; a) konstrukční, b) kotlové, c) zápustné [2]

Nýtové spoje zůstávají nezbytnou technologií v řadě průmyslových odvětví, včetně leteckého průmyslu, kde se stále využívají pro svou spolehlivost a v některých případech pro svojí prozatímní nenahraditelnost. Dobrým příkladem je výroba letounu Airbus, který se skládá z duralových plechů, které při použití technologie svařování, natolik ovlivní změnu struktury a pevnost, že se nadále využívá metoda nýtování ke spojení těchto plechů, hliníkové nýty (v řádech milionů nýtů na jeden letoun) [1, 2].



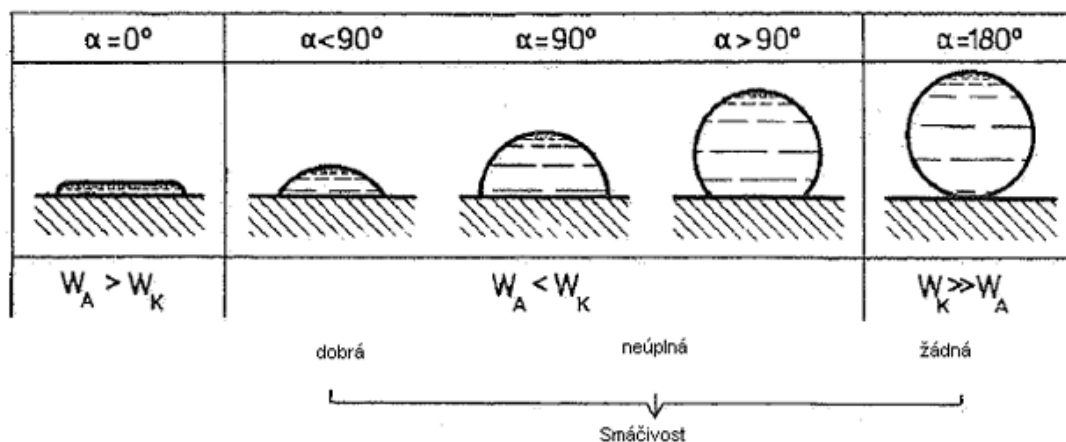
Obr. 2.5 Speciální metoda nýtování – s trnem (trhací nýt); a) nýt s trnem, b) nýtovací kleště s nýtem, c) trn roztahuje dřík a díky kleštím, se utrhne, d) hotový nýtový spoj [2]

2.1.4 Metoda lepení

Lepení představuje technologii spojování materiálů bez mechanických spojovacích prvků a tepelného zpracování. Lepené spoje si zachovávají strukturu materiálů, bez vlivu vysokých teplot a umožňují spojení různorodých materiálů s vysokou pevností ve smyku, přičemž spoj může být i těsný pro plyny a kapaliny. Proto spojení různorodých materiálů není problém, jako např. dřevo, plasty, kovy, keramiky a skla. Velmi často nahrazují spoje nýtové a svarové, protože je zde absence děr ve spojovaných materiálech, což znamená, že konstrukce není oslabena a zároveň je minimálně ovlivněna napětím kolem spoje (Obr. 2.7). Také oproti jiným metodám z hlediska estetiky, náročnosti přípravy a aplikace. Mezi hlavní nevýhodu oproti ostatním metodám, můžeme zařadit sníženou odolnost proti vysokým teplotám, v některých případech i proti vlhkosti a stárnutí [1, 4].

Výběr a kvalita lepidla, zejména jeho adheze a koheze, jsou klíčové pro úspěšné vytvoření kvalitního spoje, dále pak smáčivost a pevnost lepeného spoje [1, 4]:

- **Adheze (přilnavost)** – schopnost přilnutí dvou látek k sobě.
- **Koheze (soudržnost)** – výslednice přitažlivých sil mezi molekulami lepidla pro daný povrch.
- **Smáčivost povrchu** – napětí a polarita povrchu s lepidlem (nutné odmaštění a odstranění nečistot), schopnost se dobře roztéct po povrchu – závislost na stykovém úhlu (Obr. 2.6).
- **Pevnost lepeného spoje** – používat lepidla, která mají vyšší kohezi než pevnost spojovaných materiálů. Pokud dojde k poškození, pravděpodobnější je porušení spojovaného materiálu, než v místě lepeného spoje.



Obr. 2.6 Vyhodnocení stykového úhlu α (tečna povrchu pájky, v místě dotyku se základním materiálem); W_A – adhezní a W_B – kohezní práce [5]

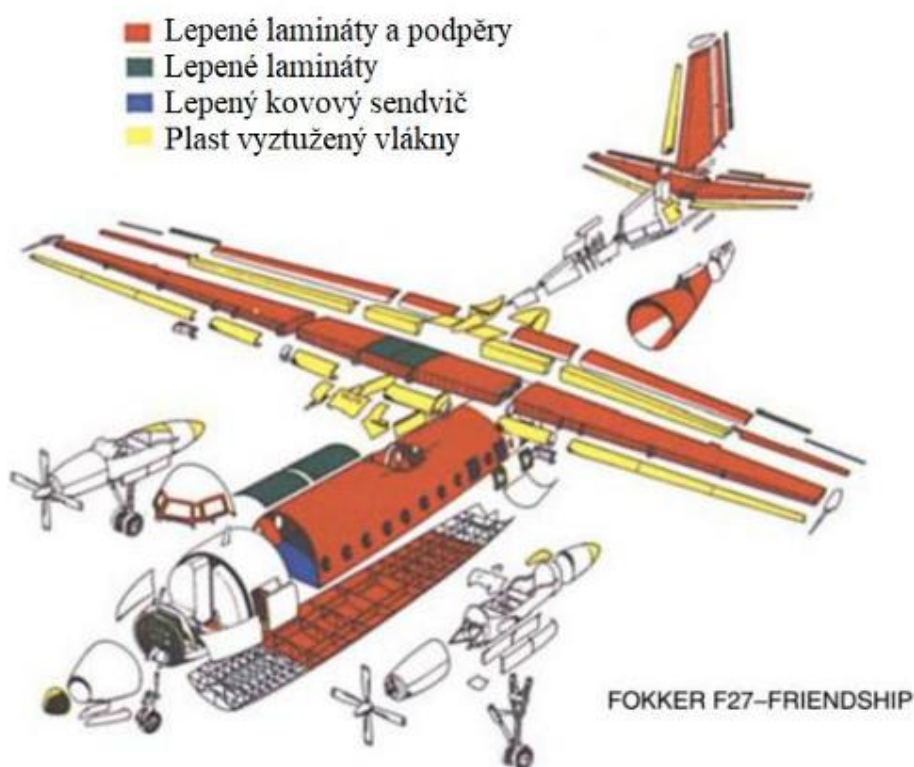
Proces lepení vyžaduje pečlivou přípravu spojovaných ploch, včetně jejich čištění, odmaštění a případného zdrsnění, aby bylo dosaženo optimální přilnavosti. Lepidla mohou být **jednosložková (ředidlo a lepidlo)** nebo **dvousložková (lepidlo a tvrdidlo)**, kde vytvrzení probíhá buď při pokojové teplotě nebo za vyšší teploty [1, 4].

Základní rozdělení lepidel, dle báze [1, 4]:

- **Organická** (Epoxidy, polyuretany, cyanoakrylátová (sekundová), ...).
 - Chemicky vytvrditelná
 - Fyzikálně vytvrditelná
- **Anorganická** (Cementová, vodní sklo (silikáty), alunitová, ...).
- **Silikony**

Základní rozdělení lepidel, dle chemické vazby, polyreakce [1, 4]:

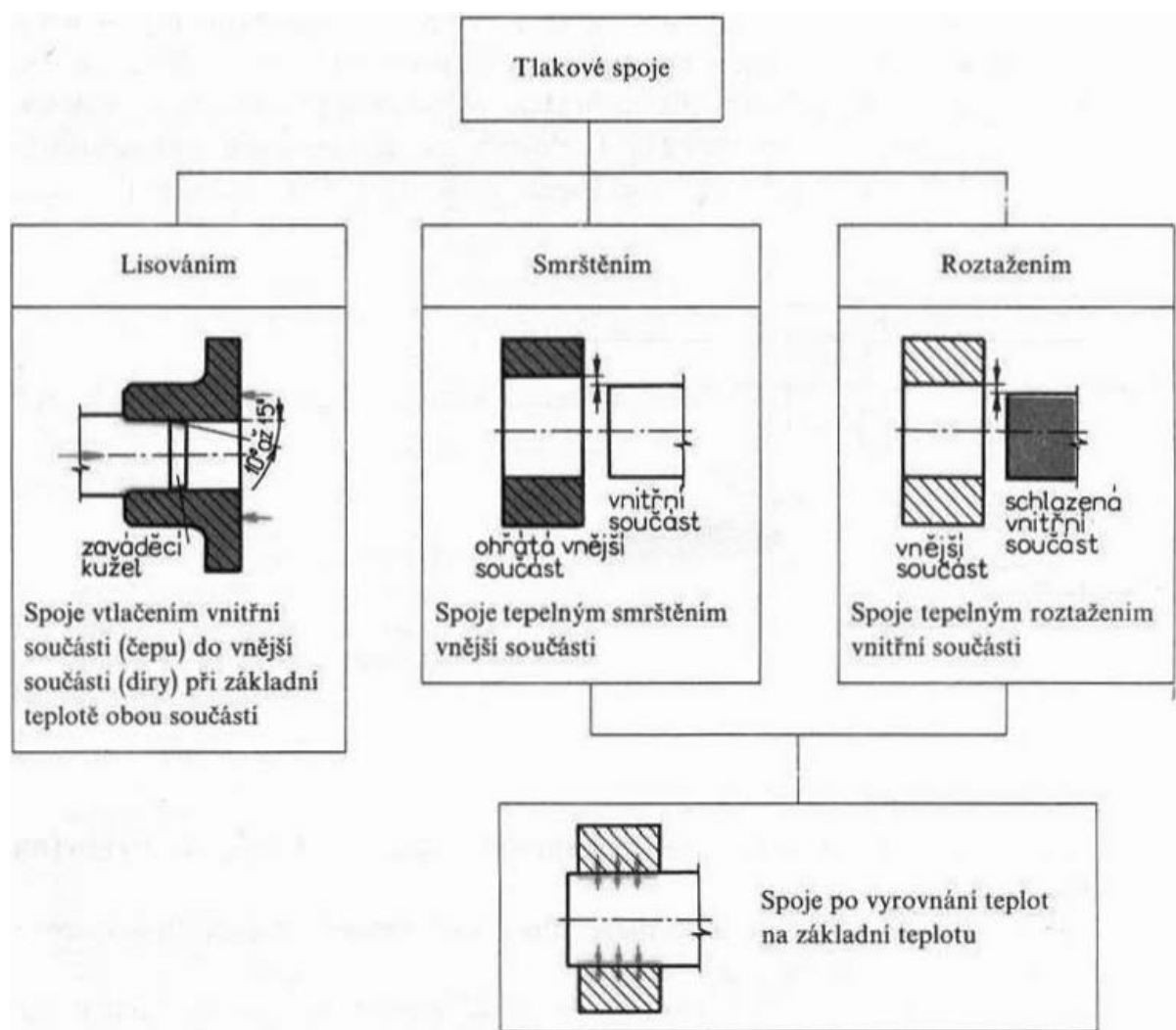
- **Polymerizace** (Methylmetakryláty, akryláty, epoxidy, ...).
- **Polyadice** (Epoxidové pryskyřice, polyuretany, kaučuková lepidla, ...).
- **Polykondenzace** (Silikony, fenolové pryskyřice, polyamidy, ...).



Obr. 2.7 Přehled lepených součástí na letadlu Fokker F27 [6]

2.1.5 Metoda tlakového spoje

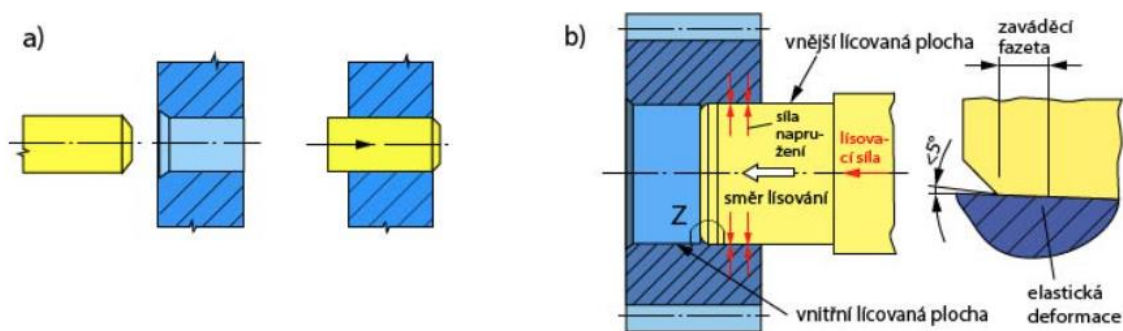
Klíčovou roli zde hraje silový styk, principem je generování tlakového tření mezi stykovými plochami spojovaných součástí, což vede k vytvoření spoje schopného přenášet vysoké zatížení. Jsou zde velice důležité tolerance (uložení s přesahem) a výborná přesnost, díky kterým tlakové spoje mohou fungovat (Obr. 2.8). Právě uložení s přesahem, zde hraje největší roli, kdy spojení vzniká nalisováním za tepla nebo za studena a je zde zaručen minimální přesah, který ve stykových plochách vytváří třecí sílu, a tím zaručí nehybnost spojení. Tyto spoje jsou charakteristické vlastností přenášet velké kroučicí momenty a jsou vhodné pro aplikace, kde dochází k rázovému nebo střídavému zatížení. V procesu spojování dochází v materiálech k pružným i trvalým deformacím, při opakovaném spojování může svěrná síla spoje klesnout až o 20 %. Tato vlastnost vyžaduje pečlivé zvážení při návrhu spojů, aby bylo zajištěno, že spoje zůstanou spolehlivé i po opakovaném použití [1, 2].



Obr. 2.8 Přehled rozdělení tlakových spojů [1]

Lisování za studena

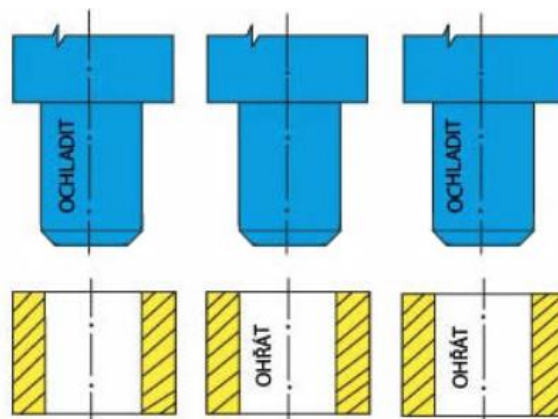
Tyto spoje vznikají pomocí mechanického nebo hydraulického lisování, kde jedna ze spojovaných součástí je navržena s mírným přesahem pro zajištění pevného spojení. Proces lisování vyžaduje, aby čep byl vybaven tzv. zaváděcím kuzelem (Obr. 2.9–a), který usnadňuje vstup čepu do náboje a zároveň minimalizuje riziko poškození spojovaných ploch. Na spojované plochy se před samotným lisováním aplikuje mazivo, aby se zabránilo zadření a mechanickému poškození povrchů součástí během spojovacího procesu. Lisování za studena je obzvláště vhodné pro situace, kdy je požadována vysoká přesnost a pevnost spoje, neboť umožňuje kontrolované a rovnoměrné rozložení tlaku na spojované součásti [1, 2].



Obr. 2.9 Schéma lisování za studena [2]

Lisování smrštěním nebo roztahením

Tento proces spočívá ve výrobě součástí s uložením s přesahem, které jsou následně buď ochlazeny nebo ohřáty, aby došlo k jejich smrštění nebo roztahení pro zajištění eliminace přesahu. Po nasunutí součástí na sebe a návratu k provozní teplotě se vytváří pevné spojení díky tlaku, který vzniká mezi spojovanými částmi. Pro spojení s velkými přesahy se často využívá kombinace obou metod: zároveň se ochlazuje vnější součást a ohřívá vnitřní (Obr. 2.10) [1, 2].



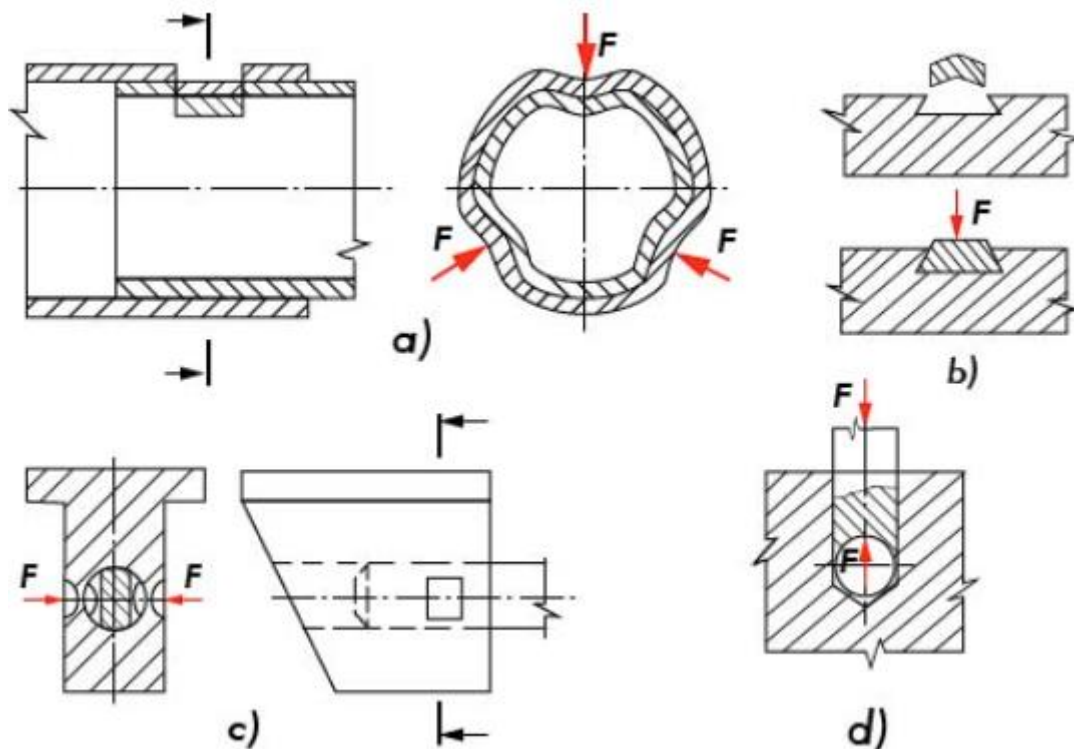
Obr. 2.10 Lisování smrštěním, roztahením nebo kombinací obou metod [2]

Dodatečnou změnou tvaru

Dochází zde k narušení stavu součástí (nenávratně), levnější varianta na výrobu, ale nedosahuje se zde takových přesností a zajištění optimální souososti součástí. Většina montáže probíhá volně, kdy právě změna tvaru vnitřní nebo vnější součásti, zajišťuje v tlakové spojení součástí, kdy velikost změny tvaru závisí na mnoha faktorech, mezi nejdůležitější patří: materiál, rozměry součástí, velikosti namáhání, přesnost nebo spíše velikosti daného přesahu, teplotní změna. Proto zde hraje velkou roli výpočet, jako u všech těchto metod [1, 2].

Variety tlakového spojení s dodatečnou změnou tvaru (Obr. 2.11):

- a) spojením trubek naříznutím nebo prolisováním
- b) rybinová drážka, rozlisování pera v drážce
- c) prolisování pouzdra do zářezu v čepu
- d) rozlisování konce čepu, pomocí tvrdé kuličky



Obr. 2.11 Tlakové spoje s dodatečnou změnou tvaru [2]

2.2 Charakteristika technologií svařování a pájení

Svařování a pájení jsou dvě zásadní technologie spojování materiálů, které se používají v široké škále průmyslových aplikací, pro vytvoření nerozebíratelných spojů. Tyto metody jsou zvoleny na základě jejich schopnosti, efektivně a trvale spojit součásti s minimálním narušením, jejich základní struktury nebo mechanických vlastností. Rozdíly mezi svařováním a pájením, lze nalézt v technickém provedení, aplikaci a použitých materiálech, což umožňuje jejich široké využití v mnoha odvětvích [1, 2, 3].

Svařování je proces, při kterém jsou spojované materiály v místě svarového spoje, roztaveny s použitím vysoké teploty, často s přidáním svařovacího materiálu, aby se vytvořil pevný, celistvý spoj po ztuhnutí. Tato metoda je ideální pro vytváření silných, trvalých spojů a je široce využívána v konstrukčních aplikacích, kde jsou na spoje kladeny vysoké nároky na mechanickou pevnost a odolnost. Svařování je nezbytné v průmyslech, kde jsou požadavky na pevnost a trvanlivost spojů kritické, jako je výroba vozidel, stavba mostů, lodní výroba a mnoho dalšího [1, 2, 3].

Pájení na druhé straně spojuje materiály při nižších teplotách, používají se k tomu slitiny nebo kov s nižším bodem tání, než mají základní materiály spojovaných součástí. Tento proces umožňuje spojení kovových dílů bez roztavení základních materiálů, což minimalizuje riziko poškození nebo deformace. Pájení je klíčové pro aplikace, kde je potřeba zachovat celistvost a funkčnost jemných komponent, jako je spojování elektronických součástek, výroba šperků, nebo montáž tenkostěnných trubek. Vyznačuje se vysokou přesností a možností vytvářet spoje, které jsou pevné a zároveň vizuálně přijatelné [1, 2, 3].

Automobilový průmysl

- Karoserie, rámy, klimatizace a mnoho dalšího, kde potřebujeme dodržet pevnost a rychlost výroby jednotlivých dílů.

Letecký průmysl

- Zde se dbá hlavně na vlastnosti materiálu, mezi které patří lehkost a pevnost použitého materiálu, proto se zde pracuje se slitinami hliníku a titanu.

Elektrotechnické odvětví

- Hlavní využití v oblasti elektronických součástí, díky pájení připojených součástek, které mají základy na nízko tavitelných slitinách.

2.3 Technologie svařování

Svařování, jako jedna z nejstarších a zároveň nejdůležitějších výrobních technologií, zaujímá klíčovou pozici v moderním inženýrství a výrobním průmyslu. Tento proces, který umožňuje spojování materiálů na mikroskopické úrovni, využívá širokou škálu fyzikálních principů včetně světla, zvuku, síly a termických reakcí. Podle normy ISO 4063 je rozlišeno až 93 různých metod svařování, z nichž přibližně 31 je zařazeno mezi hlavní a nejčastěji používané techniky svařování. Přehled a rozdělení, můžete najít v obr. 2.12 [3].

Svařování lze charakterizovat jako metalurgický proces, který vytváří nerozebíratelné spoje buď přímým spojením atomů díky aplikaci tepla nebo tlaku, nebo jejich kombinací. Tento proces může být realizován s použitím přídavného materiálu, který podporuje vytvoření spoje mezi svařovanými komponenty. Kromě spojování materiálů se svařování také využívá pro dělení materiálů, což zahrnuje širokou škálu materiálů od kovů přes sklo a keramiku až po plasty a kompozitní materiály [3, 7].

Svařování je nezbytné pro konstrukci a opravy v mnoha odvětvích, včetně automobilového průmyslu, stavebnictví, lodního stavitelství a kosmického odvětví. Jeho univerzální aplikace a schopnost použití na různé materiály a výrobní požadavky, činí svařování neocenitelným nástrojem. Díky pokroku ve výzkumu a vývoji se metody svařování neustále zdokonalují, což umožňuje dosahovat vyšší kvality spojů, zvyšování efektivity výrobních procesů a snižování environmentálního dopadu [3, 7].

Přídavný materiál při svařování je klíčovým prvkem, který zajišťuje spojení svařovaných dílů a ovlivňuje jak mechanické, tak chemické vlastnosti svaru. Jeho výběr je zásadní pro zajištění kvality a trvanlivosti svarového spoje, a to zejména v aplikacích, kde jsou na spoj kladeny vysoké nároky, jako je odolnost vůči korozi, teplotě, nebo mechanickému zatížení [3, 7].

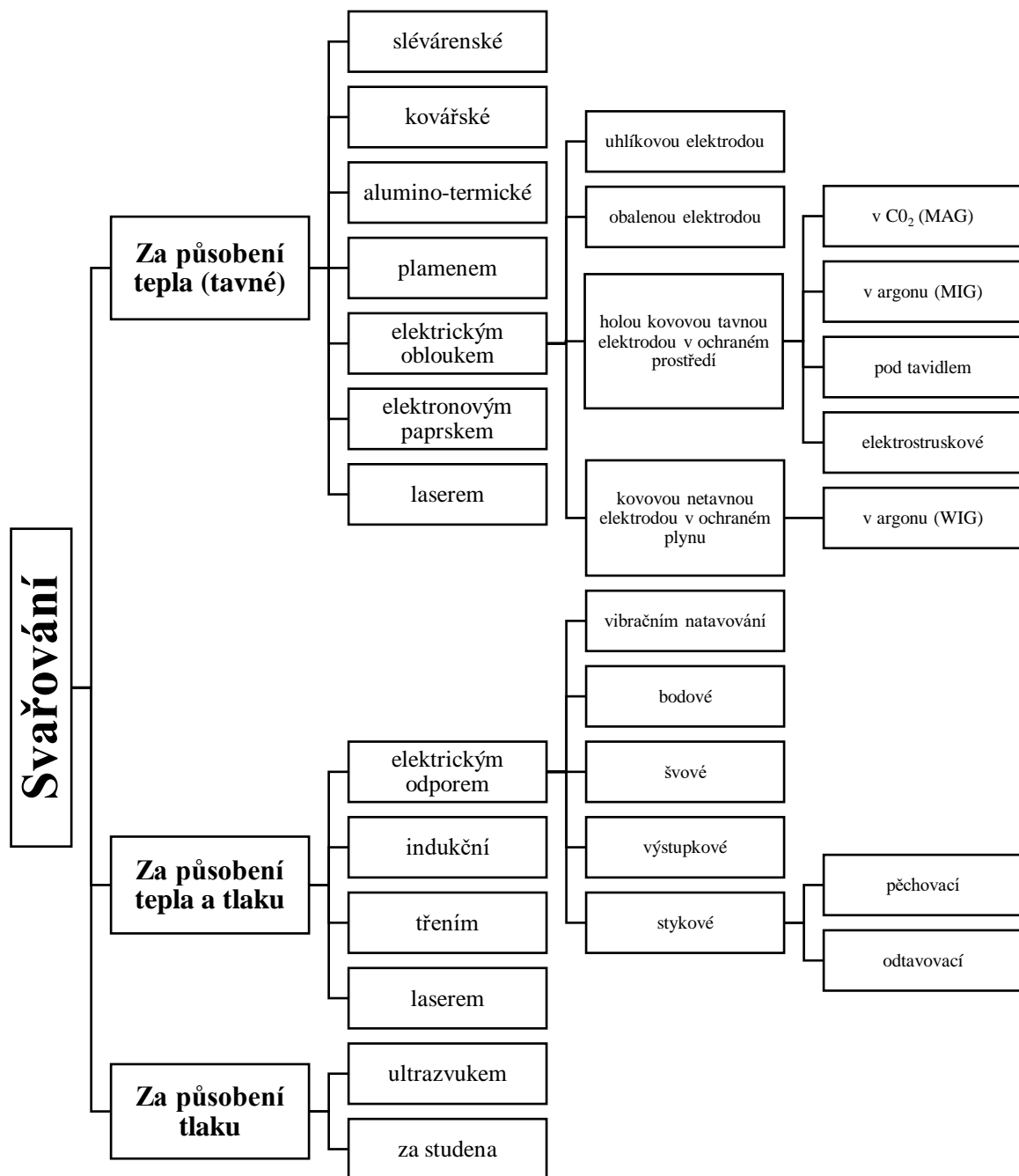
Typy přídavných materiálů:

- **Svařovací dráty** se používají se při metodách MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) a TIG (Tungsten Inert Gas). U MIG/MAG svařování může být drát obalený nebo plněný, kde plnění může obsahovat různé legovací prvky nebo látky zajišťující stabilní oblouk a ochranu svaru. U TIG svařování se většinou používá wolframová elektroda, protože se jedná o netavnou elektrodu [3, 7].

- **Obalené elektrody** obsahují jak kovové jádro, tak ochranný obal, který stabilizuje oblouk, chrání svar před atmosférou a přidává do svaru legovací prvky, pro zlepšení výsledného svarového spoje [3, 7].

Základní rozdělení, dle působení [7]:

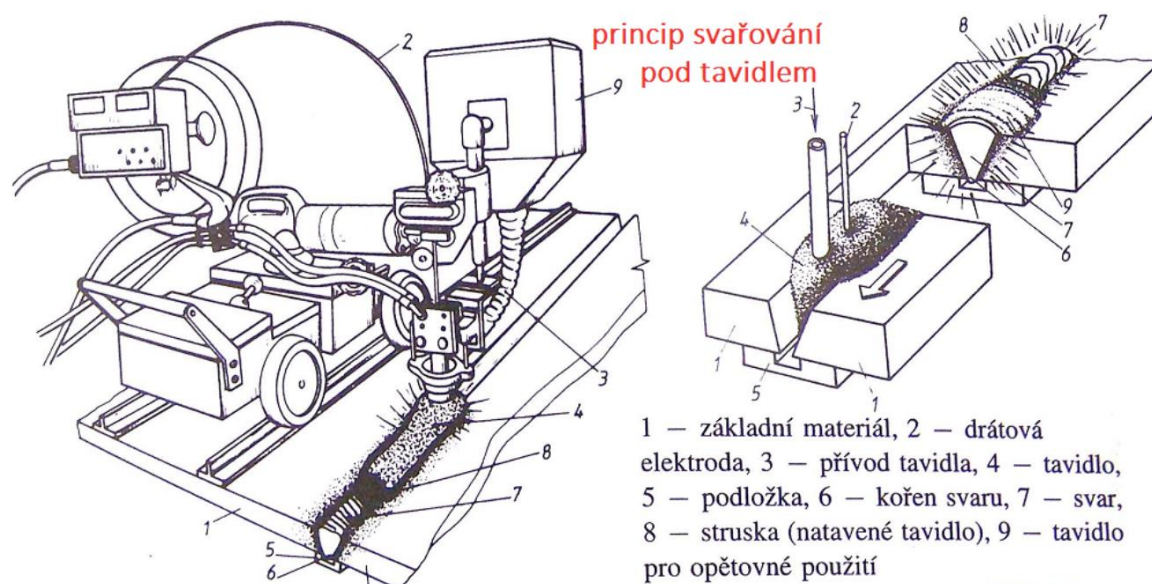
- Svařování s využitím tepla (tavné)
- Svařování s využitím tlaku
- Svařování s využitím tepla a tlaku



Obr. 2.12 Přehled a rozdělení svařování [7]

2.3.1 Svařování s využitím tepla

Svařování s využitím tepla je klíčový druh technologie spojování materiálu, kde teplota hraje primární roli v procesu vytváření svarového spoje, a to bez nutnosti aplikace vnějších sil. Tento proces používá roztavení základního materiálu v oblasti spoje, což vede k vzniku svarového spoje. Následná krystalizace a chladnutí materiálu, zajišťují vytvoření pevného a trvalého svaru s požadovanými vlastnostmi. Klíčovým faktorem pro úspěšné svařování, je dosažení optimální meziatomové vzdálenosti, což je umožněno tekutostí roztaveného kovu a jeho schopností smáčet spojované hrany. Volba správné metody svařování a nastavení procesních parametrů se odvíjí od specifik materiálů, které jsou spojovány, a od konkrétních podmínek a požadavků aplikace. Mezi nejznámější a nejpoužívanější metody svařování s využitím tepla patří: svařování plamenem, elektrickým obloukem, pomocí laseru nebo elektronový paprsek [3, 7].



Obr. 2.13 Vlevo schéma svařování pod tavidlem pomocí traktor SUM 1000, vpravo princíp svařování pod tavidlem [7]

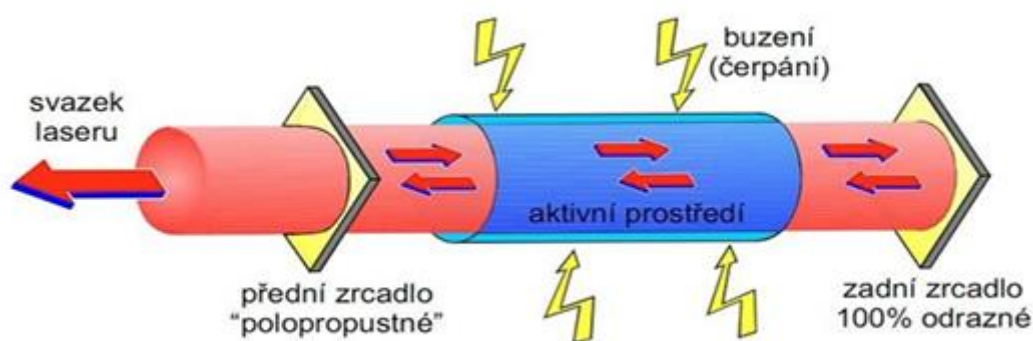
Laserové svařování představuje pokročilou metodu tepelného spojování materiálů, která se vyznačuje vysokou přesností a minimalizací tepelného ovlivnění, okolo svarového spoje. Tento proces umožňuje vytváření jemných a pevných svarů s významnými výhodami v aplikacích, kde je požadována vysoká kvalita a přesnost spojení [3, 7].

Základní princíp laserového svařování:

Základní princíp fungování laseru spočívá v aktivaci materiálu, tzv. aktivního prostředí, které může být kapalné, plynné, nebo pevnolátkové. Aktivní prostředí obsahuje elementy, jako jsou atomy nebo molekuly, které se mohou nacházet buď ve základním energetickém stavu

nebo ve vybuzeném (excitovaném) stavu s vyšší energií. Přechod těchto elementů z vyššího do nižšího energetického stavu generuje foton, což je proces známý jako zářivý přechod. Proces stimulované emise, kdy foton dopadající na excitovaný (vybuzený) atom indukuje emisi dalšího fotonu, je základem vzniku laserového svazku. Tento efekt se umocňuje v optickém rezonátoru (obr. 2.14), obvykle tvořeném párem odrazných zrcadel, které umožňují opakované přechody fotonů mezi excitovanými atomy, který vede k emisi. Tímto způsobem, je energie vložená do aktivního prostředí, přeměněna na koherentní laserový svazek [8, 9, 10].

Proces buzení narušuje stav termodynamické rovnováhy aktivního prostředí, čímž dochází k inverzi populace, kdy většina elementů přechází do stavu s vyšší energií. Tento stav umožňuje, že energie dodaná do systému může být efektivně přeměněna na laserový svazek [8, 9, 10].



Obr. 2.14 Schéma optického rezonátoru [6]

Laserové svařování může probíhat buď s použitím přídavného materiálu, nebo bez něj. Základními metodami jsou vedení tepla (kondukční režim) a metoda klíčové dírky. Kondukční režim spočívá v natavení materiálu na povrchu, což vede k svarům s menší hloubkou průvaru. Metoda klíčové dírky, využívající vysokou hustotu výkonu laserového paprsku, vytváří hluboké a úzké svarové spoje, díky vytvoření plazmatu a následnému rychlému pohybu roztaveného materiálu [8, 9, 10].

Druhy laserů používané pro svařování [8, 9, 10, 11]:

- **Nd:YAG lasery** (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) jsou pevnolátkové lasery, které vydávají světlo o vlnové délce 1064 nm. Díky této vlnové délce, kterou kovy dobře absorbují, a možnosti vést laserový paprsek přes optická vlákna, jsou tyto lasery široce využívány pro svařování různých materiálů. Navíc je lze snadno integrovat s robotickými systémy, pro dosažení vysoké flexibility svařovacího procesu.

- **CO₂ lasery** jsou plynové lasery, které vydávají světlo o vlnové délce kolem 10.6 μm. Ačkoliv mají vyšší výkony a účinnost než Nd: YAG lasery, kovy absorbují světlo, které CO₂ lasery vydávají, s menší efektivitou. CO₂ lasery nacházejí své uplatnění v aplikacích, kde jsou požadovány hluboké průvary.
- **Diodové lasery** díky své efektivitě a schopnosti použití do kompaktních a flexibilních svařovacích systémů, jsou ideální pro svařování, ale také pro tepelné zpracování (kalení).

| Laser | Vlnová délka (nm) | Buzení | Efek. ^a | Režim ^b | Výkon / Energie | Typické aplikace ^c | Údržba | Život. (h) |
|-----------------|-------------------|--------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------------------|--------|------------|
| Nd:YAG | 1064 | LD | ~7% | CW | až 6kW | Ř,S | ano | ~10 000 |
| | | | | pulsní* | ~ mJ@ns (~100W) | Z,G | | ~1000 |
| CO ₂ | 10 600 | RF | ~10% | CW / pulsní | 10-250W | Z,G, Ř nk. | ano | ~20 000 |
| | | | | | až 5kW (Slab) | Ř,S | | -- |
| | | EI. | ~25% | až 20kW (průtočné) | Ř,S | | | |
| Diskový | 1070 | LD | ~15% | CW | až 16 kW | Ř,S | ano | ~10 000 |
| Vláknový | 1070 | LD | ~30% | CW | až 80 kW | Ř,S | ne | ~100 000 |
| | | | | QCW | ~ J@ms (~1,2kW) | Z,G,M | | |
| | | | | Pulsní | ~ mJ@ns (~100W) | Z,G,M | | |
| Diodový | 808-980 | EI. | ~60% | CW | až 10kW | S,K,N | ne | ~15 000 |

Základní přehled průmyslových laserů.

^a Efektivita (účinnost) přeměny elektrické energie na světelnou (optickou)

^b U pulsních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce). CW - kontinuální, QCW - kvazi kontinuální.

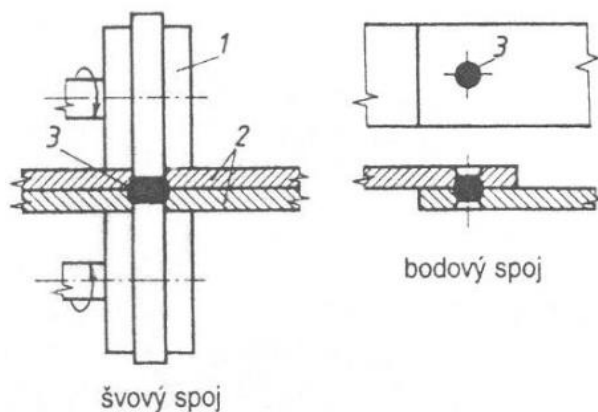
^c Ř – řezání, S - svařování, Z – značení, G – gravírování, K – kalení, N – nanášení vrstev, M-mikro-obrábění, nk – nekovů.
Buzení: LD - laserové diody, RF - radio frekvenčně, EI. - elektricky (výboj, proud).

Obr. 2.15 Základní přehled typů laserů a jejich parametrů (orientační údaje) [11]

2.3.2 Svařování s využitím tlaku

Svařování s využitím tlaku je speciální technika, která, na rozdíl od tradičních metod svařování, spojuje materiály pomocí tlaku místo tepla. Tato metoda je zvláště vhodná pro spojování různorodých materiálů, včetně těch s rozdílnými tloušťkami, a umožňuje vytvářet spoje během krátkého časového intervalu. Jednou z nejvýznamnějších technik svařování s využitím tlaku je svařování výbuchem, kde je tlak generován detonací výbušniny. Tento tlak může dosahovat hodnot mezi 10^2 až 10^3 MPa, což vede k vysokým plastickým deformacím materiálu v rozmezí 30-80 %, v závislosti na zvolené technologii. Tyto plastické deformace, doprovázené zvýšenou teplotou a procesy jako rekrystalizace, natavení a difúze, umožňují spojení svařovaných materiálů [3, 7].

Úspěch této metody závisí na rychlosti šíření tlakové vlny a detonační rychlosti použité výbušniny. Svařování tlakem za studena (obr. 2.16) a svařování výbuchem, jsou hlavními představiteli této technologie, umožňující spojovat materiály, které by tradičními metodami svařování bylo obtížné spojit. Vhodné materiály pro svařování s využitím tlaku zahrnují mimo jiné tvárné kovy, jako jsou hliník (Al), měď (Cu), zlato (Au), olovo (Pb), nikl (Ni) a různé druhy ocelí. Tato metoda nabízí unikátní výhody v podobě rychlosti, efektivity a schopnosti spojovat širokou škálu materiálů [3, 7].



Obr. 2.16 Svařování tlakem za studena, 1 – rotační čelisti, 2 – svařované součásti, 3 – svar [7]

2.3.3 Svařování s využitím tepla a tlaku

Svařování s využitím tepla a tlaku je proces, při kterém dochází ke spojení materiálů prostřednictvím aplikace tepla, společně s tím je nutné použít i vnější mechanické síly. Teplo způsobuje roztavení základního materiálu v oblasti spoje, což vede k vytvoření svarového spoje. Tento spoj následně krystalizuje a ochlazuje, čímž vzniká pevný a trvalý svar s požadovanými vlastnostmi. Klíčovou rolí při tomto procesu hraje meziatomová vzdálenost, která je dosažena díky silám a tekutosti roztaveného kovu a jeho schopnosti dobře smáčet spojované hrany. Pro dosažení optimálních výsledků je zásadní správný výběr metody svařování a příslušných procesních parametrů, které jsou uzpůsobeny konkrétním požadavkům a podmínkám použití. Mezi neznámější a nejčastěji používané metody svařování s využitím tepla a tlaku, je svařování elektrickým odporem (odporové svařování) nebo kovářské svařování [3, 7].

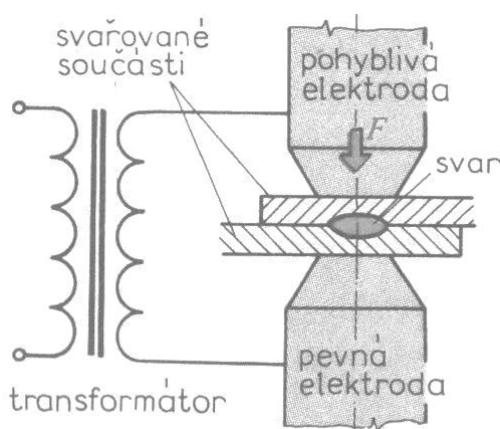
V tomto případě, při odporovém svařování, dochází v místě styku k průchodu elektrického proudu, který vytvoří přechodový odpor, díky kterému se místo ohřeje na teplotu svařování a následně pomocí tlaku (síly) se spojí. V místě vzniká teplo, které označujeme Q a je dáno Joulovým zákonem (2.1).

$$Q = I^2 R t \text{ [J]} \quad (2.1)$$

kde značí: I^2 – intenzitu elektrického proudu [A]

R – celkový elektrický odpor v místě svaru [Ω]

t – stanovený čas [s]



Obr. 2.17 Odporové bodové svařování [7]

Podle uspořádání elektrod a pracovního postupu [12, 13]:

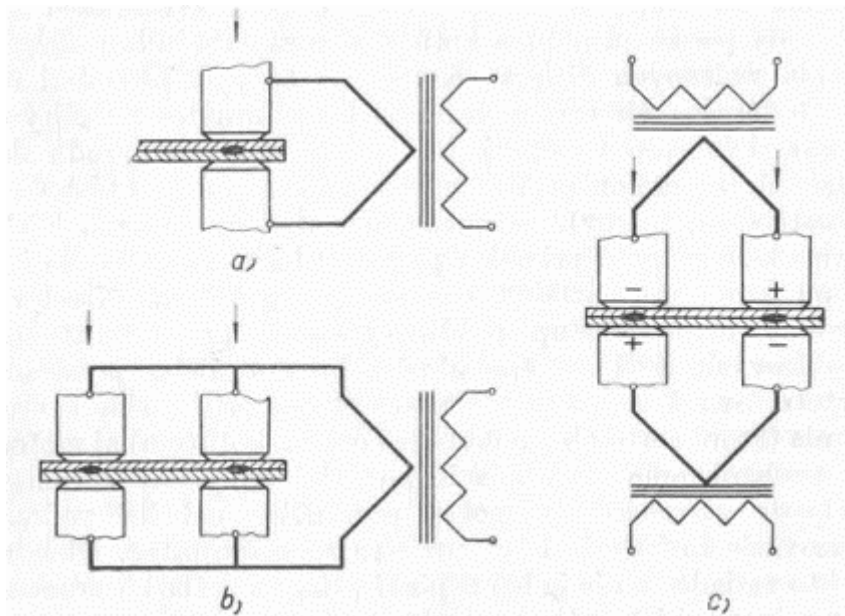
- **Bodové svařování** je nejběžnější metoda, při které jsou materiály spojeny v konkrétních bodech pomocí elektrod. Ideální pro tenké plechy, kde je potřeba přesného a lokalizovaného spoje.
- **Švové svařování** vytváří souvislý nebo přerušovaný svar otáčejícími se elektrodami. Používá se pro výrobu těsných spojů, např. v potrubích nebo nádržích.
- **Výstupkové svařování** zajišťuje spoje na specificky upravených površích materiálů s výstupky, což zajišťuje rovnoměrné rozložení tepla a tlaku. Tato metoda je vhodná pro větší a tlustší materiály.
- **Stykové svařování** pomocí stlačení konců svařovaného materiálu proti sobě, zajistí vytvoření svarového spoje, buď metodou stlačení (při nižších teplotách) nebo odtavením (při vyšších teplotách). Používá se pro spojování tyčí, drátů nebo trubek [12, 13].

Druhy bodového svařování podle způsobu zhotovení svaru [12, 13]:

Přímé Bodové Svařování

Zde svarová čočka vzniká přímo mezi dvěma protiběžně orientovanými elektrodami, což typicky vede k vytvoření jednoho bodového svaru za použití:

- **Jednobodové svařování:** Charakterizováno strojem s protiběžnými elektrodami, kde obvykle spodní elektroda je pevná a horní pohyblivá, umožňuje postupné svařování po jednotlivých bodech.
- **Dvojbodové svařování:**
 - **Paralelní zapojení** využívá dvou párů protiběžných elektrod k jednomu transformátoru, umožňující svařování ve dvou bodech současně. Tento způsob vyžaduje výkonnější transformátor a rovnoměrné stlačení obou párů elektrod.
 - **Sériové zapojení** méně běžný způsob, kde se používají dva samostatné transformátory. Svařovací proud prochází svařovanými díly a je důležité dbát na správnou polaritu.

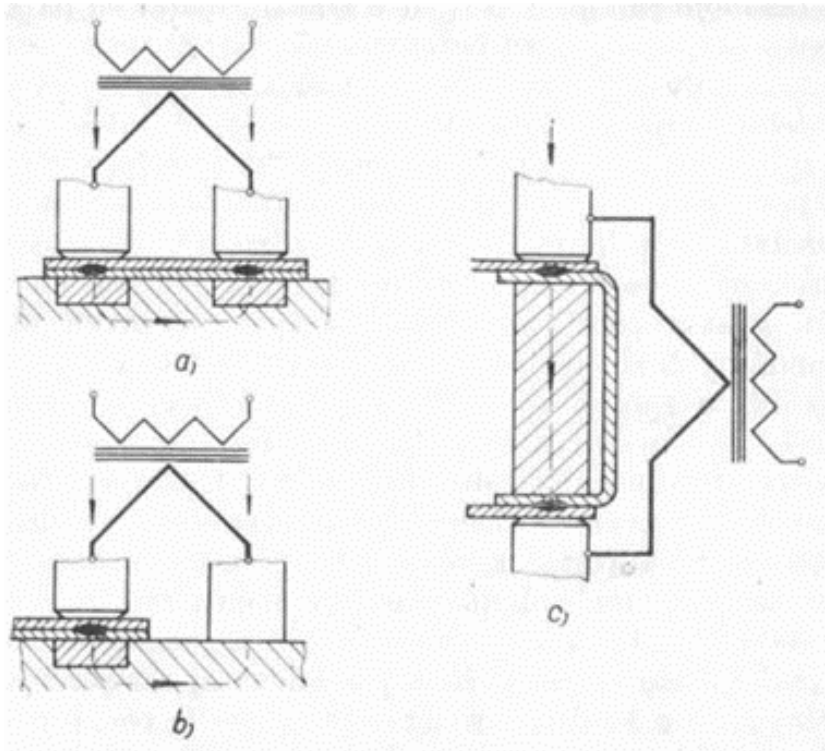


Obr. 2.18 Přímé bodové svařování; a) Jednotlivými body (jednobodové) protiběžnými elektrodami, b) Dvojbodové v paralelním zapojení, c) Dvojbodové v sériovém zapojení [12]

Nepřímé Bodové Svařování [12, 13]

V této kategorii svarová čochka nevzniká přímo mezi elektrodami. Elektrody jsou orientované souběžně a proud může procházet přes vodivou podložku nebo můstek.

- **Jednobodové svařování s rovnoběžnými elektrodami:** Jedna elektroda slouží k přivedení proudu a druhá k jeho vedení, což umožňuje cílené svařování v konkrétním bodě.
- **Dvojbodové svařování:**
 - **S rovnoběžnými elektrodami** využívá elektrody orientované rovnoběžně, kde proud prochází svařovanými díly a může být rozdělen mezi více bodů.
 - **S protiběžnými elektrodami** a proudovým můstkem umožňuje rozdělení proudu mezi dva svařovací body, což zvyšuje efektivitu a rovnoměrnost svařování.



Obr. 2.19 Nepřímé bodové svařování (vždy sériové zapojení); a) Dvojbodové s rovnoběžnými (souběžnými) elektrodami, b) Jednotlivými body (jednobodové), c) Dvojbodové s protiběžnými elektrodami a proudovým můstkem [13]

2.3.4 Teplotně ovlivněná oblast při svařování – napětí a deformace

Svařování je komplexní proces, který je doprovázen řadou doprovodných jevů, mezi něž patří napětí a deformace v teplotně ovlivněné oblasti (TOZ). Tyto jevy jsou přímým důsledkem interakce teplotních a deformačních účinků na základní materiál, přičemž během svařovacího procesu dochází k dynamickým změnám v důsledku ohřevu a následného ochlazování materiálu. Tímto procesem se vytváří nestacionární teplotní pole, které ve spojení s mechanickými vlastnostmi materiálu a konstrukčními omezeními (tuhost upnutí a vlastní tuhost dílu) vyvolává dočasná nebo trvalá zbytková napětí a deformace [10, 14].

Z fyzikálního hlediska existuje několik klíčových faktorů, které ovlivňují vznik a velikost napětí a deformací při svařování [10, 14]:

- **Teplotní pole a gradienty:** Nerovnoměrné rozložení tepla, charakteristické pro svařovací procesy, vytváří teplotní gradienty, které indukují tepelnou roztažnost a objemové změny v materiálu. Vysoká intenzita těchto gradientů přímo souvisí s mírou tepelných deformací a napětí.
- **Vlastnosti materiálu:** Materiály s vysokou mírou tepelné roztažnosti jsou při svařování více náchylné k deformacím. Zároveň mez kluzu a Yongův modul pružnosti materiálu určují jeho schopnost odolávat deformaci a potenciální tvorbě trhlin.
- **Strukturní změny:** Fázové transformace, ke kterým dochází během svařování, mají značný vliv na objemové změny a následně na mechanické vlastnosti materiálu. Mikrostruktura svarového kovu je klíčovým faktorem určujícím odolnost proti deformaci a trhlinám.
- **Tuhost:** Vyšší tuhost spoje i celé konstrukce může efektivně snižovat míru tepelných deformací. Použití upínacích přípravků a dalších technik může dále optimalizovat rozložení tepelných napětí a deformací, minimalizovat jejich negativní dopady a zvýšit celkovou stabilitu a kvalitu svarových spojů.

Svařovací napětí můžeme rozdělit do několika kategorií [10, 14]:

- **Podle příčiny vzniku:**

- **Teplotní napětí** vzniká jako důsledek nerovnoměrného ohřevu a ochlazování materiálu během svařovacího procesu. Teplotní gradienty vedou k objemovým změnám v materiálu, což může způsobit deformace, včetně prohnutí, zkroucení a úhlových deformací svarového spoje (Obr. 2.20).
- **Strukturní napětí** se vyvíjí v důsledku fázových transformací v tepelně ovlivněné oblasti, což vede k objemovým změnám a ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Tyto změny mohou vyvolat vnitřní napětí, které ovlivňuje houževnatost a odolnost svaru proti únavě.

- **Podle doby trvání:**

- **Dočasná napětí** jsou přítomna v materiálu pouze po omezenou dobu a obvykle odezní po dosažení tepelné rovnováhy. Mohou způsobit dočasné deformace, které se po stabilizaci materiálu vrátí do původního stavu.
- **Trvalá napětí** v materiálu zůstávají i po ukončení svařovacího procesu. Jsou výsledkem kombinace teplotních a strukturních napětí a mají zásadní dopad na dlouhodobé mechanické vlastnosti a stabilitu svarového spoje.
- **Zbytková napětí** jsou specifickým typem trvalých napětí, která zůstávají v materiálu po ukončení svařování a odlehčení svaru. Tyto napětí mohou významně ovlivnit odolnost svaru proti únavě a prasklinám.

- **Podle směru působení:**

- **Podélná napětí** působí ve směru svaru a vznikají v důsledku tepelné roztažnosti a smršťování materiálu. Nerovnoměrné rozložení tepla a rozdílné rychlosti chladnutí v podélném směru svaru vedou k podélným pnutím. Tato pnutí mohou způsobovat prohnutí a zkroucení svaru.
- **Příčná napětí** působí kolmo na osu svaru, indukovaná objemovými změnami během svařování. Tyto změny mohou způsobit napětí, která vedou k riziku prasklin a lomů ve svaru.
- **Napětí ve směru tloušťky materiálu** vznikají v tloušťce materiálu a jsou způsobeny teplotními gradienty a rozdílnou rychlostí chladnutí mezi povrchem a vnitřkem materiálu. Tyto teplotní gradienty vedou k nerovnoměrnému rozložení tepelných deformací a objemových změn, čímž se vytváří napětí ve směru tloušťky.

Velikost napětí a deformací ovlivňují klíčové materiálové vlastnosti, jako lineární součinitel teplotní roztažnosti α , tepelná vodivost λ a mez kluzu R_e pro daný materiál, tyto veličiny se mění s teplotou. Prodloužení vzorku lze určit z lineárního součinitele teplotní roztažnosti a teplotního gradientu, což demonstruje přímou závislost mezi tepelným cyklem svařování a vznikem napětí v materiálu (2.2) [14].

Pokud uvažujeme tyč uloženou volně jako vzorek, velikost teplotní dilatace, tedy změnu délky tyče během rovnoměrného ohřevu nebo ochlazování, lze vyjádřit pomocí vztahu 2.2:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = l_0 \cdot \alpha \cdot (T - T_0) \text{ [mm]} \quad (2.2)$$

kde značí: Δl – změnu délky vzorku [mm]

l_0 – počáteční délku vzorku [mm]

α – lineární součinitel teplotní roztažnosti materiálu vzorku [1/K]

ΔT – rozdíl počáteční a konečné teploty vzorku [°C]

T – konečná teplota vzorku [°C]

T_0 – počáteční teplota vzorku [°C]

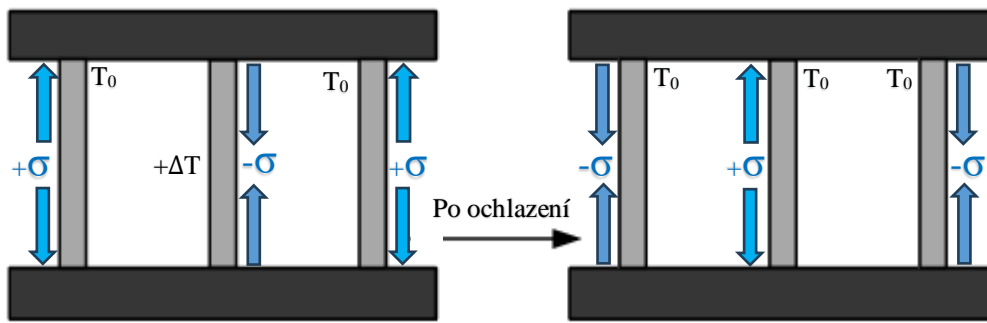
Pokud dochází k tuhému upnutí vzorku, což znemožňuje jeho teplotní dilataci, začíná ve vzorku vznikat napětí. Toto napětí vzniklé v důsledku teplotních změn a omezení deformace, lze ve zjednodušené formě vyjádřit pomocí Hookeova zákona, dle vztahu 2.3:

$$\sigma = -\varepsilon \cdot E = -\frac{\Delta l}{l_0} \cdot E = -\alpha \cdot E \cdot \Delta T \text{ [MPa]} \quad (2.3)$$

kde značí: σ – napětí vznikající ve vzorku [MPa]

ε – poměrné prodloužení vzorku [-]

E – modul pružnosti v tahu vzorku [MPa]



- Tlakové napětí ($-\sigma$) vzniká v prostřední tyči, díky působení teplotního ohřevu
- Naopak tahové napětí ($+\sigma$) vzniká v krajních tyčích
- Zbytkové tlakové napětí ($-\sigma$) vzniká v krajních tyčích, díky ochlazení prostřední tyče
- Naopak zbytkové tahové napětí ($+\sigma$) vzniká v prostřední tyči, díky ochlazení

Obr. 2.20 Vznik napětí z teplotních změn (a) při ohřevu, (b) při ochlazení. Tepelně indukované napětí [15]

2.4 Technologie pájení

Pájení vytváří nerozebíratelné spoje prostřednictvím vneseného tepla a příslušné pájky, která se taví za nižší teploty, než je teplota tavení základních materiálů. Tento proces umožňuje spojení díky difuzi a vzájemné rozpustnosti pájky se základním materiálem, na rozdíl od svařování, kde se používají přídavné materiály s podobným složením, jako je základní materiál. Pájené spoje charakterizuje významný rozdíl ve složení kovů. Tavidla, která podporují vytváření spoje, jsou základní součástí procesu, buď jako samostatný prvek nebo integrovaný prvek v pájce. Proces pájení zahrnuje přípravu a čištění spojovaných ploch, jejich zahřátí na pracovní teplotu, očištění pomocí tavidly, následné aplikaci a roztavení pájky. Spoje vznikají natavením pájky, přičemž pájka smáčí povrch základního materiálu a vytváří spoj, prostřednictvím difuzních procesů. Mezifázové rozhraní mezi roztavenou pájkou a pevným kovem, umožňuje vznik kovové vazby snižující volnou povrchovou energii [16, 17].

Oproti tavnému svařování, kde jsou svařovací teploty vyšší než teplota tavení základního materiálu, jsou teploty pájení výrazně nižší, obvykle se pohybují od 50 °C až do 450 °C pro měkké pájení, dále od 450 °C až po 1 200 °C pro tvrdé pájení. Výhody pájení spočívají v minimálním tepelném ovlivnění materiálů, což vede k nižší spotřebě energie, menšímu vnitřnímu napětí a méně strukturálním změnám základního materiálu. Pájení je využívanou metodou tam, kde tavné svařování není možné z metalurgických nebo technologických důvodů.

Umožňuje efektivně spojit širokou škálu materiálů, včetně železných a neželezných kovů, slitných karbidů, materiálů s vysokou teplotou tavení, a dokonce i keramiky. Tato metoda je výjimečná svou schopností vytvářet pevné a trvalé spoje mezi různorodými materiály, což rozšiřuje její uplatnění v průmyslu i řemeslech [16, 17].

Základní rozdělení, dle teploty tání pájky [16, 17]:

- Měkké pájení (do 450 °C) – spojování vodičů či vývodů součástek.
- Tvrdé pájení (od 450 °C do 1200 °C) – mechanicky namáhané součásti nebo.
- Vysokoteplotní (nad 950 °C) – tvrdé pájení bez tavidla v ochranné atmosféře nebo vakuu a s použitím pájky, jejíž teplota likvidu přesahuje 950 °C.

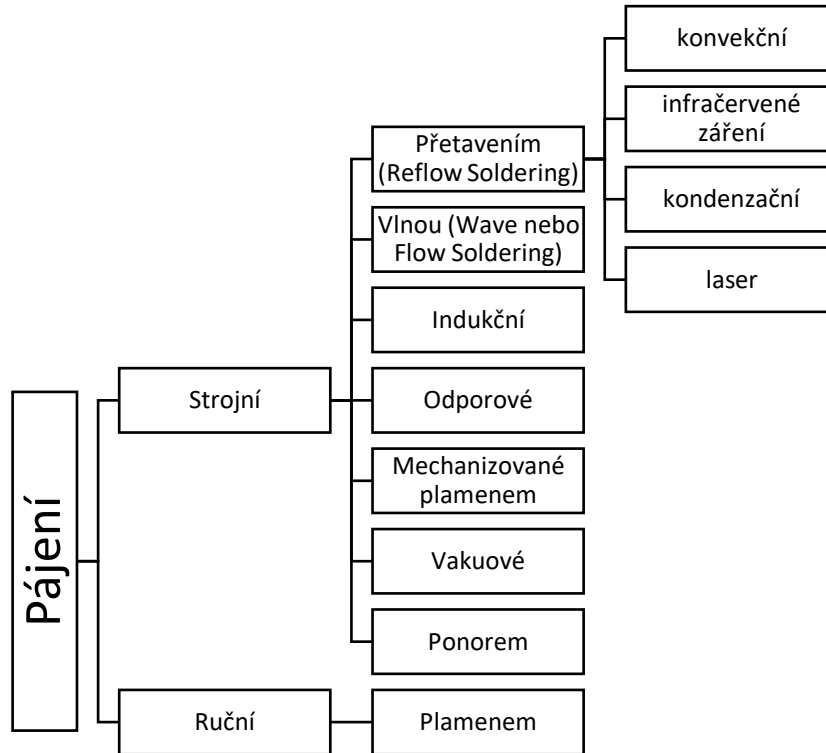
Měkké pájky jsou charakterizované teplotou tavení do 450 °C, obvykle slitiny měkkých kovů, které se upravují pro dosažení požadovaných vlastností, jako je teplota tavení. Mezi nejznámější patří tradiční slitiny cínu a olova, které byly dlouhodobě používány v elektronice, pro jejich schopnost tuhnout bez přechodových fází.

Tvrdé pájky s teplotou tavení nad 450 °C se používají v náročnějších aplikacích, kde je potřebná vyšší mechanická pevnost nebo odolnost proti vysokým teplotám. Mezi tvrdé pájky patří slitiny stříbra, mědi, kadmia a dalších kovů a jsou často aplikovány ve vakuu nebo v redukční atmosféře, kde je možné minimalizovat oxidaci.

Tavidlo zajišťuje dobrou smáčivost základního materiálu pájkou, odstranění oxidů z povrchu a ochranu před další oxidací během celého procesu. Je nezbytné, aby mělo tavidlo nižší teplotu tavení než samotná pájka, minimálně o 50 až 150 °C, přičemž by nemělo docházet k jeho přílišnému odpařování. Efektivní zatékání do spár a schopnost být vypuzeno pájkou při ztuhnutí jsou dalšími požadavky na tavidlo, které by po ztuhnutí nemělo působit korozivně a mělo by být snadno odstranitelné.

Tavidla pro **měkké pájení** se skládají z kombinace organických a anorganických složek, včetně chloridu zinečnatého, amonného, měďného a kyseliny solné, kde kalafuna představuje hlavní organickou složku. Tyto jsou specifikovány dle normy ČSN EN ISO 9454-1, která určuje klasifikaci, označování a balení tavidel pro měkké pájení. Tavidla pro **tvrdé pájení**, naopak využívají borax, kyselinu boritou, fosforečnou, uhličitany, křemičitany, halogenidy a další chloridy a fluoridy ke zvýšení své účinnosti. Tavidla pro tvrdé pájení jsou rovněž standardizována, konkrétně normou ČSN EN 1045, která definuje jejich klasifikaci a technické dodací podmínky.

Základní rozdělení, dle metody a technologie můžete vidět na obr. 2.21.



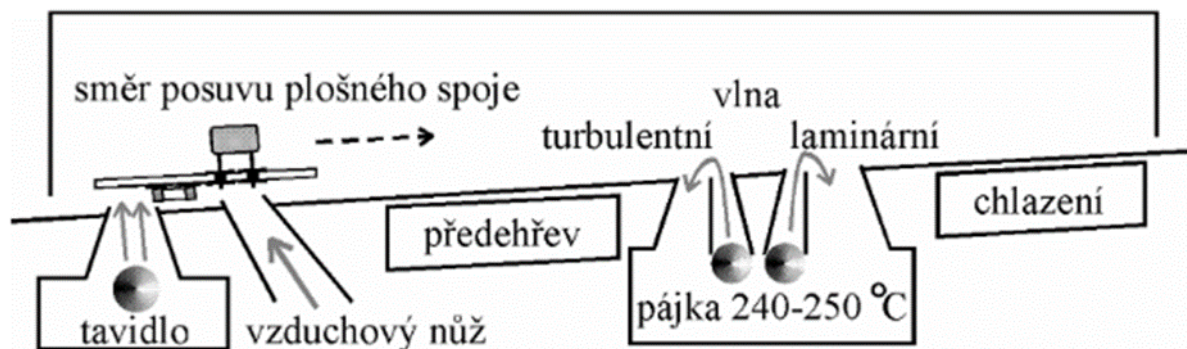
Obr. 2.21 Schéma základního rozdělení pájení [15]

2.4.1 Pájení vlnou

Pájení vlnou, známé také jako Wave Soldering, umožňuje efektivní spojování různých typů součástek pomocí plošného pájení. Pájení vlnou zahrnuje několik kritických fází, začínající aplikací tavidla pro optimalizaci spojovacích ploch, což je zásadní pro kvalitní a odolné spoje. Aplikace tavidla, provedená obvykle pomocí pěny nebo spreje, přebytečné tavidlo je poté eliminováno vzduchovou tryskou či odsávací štěrbínou [16, 18].

Předehřev následně zajišťuje přípravu desek a součástek na pájení tím, že odstraňuje rozpouštědla, aktivuje tavidlo a minimalizuje riziko teplotního šoku, kterému chceme nejlépe předejít. Klíčovou fází je samotné pájení, kde pájena plocha prochází přes vlnu roztavené pájky, což vyžaduje přesnou kontrolu teploty a rychlosti, pro rovnoměrné a kvalitní zapájení všech spojů [16, 18].

Závěrečná fáze je chlazení, které je nezbytné pro stabilizaci pájených spojů, přičemž pozvolné ochlazení pomáhá předcházet potenciálnímu napětí v materiálu. Tato metoda nabízí významné výhody, jako je schopnost efektivního zpracování různorodých součástek a zajištění vysoké kvality spojů, což činí pájení vlnou preferovanou volbou pro náročné aplikace v elektronickém průmyslu, jedná se tedy o strojní druh pájení [16, 18].



Obr. 2.22 Princip pájení plošnou vlnou [19]

2.4.2 Pájení přetavením

Pájení přetavením, známé také jako Reflow Soldering, je proces, při němž je pájka aplikována na kontaktní pájecí plochy, ve formě pasty ještě před samotným procesem přetavení. Klíčovou věcí pro správné zapájení, je dosažení a udržení rovnoměrné a konstantní teploty, po celé kontaktní ploše, což vyžaduje efektivní přenos tepla na pájené spoje. Během procesu se součástky díky povrchovému napětí roztavené pájky automaticky vycentrují na předem připravené pájecí plošky [16, 17].

U metody pájení přetavením, se pro dosažení efektivního a rovnoměrného ohřevu pájecích spojů využívají všechny základní druhy přenosu tepla [16, 17]:

- **Vedení (kondukce)** je proces, při kterém dochází k přenosu tepla mezi dvěma přilehlými částmi materiálu, bez pohybu samotného materiálu. Tento způsob je efektivní pro přímý kontakt mezi ohřívacím prvkem a pájenou součástí.
- **Proudění (konvekce)** zahrnuje přenos tepla prostřednictvím pohybu teplého vzduchu nebo jiného plynu, okolo pájených spojů. Je to základní princip konvekčních pecí, kde nucená konvekce umožňuje rychlé a rovnoměrné rozložení tepla.
- **Záření (radiace)** je přenos tepla prostřednictvím elektromagnetických vln, což umožňuje ohřev objektů na dálku bez nutnosti přímého kontaktu nebo média pro přenos tepla. Tento způsob se využívá například v infračervených pecích.

2.4.3 Pájení konvekční metodou

Konvekční metoda pájení využívající průchozí pece s nuceným oběhem média pro efektivní a rovnoměrný přenos tepla na pájené spoje. Tento proces využívá ventilátory a čerpadla k nucené konvekci, což umožňuje přesné řízení a distribuci tepla. Jako tepelné médium, se nejčastěji používá vzduch nebo dusík, přičemž dusíku snižuje riziko oxidace během pájení, což má za následek lepší pájitelnost a umožňuje vyhnout se použití vysoce aktivních tavidel. Díky usměrnění tepla pomocí trysek nebo centrálnímu ohřevu, umožňuje tento proces efektivně ohřívat oblasti osazené součástkami bez ohledu na jejich barvu, velikost či hustotu. Tato metoda je také vhodná pro opravářskou techniku, kde precizní řízení tepla umožňuje cílený ohřev a snadné vyjímání součástek, např. u integrovaných obvodů nebo základních desek [16, 17].

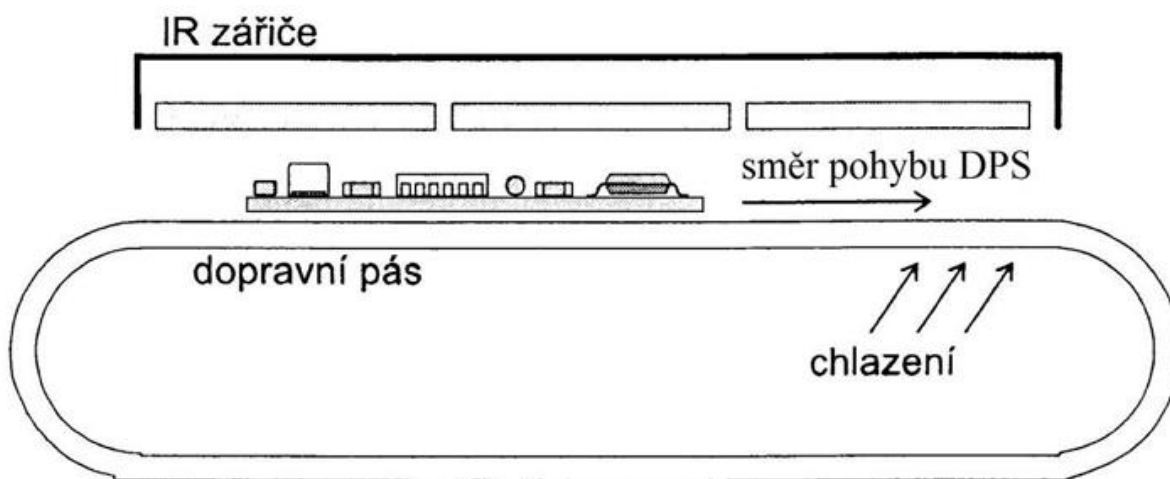
Pece používané v konvekčním pájení se dělí na vsázkové a průběžné (in-line), kde každý typ má své specifické využití od malovýroby po velkovýrobu. Rozdělení do specifických zón umožňuje přesnější nastavení procesních parametrů, což je zásadní pro dosažení optimálních výsledků pájení. Průběžné pece jsou obzvláště ceněné pro jejich schopnost udržovat konzistentní teplotní profil skrze celý proces, od předehrátí přes zapájení až po ochlazení celé desky pájených spojů. Teplotní profil a kvalita pájecí pasty jsou klíčové body procesu, které ovlivňují kvalitu zapájených spojů. Všechny tyto body, mají za následek zrychlení výrobního cyklu a zvýšení kvality výsledných spojů [16, 17].

2.4.4 Pájení infračerveným zářením

Pájení infračerveným zářením (IR Soldering) je jednou z prvních metod používaných v průmyslu, pro pájení desek plošných spojů. Charakteristické pro tuto techniku je použití IR zářičů, umístěných nad a pod dopravníkovým pásem, které zajišťují průběžný ohřev. Dělení pece do různých teplotních zón umožňuje přizpůsobení procesu pájení konkrétním požadavkům, což je klíčové pro dosažení optimálních výsledků a zajištění kvalitních spojů. Pro minimalizaci nerovnoměrného rozložení teploty a zlepšení kvality pájení, je infračervený ohřev často kombinován s nucenou konvekcí vzduchu, která pomáhá vyrovnat teplotní rozdíly a zlepšuje rozvod tepla. Proto se používají ve většině případech průběžné pece, které jsou navrženy pro velkovýrobu a umožňují detailní nastavení teplotního profilu, pomocí regulace intenzity IR záření a rychlosti dopravního pásu [16, 17, 18].

Díky schopnosti IR záření pohlcovat teplotu v závislosti na barvě a materiálu povrchu, tmavší součástky absorbují více tepla než světlé, což může vést k nerovnoměrnému ohřevu a tepelnému namáhání součástek. Tento jev může nepříznivě ovlivnit kvalitu pájených spojů. Na druhou stranu, vsázkové pece s IR ohřevem jsou vhodné pro laboratorní použití a malovýrobu, kde je důležité flexibilní nastavení teplotního profilu [16, 17, 18].

V obou případech je zásadní správné nastavení teplotního profilu a výběr pájecí pasty, které jsou klíčové pro dosažení optimálních výsledků a zajištění kvalitních a spolehlivých pájených spojů. Tato metoda tak představuje důležitou součást moderní výrobní technologie elektroniky, infračervené pájení nabízí vysokou účinnost ohřevu, dosahující až 70 %, a představuje relativně jednoduchý a snadno ovladatelný proces [16, 17, 18].



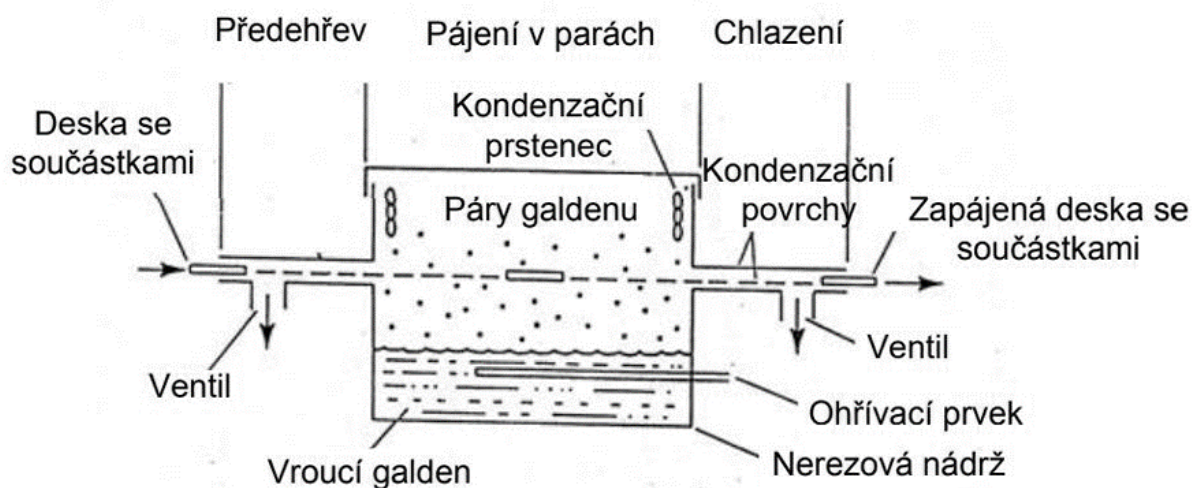
Obr. 2.23 Princip pájení přetavením, pomocí infračerveného záření [16]

2.4.5 Pájení kondenzační metodou

Základem této metody je použití nasycené páry, obvykle perfluoropolyether (PFPE) nebo různých fluorouhlíků, která předává teplo přímo desce osazené součástkami a pájecí pastě. Díky přesnému regulování teploty, která je dána bodem varu kapaliny, nabízí tato technologie velmi definovanou a konstantní teplotu v celém procesu pájení, což minimalizuje riziko poškození komponent nadměrným teplem. V kondenzačních pájecích stanicích dochází k vytvoření spoje ohřátím pájecí pasty na teplotu tavení, což je zajištěno efektivním předáním tepla kapaliny přeměněné v páru k chladnějším předmětu, na kterém dochází ke kondenzaci [20].

Výhody této metody zahrnují nejen přesně definovanou teplotu a prevenci oxidace díky ochranné atmosféře bez přítomnosti kyslíku, ale také rovnoměrnost rozložení teploty a minimalizaci tepelného namáhání součástek. Navzdory jejím výhodám je kondenzační pájení spojeno s výzvami, jako je nutnost bezpečného nakládání s použitými kapalinami a delší doba ohřevu. Přesto je díky své příznivé rovnoměrnosti teploty a konstantním podmínkám považováno za jednu z nejeftivnějších metod, obzvláště pro bezolovnaté pájení [16, 20].

Pájení v parách se realizuje v parních komorách, kde je kapalina na dně nádrže zahřívána na bod varu. Uvolňující se páry vytvářejí ochrannou atmosféru a zajišťují potřebnou energii pro přetavení pájecí pasty. Technologie umožňuje použití jak vsázkových, tak průběžných pecí, přičemž všechny typy pecí zajišťují díky regulaci páry a ventilaci konstantní teplotní podmínky přes celou plochu pájeného dílu [16, 20].



Obr. 2.24 Princip pájení kondenzační metodou pro kontinuální výrobu [21]

2.4.6 Pájení laserem

Pájení laserem se vyznačuje svou univerzálností a přesností, kde tradiční metody pájení, jako jsou pájení vlnou nebo přetavením, narazí na své limity. V těchto případech se tato metoda pájení, využívá jako doplňková (přídavná) k pájení vlnou nebo přetavením. Tato technologie využívá impulz dlouhý přibližně 300 ms, s výkonem $11,4 \text{ W/mm}^2$ k dosažení teploty $293 \text{ }^\circ\text{C}$ přímo na pájeném spoji. Díky této metodě je možné cíleně řešit problémy spojené s tvorbou zkratů mezi vývody u pájení vlnou nebo nerovnoměrným ohřevem součástek rozdílných velikostí u pájení přetavením. Umožňuje přetavit pájecí pastu nebo trubičkovou pájku což vede k vytvoření kvalitních a spolehlivých spojů [17, 18].

Základem zařízení pro laserové pájení je osazovací modul se zaměřovacím systémem a laserem propojeným optickým vláknem, který směřuje paprsek na pájené místo pod úhlem 30°. Laserové pájení se od infračerveného záření především zaměřením na bodové pájení s vysokou přesností, kde je možné dosáhnout vynikající kontroly teploty bez nadměrného ohřevu okolních komponent. Navíc díky koherentnímu monochromatickému světlu je laserový paprsek snadno zpracovatelný a umožňuje extrémně přesné zacílení na požadované spoje. Klíčem k úspěchu je stejnoměrný světelný tok z optického systému, jehož nestejnomyšlnost by mohla vést k nedostatečnému ohřevu a potenciálním defektům spojů. Využívány jsou různé typy laserů, každý s unikátními vlastnostmi vhodnými pro specifické aplikace: CO₂ laser, Nd: YAG laser (Yttrium-Aluminium-Granát), Diodový laser [17, 18].

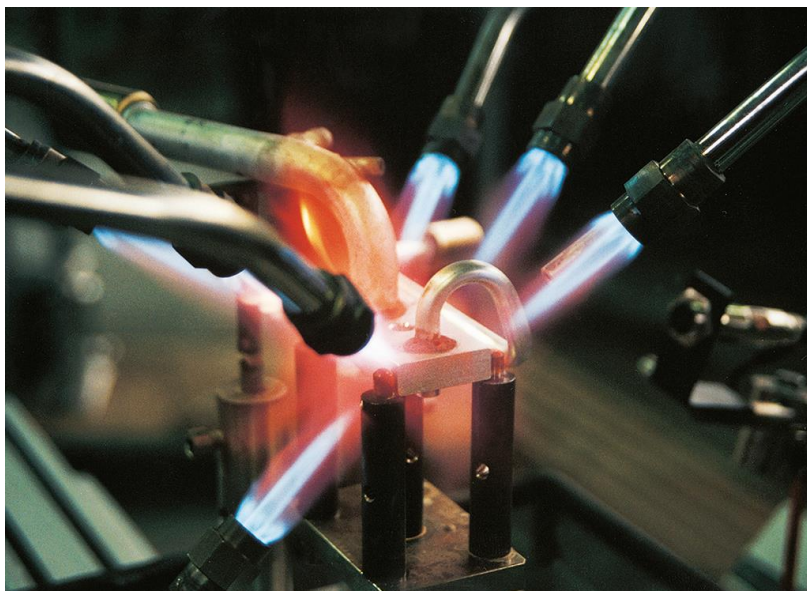
Přestože laserové pájení přináší mnoho výhod, jako jsou rychlost, přesnost a minimalizace tepelného zatížení, jeho použití je ekonomicky efektivní pouze u složitých aplikací, kde je důraz kladen na vysokou kvalitu spojů. Vyšší náklady na zařízení a potřeba zvláštního nastavení, pro každý spoj zvlášť omezují jeho široké využití [17, 18].

2.4.7 Mechanizované pájení plamenem

Mechanizované pájení plamenem představuje efektivní techniku pro spojování kovových dílů, pomocí tepelné energie získané spalováním hořlavých směsí plynů. Umožňuje přesné a lokální ohřívání oblasti spoje k dosažení optimální pájecí teploty. Díky širokému výběru hořákových systémů, které lze přizpůsobit specifickým potřebám jednotlivých sestav a velikostí, je tato technika vhodná pro široké spektrum aplikací. Rozdílné profily hořáků umožňují přizpůsobení procesu pájení tak, aby bylo možné efektivně a rovnoměrně ohřívát díly různých rozměrů a geometrií [22, 23].

Výběr topného plynu hraje klíčovou roli v procesu mechanizovaného pájení plamenem. Různé směsi plynů nabízí odlišné charakteristiky ohřevu, přičemž hlavními faktory ovlivňujícími jejich výběr jsou intenzita a efektivita ohřevu, náklady na palivo a jeho dostupnost. Směsi jako kyslík-acetylén nebo kyslík-propan poskytují vysoký výkon ohřevu a jsou vhodné pro aplikace, které vyžadují rychlé a intenzivní ohřívání. Systémy využívající stlačený vzduch společně s propanem, acetylenem nebo zemním plynem nabízejí nižší náklady a jsou dostupnější pro velkovýrobu [22, 23].

Přestože je ruční pájení nejčastější způsob, v některých případech hromadné výroby může být použit automatizovaný nebo mechanizovaný proces (Obr. 2.25), což zvyšuje efektivitu a reprodukovatelnost pájených spojů. S přihlédnutím k technologickým postupům a bezpečnostním opatřením, lze pájení plamenem považovat za spolehlivou a efektivní metodu pro vytváření pevných a odolných spojů [22, 23].

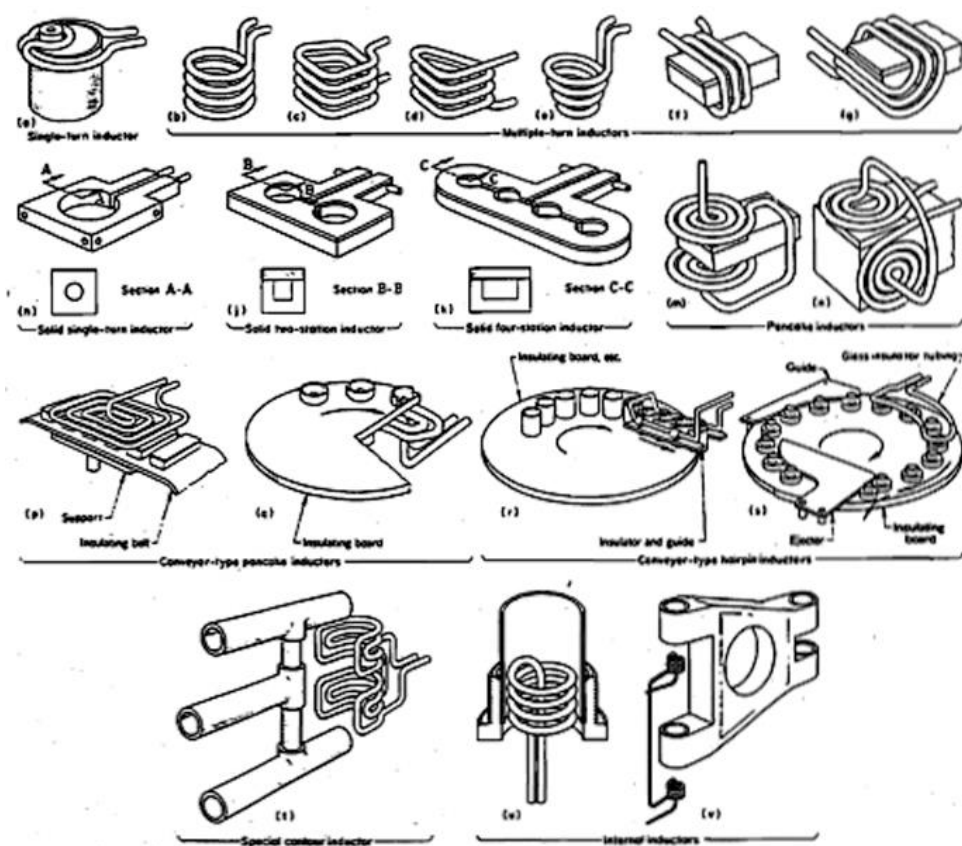


Obr. 2.25 Mechanizované pájení plamenem s více hořáky [24]

2.4.8 Pájení indukční

Indukční pájení zajišťuje spojování kovových dílů bez přímého kontaktu. Tato metoda využívá elektrickou indukci pro generování tepla v součástkách, což je zásadní pro dosažení rovnoměrného ohřevu na potřebnou pájecí teplotu. Kritickým aspektem indukčního pájení je nutnost pomalého a kontrolovaného ohřevu, aby bylo zajištěno rovnoměrné prohřátí jak povrchových vrstev, tak celého průřezu spoje. Při průchodu střídavého proudu indukční cívkou dochází k indukci sekundárního proudu v kovové součásti, čímž se generuje teplo potřebné pro proces pájení. Využití vysoké frekvence umožňuje koncentrovat teplo přímo na povrchu materiálu, což je ideální pro specifické pájecí aplikace. Tato technologie je vhodná jak pro jednorázové operace, tak pro hromadnou výrobu s díly stejného tvaru a umožňuje pájení bez nutnosti použití tavidla nebo řízené atmosféry [22, 23].

Mezi přednosti této metody patří především minimalizace rizika oxidace díky krátké době pájení, efektivnímu ohřevu dlouhých a válcovitých dílů. Indukční pájení se vyznačuje vysokou efektivitou a přesností, což umožňuje jeho aplikaci ve všech teplotních rozmezích a pro různé elektricky vodivé materiály. Díky využití specificky navržených induktorů a možnost zpracování součástí ve vakuu nebo v ochranné atmosféře, napomáhá překonat tvarově složité součásti. Induktory, obvykle chlazené vodou, by měly být navrženy tak, aby optimálně kopírovaly tvar spojovaných dílů, což vyžaduje hluboké znalosti a zkušenosti v oblasti designu induktorů (Obr. 2.26) [22, 23].



Obr. 2.26 Různé druhy induktorů pro indukční pájení [25]

2.5 Způsoby destruktivního a nedestruktivního testování svařovaných a pájených spojů

2.5.1 Testování svařovaných spojů

Kontrola kvality svarových spojů je nezbytným krokem v procesu výroby a údržby různých konstrukcí, aby se zajistila jejich bezpečnost a dlouhodobá spolehlivost. Zaměřuje se na odhalení jak povrchových, tak vnitřních vad, které mohou vzniknout během svařování z různých příčin, včetně nesprávného sestavení, špatné svařovací techniky nebo nedostatečné přípravy materiálu. Pro zajištění souladu se specifikacemi a normami se používají jak destruktivní, tak nedestruktivní metody [26, 27].

Nedestruktivní metody kontrol svarů [26, 27]:

- **Metody pro odhalení povrchových vad:**
 - **Vizuální kontrola:** Jedná se o základní metodu, která umožňuje rychlé a efektivní odhalení zjevných povrchových vad, jako jsou trhliny, neprovaření a poruchy povrchové úpravy.
 - **Kapilární zkouška:** Detekce drobných prasklin a dutin na povrchu svaru (pokud nelze vizuální kontrolou). Detekční kapalina aplikovaná na povrch, proniká do trhlin, děr, prasklin a po aplikaci detekční látky (prášek-oxid hořečnatý, uhličitán vápenatý, ...). Vada se projevuje výrazným zbarvením na povrchu zkoušeného předmětu.
- **Metody pro odhalení vnitřních vad:**
 - **Ultrazvuková kontrola:** Ultrazvukové vlny jsou používány k detekci vnitřních vad ve svarech, jako jsou dutiny a vměstky. Vlny se odrážejí od vad a vrací se zpět k přijímacímu zařízení, což umožňuje lokalizaci a charakterizaci defektů.
 - **Rentgenová kontrola (radiografie) a tomografie:** Prozáření svaru rentgenovými nebo gama paprsky umožňuje vizualizaci vnitřní struktury svaru na digitálním snímači, odhalující vady jako jsou dutiny, trhliny a neprovaření.

Destruktivní metody kontrol svarů [27]:

- **Makro a mikroskopické zkoušky:** V místě svaru, materiál je oddělen a zkoumán pod mikroskopem nebo pouhým okem, po leštění a leptání k lepšímu odhalení vnitřní struktury a případných vad.
- **Trhací zkoušky:** Svarové spoje jsou podrobeny zatěžovací zkoušce až do bodu selhání, což poskytuje informace o mechanické odolnosti svaru.
- **Zkouška tahem:** Zaměřuje se na měření maximální tahové síly, kterou spoj vydrží předtím, než dojde k jeho porušení (prasknutí). Poskytuje důležité informace o pevnosti spoje v tahu.
- **Zkouška rázem v ohybu:** Zjišťuje schopnost materiálu odolávat rázovému zatížení, kdy je vzorek namáhán v ohybu. Spoj vystavený rázům nebo vibracím.
- **Zkoušky tvrdosti (Vickers):** Odolnost materiálu vůči trvalému deformování pomocí diamantového hrotu (indenteru), který se vtlačí do povrchu materiálu. Tvrdost se měří na stupnici Vickers (HV), přičemž hodnota 350HV, je mezní hodnota pro svarové spoje.
- **Zkouška v ohybu:** Podobně jako zkouška rázem v ohybu, ale provádí se pomaleji a měří se schopnost materiálu, odolávat ohýbání bez zlomení nebo trvalé deformaci. Používá se pro posouzení pružnosti a plastických vlastností materiálu.
- **Zkouška rozlomením:** Jakým způsobem a v jakém místě dojde k lomu vzorku pod zatížením. Pomáhá identifikovat slabá místa ve spojích a hodnotit materiálové vlastnosti napříč spojem.

2.5.2 Testování pájených spojů

Pro pájené spoje je typické, že často nejsou posuzovány podle pevnosti, ale spíše podle jiných kritérií, jako je těsnost spoje. To znamená, že standardní zkoušky pevnosti nemusí být vždy klíčové pro hodnocení kvality spoje, zvláště v aplikacích, kde pevnost není prioritní. Například, v mnoha případech je důležitější, aby spoj zůstal nepropustný, než aby odolával vysokému mechanickému zatížení. Proto jsou pájené spoje jsou navrženy tak, aby nejlépe odolávaly smykovému namáhání než například tahovému zatížení. Smyková pevnost spoje je významněji ovlivněna rozměry spoje než pevností v tahu, což je třeba brát v úvahu při návrhu a hodnocení pájených spojů [16, 17].

Nedestruktivní zkoušky pro tvrdé pájení dle ČSN EN 12799 [28]:

- **Metody pro odhalení povrchových vad:**
 - **Vizuální kontrola:** Jedná se o základní metodu, která umožňuje rychlé a efektivní odhalení zjevných povrchových vad, jako jsou trhliny, neprovaření a poruchy povrchové úpravy.
 - **Kapilární zkouška:** Detekce drobných prasklin a dutin na povrchu pájeného spoje (pokud nelze detekovat pomocí vizuální kontroly). Detekční kapalina aplikovaná na povrch, proniká do trhlin, děr, prasklin a po aplikaci detekční látky (prášek-oxid hořečnatý, uhličitan vápenatý, ...). Vada se projevuje výrazným zbarvením na povrchu zkoušeného předmětu.
- **Metody pro odhalení vnitřních vad:**
 - **Ultrazvuková kontrola:** Ultrazvukové vlny jsou používány k detekci vnitřních vad v pájených spojích, jako jsou dutiny a vměstky. Vlny se odrážejí od vad a vrací se zpět k přijímacímu zařízení, což umožňuje lokalizaci a charakterizaci defektů.
 - **Rentgenová kontrola (radiografie) a tomografie:** Prozáření svaru rentgenovými nebo gama paprsky umožňuje vizualizaci vnitřní struktury svaru na digitálním snímači, odhalující vady jako jsou dutiny, trhliny a neprovaření.
 - **Přetlakové zkoušení:** Testuje těsnost spoje, zaměřuje se na kontrolu, zda spoj účinně zabraňuje únikům tekutin nebo plynů pod tlakem. Tento typ zkoušky je zvláště důležitý v aplikacích, kde je klíčová těsnost, jako jsou například nádrže, tlakové nádoby, chladiče, pájené soustavy a další.

- **Termografie:** Využívá infračervené záření k vizualizaci teplotního pole na povrchu objektu. Umožňuje rychle a bezkontaktně detekovat tepelné anomálie, které mohou být způsobeny vnitřními vadami, jako jsou trhliny, neprůvody, dutiny nebo jiné strukturální nedostatky v materiálu. V oblasti pájených spojů se termografie používá k identifikaci oblastí s odlišnými tepelnými vlastnostmi, které by mohly naznačovat přítomnost vad nebo nehomogenit ve spoji.

Destruktivní zkoušky pro tvrdé pájení dle ČSN EN 12797 [29]:

- Zkouška smykem – hodnotí smykovou pevnost spoje.
- Zkouška tahem – měří pevnost spoje v tahu.
- Metalografická kontrola – zkoumá mikrostrukturu spoje a odhaluje vnitřní vady.
- Odlupovací zkoušky – testuje odolnost spoje proti odlupování.
- Zkoušky lámavosti – posuzuje křehkost materiálu nebo spoje.

2.6 Použité metody pro pájený vzorek

2.6.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse (mikrotvrdość)

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je jednou z nejpoužívanějších metod pro měření mechanických vlastností materiálů. Zkouška je založena na principu, který je podobný Brinellově zkoušce, ale používá diamantový indentor ve tvaru čtyřbokého jehlanu s čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Úhel byl zvolen s ohledem na minimalizaci tření mezi indentorem a zkoušeným vzorkem. Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6507 [30, 31].

Vzorek musí být čistý, hladký a bez mazadel. Povrch by měl být jemně broušený nebo leštěný, následně indentor se vtlačuje do materiálu zatížením, dle použité hodnoty zatížení po dobu 10 až 15 sekund. Po odlehčení se měří délky obou úhlopříček vtisku pomocí mikroskopu, z nichž se určí průměrná hodnota. Tvrdost se následně vypočítá pomocí vztahu 3.1 [30, 31]:

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{u^2} \quad (3.1)$$

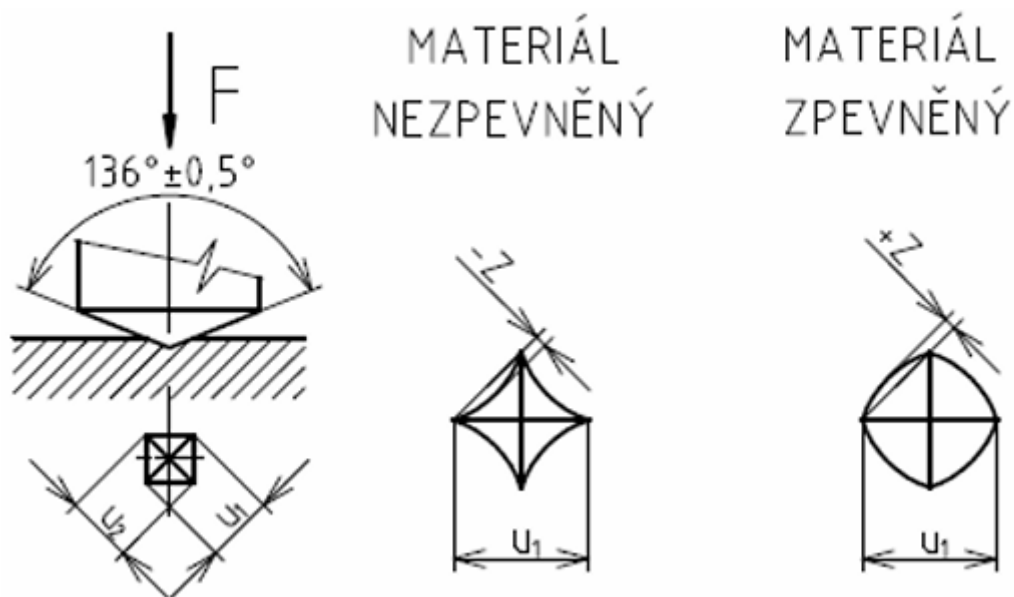
kde značí: HV – Vickersovo tvrdostní číslo [-]

F – zatěžující síla [N]

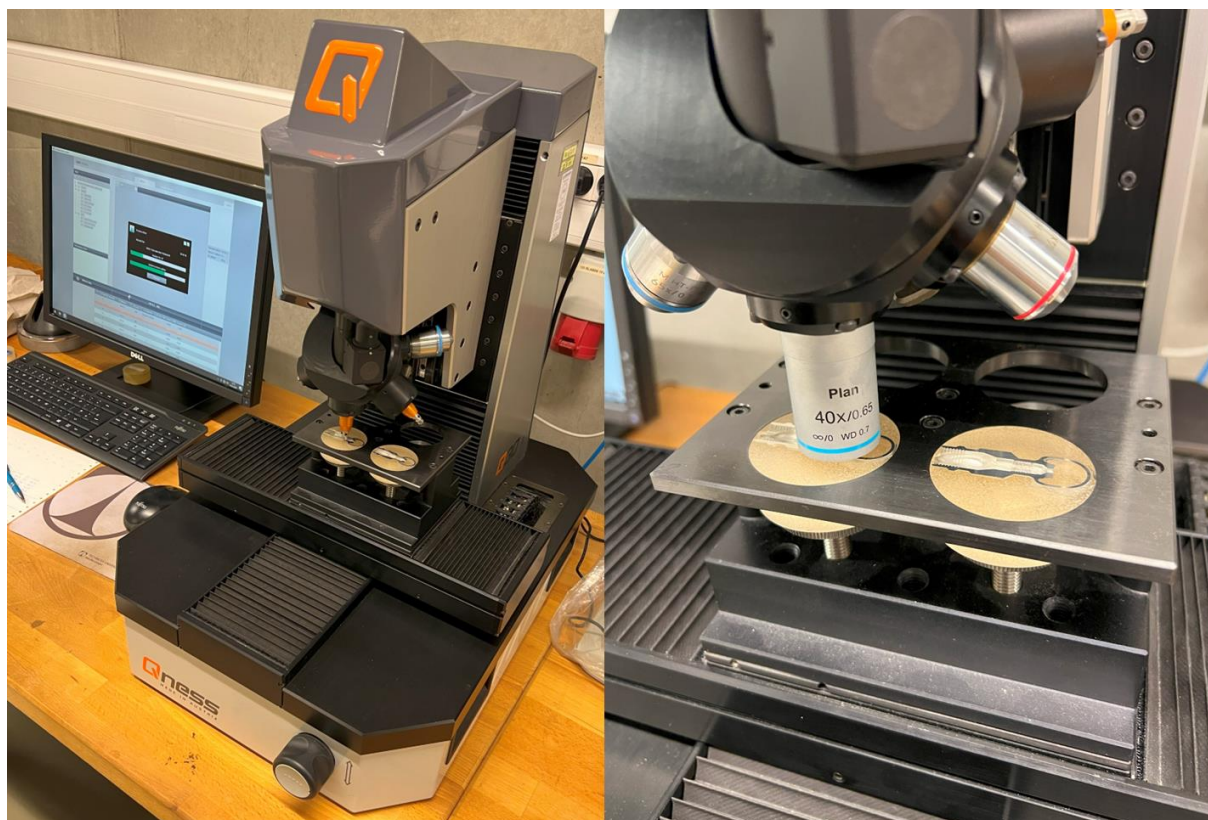
u – aritmetický průměr délek úhlopříček vtisku [mm]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je klasifikována podle hmotnosti zkušebního zatížení, které se používá k vtlačení indentoru do materiálu. Toto zatížení je přímo souvisí se silou, kterou indentor působí, a určuje rozsah měření tvrdosti od standardních hodnot až po mikrotvrdość. Tady jsou základní kategorie zatížení u Vickersovy zkoušky [30, 31]:

- **Standardní zkouška tvrdosti 5-100 kg, (HV5 – HV100):** pro většinu kovových materiálů, od měkkých kovů jako je hliník, až po tvrdší materiály jako jsou ocel a tvrzené slitiny.
- **Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení 0,2-5kg (HV0,2 – HV5),** pro materiály s tenkými povrchy, povrchovými úpravami nebo pro materiály, které by mohly být při vyšších zatíženích poškozeny.
- **Zkouška mikrotvrdości 0,01-0,2kg (HV0,01 – HV0,2),** používá se k měření velmi malých oblastí (tenké vrstvy, mikrostruktury nebo velmi křehké materiály).



Obr. 2.28 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [31]



Obr. 2.27 Tvrdoměr a mikrotvrdoměr Qness Q 30 A

V našem případě se jedná o měření tvrdosti na velmi malé ploše a pro materiál, který je pravděpodobně ovlivněn teplotní změnou, která zmenšuje již tak malou tvrdost. Proto jsme zvolili zkoušku mikrotvrdosti HV 0,1, dle normy ČSN EN ISO 6507.

2.6.2 Mikroskopická analýza materiálu pomocí elektronového mikroskopu

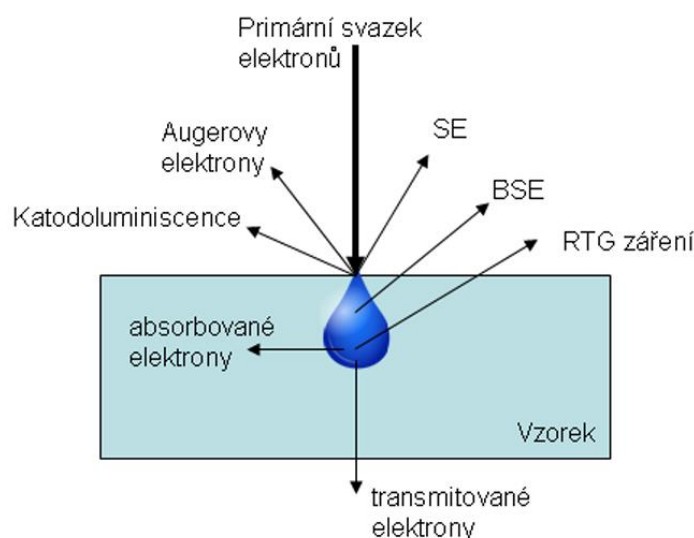
Elektronové mikroskopy jsou klíčové pro studium materiálů na mikroskopické úrovni, což umožňuje přesné pozorování jak vnitřní struktury, tak povrchových vrstev vzorků. Tato zařízení využívají elektronový svazek (Obr. 2.29), místo tradičního světelného paprsku a vše probíhá ve vakuu, což umožňuje vyšší rozlišení a detailnější zobrazení [32].

Existují dva hlavní typy elektronových mikroskopů [32]:

- **Transmisní elektronový mikroskop (TEM)**, který umožňuje nahlížet do vnitřní struktury materiálu díky průchodu elektronů skrze vzorek. Tedy výsledný obraz je pozorován v proslém světle skrze vzorek.
- **Skenovací elektronový mikroskop (SEM)**, který se zaměřuje na zobrazení povrchu vzorku. Skenovací elektronový mikroskop, jako je například model TESCAN MIRA 3 (který byl použit pro naše skenování), poskytuje obrazy povrchu vzorku prostřednictvím interakcí primárního elektronového paprsku s atomovou strukturou materiálu, což vede k emisi sekundárních a zpětně odražených elektronů.

Sekundární elektrony (SE), které se uvolňují z povrchové vrstvy materiálu, jsou zpravidla použity k získání detailních topografických informací. Jas bodu na obrázku závisí na počtu zachycených sekundárních elektronů, více zachycených elektronů vede k jasnějšímu zobrazení.

Zpětně odražené elektrony (BSE), které pocházejí z hlubších vrstev vzorku, poskytují informace o materiálovém složení. Intenzita zpětně odražených elektronů závisí na atomovém čísle elementu, což znamená, že těžší prvky se zobrazí světleji na finálním snímku.



Obr. 2.29 Interakce elektronů primárního svazku [32]

Mikroanalýza, nebo také energiově disperzní spektroskopie (EDS), je důležitou technikou pro identifikaci chemického složení materiálů a jejich koncentraci. Pomocí EDS a daného detektoru se získává rentgenové záření, vzniklé interakcí elektronového paprsku s vzorkem, které detektory analyzují, aby určily přítomnost a koncentraci různých prvků ve vzorku [32].



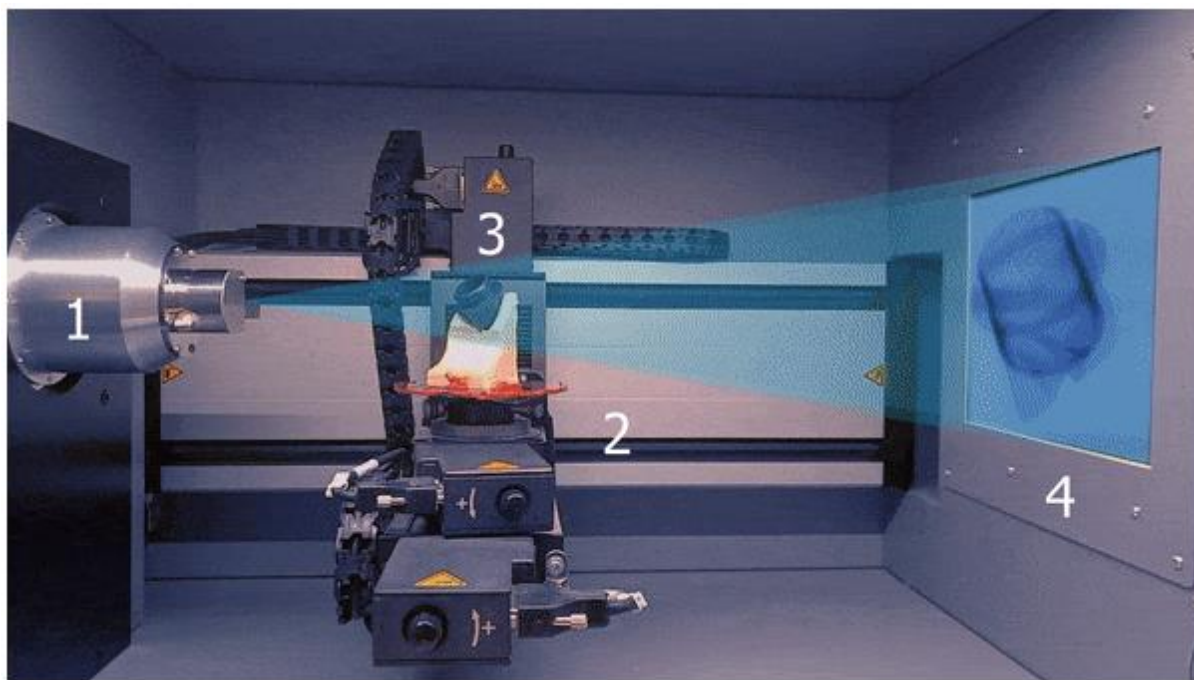
Obr. 2.30 Použitý elektronový mikroskop TESCAN MIRA 3 [32]

2.6.3 Metoda výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie, známá jako CT (Computed Tomography), je technologie známá zejména ze zdravotnického sektoru, kde slouží k diagnostice tím, že poskytuje řez celým lidským tělem. Dnes je využívána nejen v medicíně, ale i v průmyslu a vědě jako klíčový nástroj pro nedestruktivní testování a kontrolu kvality [33, 34].

Tomografie, což znamená z překladu zobrazení v řezech (tome=řez a grafein=psát), umožňuje získat detailní pohled dovnitř zkoumaného objektu, bez nutnosti vnějšího zásahu nebo narušení objektu. CT systémy využívají rentgenové záření k průchodu skrze zkoumaný objekt, který je následně zaznamenán na digitálním detektoru. Na rozdíl od běžného světla má rentgenové záření dostatečně vysokou energii, aby mohlo projít materiály bez významnějšího odrazu, což umožňuje zobrazit struktury neviditelné pro běžné osvětlení.

V důsledku rozdílné hustoty materiálů dochází k různé míře útlumu záření, tedy místa s vyšší hustotou pohlcují více záření, což na snímcích vede k tmavším oblastem, zatímco místa s nižší hustotou záření propouštějí, což vytváří světlejší oblasti. Tyto rozdíly v útlumu jsou v detektoru převedeny na viditelné světlo a digitalizovány, přičemž každý pixel obrazu odpovídá specifické úrovni absorpce, což je vyjádřeno jako odstín šedi v digitální formě [33, 34].



Obr. 2.31 Inspekční komora malého tomografu; 1) RTG zdroj, 2) vzorek, 3) otočný stůl, 4) snímač/detektor. Soubor radiografických snímků pro proces rekonstrukce filtrovanou zpětnou projekcí (FPB) [33]

Při tomografii se vzorek umístí na otočný stolek, což umožňuje získání snímků z různých úhlů. Tyto snímky se později používají pro rekonstrukci 3D modelu objektu. Proces známý jako filtrovaná zpětná projekce (FBP) převádí tyto dvourozměrné snímky na trojrozměrný model tím, že rekonstruuje objekt z řady jeho projekcí. Tento krok je zásadní pro získání detailního a přesného 3D modelu zkoumaného objektu (Obr. 2.31) [33, 34].

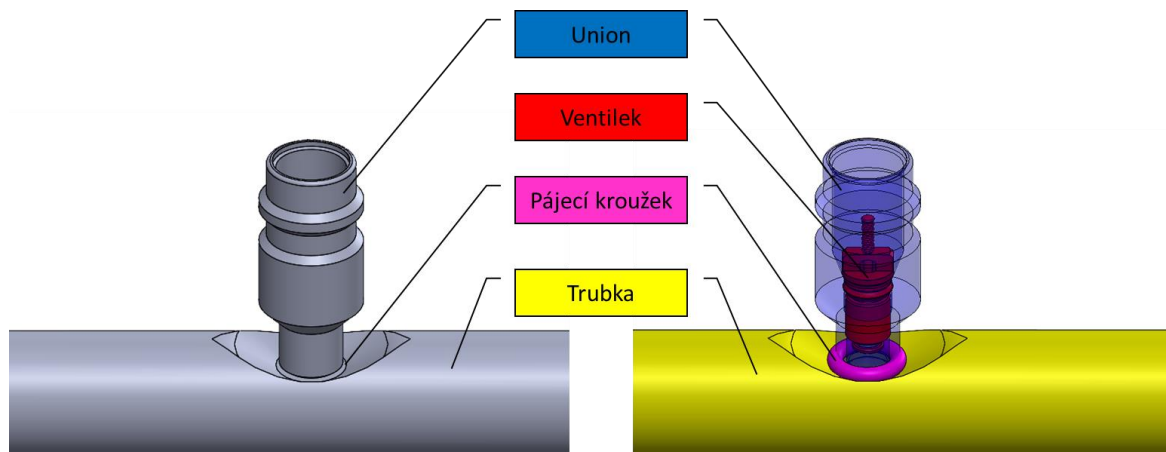
3 Experimentální část

Cílem experimentální části diplomové práce je poskytnout co nejpodrobnější informace o pájeném spoji zvoleného dílu klimatizace s označením X, vyráběného ve firmě Y. Tento díl je kontrolován ve dvou stupních, a to na těsnost spoje pomocí tzv. héliového testu a následně vizuálně v oblasti pájeného spoje. V praxi dochází k případům, kdy sledovaný díl vyhovuje z funkčního hlediska (dílna prošel héliovým testem), ale je vyřazen po subjektivní vizuální kontrole operátorem, kdy je na díle vyhodnocován tzv. opal, napálení nebo krupička. Řešení diplomové práce proto bylo zaměřeno do oblasti vad, kde dochází k vizuální změně povrchu pájeného spoje a jeho okolí, které je v současnosti považováno za nepřijatelné a jedná se tedy o díly, který se musí zadržet a následně řádně recyklovat. Cílem experimentální části je otestovat a zhodnotit tepelně ovlivněnou oblast, která vizuálně neodpovídá standardním požadavkům a vyhodnotit, zda dochází ke změně struktury, tvrdosti a porušení povrchu materiálu.

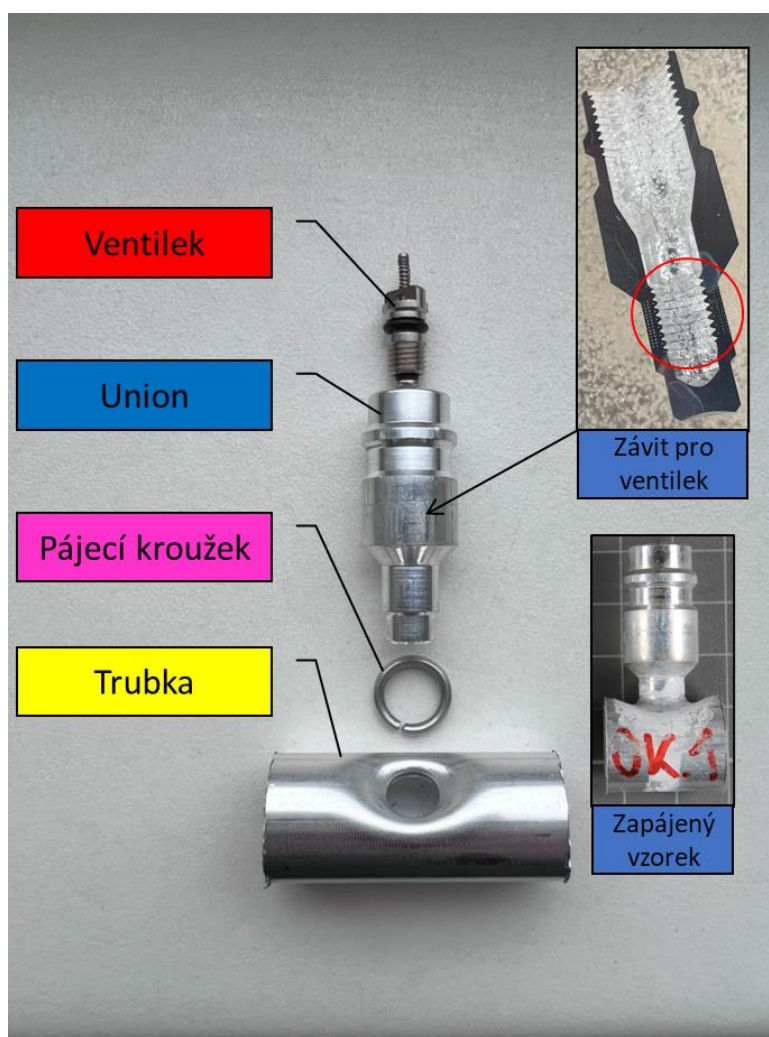
3.1 Představení testovaného dílu klimatizace

Testovaný díl s označením X slouží k propojení klimatizační jednotky nebo spíše okruhu, který zajišťuje chlazení a cirkulaci v daném systému. Pájený spoj zde hraje velkou roli, zapájená část plní funkci doplnění média do systému a jeho natlakování na požadovaný tlak. Pájený díl se skládá ze čtyřech hlavních dílů (Obr. 3.1 a 3.2), které tvoří důležitou část z celku pro klimatizační okruh. Hlavní součástí je hliníková trubka z materiálu EN AW-3003 (Tab. 1), do které je vytvořena díra, pro usazení tzv. unionu z materiálu EN AW-6063 (Tab. 2) a možnosti zapájení všech součástí do sebe. Pro úspěšné zapájení je potřeba pájecí drát (Tab. 3) a pájecí stroj, v tomto případě pájecí karusel, který zvládne vše zkompletovat. Po zapájení všech součástek, je následně do unionu zamontován ventilek, ten je dle určité specifikace utažen, na požadovaný utahovací moment, který má určitý rozsah, pro zajištění správné funkčnosti. Celý tento celek je následně otestován héliovým testem, který má za úkol odhalit netěsnosti pájeného spoje, pokud tento test vyjde v určitém rozsahu, díl je po stránce testu těsnosti a funkčnosti v pořádku. Poslední test a vyhodnocení, má na starost vizuální kontrola, kde se odhalují povrchové nedostatky v oblasti pájeného spoje. V našem případě, všechny vzorky, které byly použity v diplomové práci prošly úspěšně héliovým testem, tudíž všechny součásti byly z pohledu těsnosti pájeného spoje v pořádku. Testované díly následně neprošly vizuální kontrolou z důvodu vizuální změny unionu, který byl tepelně ovlivněn a změnil především barvu a povrchovou strukturu, jak z vnější části, tak i vnitřní části.

Vizuální kontrola se zaměřuje především na hlavní části unionu, kde je zhotoven závit pro montáž ventilku. Závit leží v nejužším místě unionu a zároveň zde působí přímo plynové hořáky, které zajišťují roztavení pájecího kroužku a následného zapájení unionu do díry v trubce. Tento proces probíhá za poměrně krátký časový úsek, kdy v pájeném spoji, dosahujeme přibližných teplot okolo 600°C.



Obr. 3.2 Reálný rozbor pájené součásti a jejich prvků



Obr. 3.1 Modelový rozbor pájené součásti a jejich prvků

3.2 Materiálové specifikace

3.2.1 Chemické složení – trubka (EN AW-3003)

Tab. 1 Chemické složení pro pájenou součást – trubka

| Alloy designation | | Si | Fe | Cu | Mn [%] | Mg [%] | Cr | Ni | Zn | Ti | Ga | V | Remarks | Others Each | Others Total | Aluminium min. [%] |
|-------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-------------|--------------|--------------------|
| Numerical | Chemical Symbols | [%] | [%] | [%] | | | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | |
| EN AW-3002 | EN AW-Al Mn0,2Mg0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0.05-0.25 | 0.05-0.20 | - | - | 0,1 | 0 | - | 0,1 | Remainder | 0,03 | 0,1 | Remainder |
| EN AW-3003 | EN AW-Al Mn1Cu | 0,6 | 0,7 | 0,1 | 1.0-1.5 | - | - | 0,1 | - | - | - | - | Remainder | 0,05 | 0,15 | Remainder |
| EN AW-3004 | EN AW-Al Mn1Mg1 | 0,3 | 0,7 | 0,3 | 1.0-1.5 | 0.8-1.3 | - | - | 0,3 | - | - | - | Remainder | 0,05 | 0,15 | Remainder |
| EN AW-3005 | EN AW-Al Mn1Mg0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,3 | 1.0-1.5 | 0.20-0.6 | 0,1 | - | 0,3 | 0,1 | - | - | Remainder | 0,05 | 0,15 | Remainder |
| EN AW-3005A | EN AW-Al Mn1Mg0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,3 | 1.0-1.5 | 0.20-0.6 | 0,1 | - | 0,4 | 0,1 | - | - | Remainder | 0,05 | 0,15 | Remainder |

3.2.2 Chemické složení – union (EN AW-6063)

Tab. 2 Chemické složení pro pájenou součást – union

| Alloy designation | | Si [%] | Fe [%] | Cu [%] | Mn [%] | Mg [%] | Cr [%] | Ni [%] | Zn [%] | Ti [%] | Ga [%] | V [%] | Remarks [%] | Others Each | Others Total | Aluminium min. [%] |
|-------------------|------------------|----------|-----------|-----------|--------|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|-------|----------------|-------------|--------------|--------------------|
| Numerical | Chemical Symbols | | | | | | | | | | | | | | | |
| EN AW-6060 | EN AW-Al MgSi | 0.30-0.6 | 0.10-0.30 | 0.10 | 0.10 | 0.35-0.6 | 0.05 | - | 0.15 | - | - | - | - | 0,05 | 0,15 | Remainder |
| EN AW-6061 | EN AW-Al Mg1SiCu | 0.40-0.8 | 0.7 | 0.15-0.40 | 0.15 | 0.8-1.2 | 0.04-0.35 | - | 0.25 | - | - | - | - | 0,05 | 0,15 | Remainder |
| EN AW-6061A | EN AW-Al Mg1SiCu | 0.40-0.8 | 0.7 | 0.15-0.40 | 0.15 | 0.8-1.2 | 0.04-0.35 | - | 0.25 | - | - | - | 0,003 max. Pb. | 0,05 | 0,15 | Remainder |
| EN AW-6063 | EN AW-Al Mg0,7Si | 0.20-0.6 | 0.35 | 0.10 | 0.10 | 0.45-0.9 | 0.10 | - | 0.10 | - | - | - | - | 0,05 | 0,15 | Remainder |

3.2.3 Chemické složení – pájecí drát (KSW-31R)

Složení: vnitřní složka: komplex tetrafluorohlinitan cesný

vnější složka: hliník, křemík

Tab. 3 Chemické složení pro pájecí drát

| Property | Value |
|----------------|---|
| Název složky | Tetrafluorohlinitan cesný – komplex (CsF/AIF ₃) |
| Obsah (%) | 26-35 (Cs) |
| Indexové číslo | - |
| Číslo CAS | 138577-01-2 |
| Číslo ES | 434-690-3 |
| | |
| Property | Value |
| Název složky | Hliník (prášek, stabilizovaný) |
| Obsah (%) | 87-89 |
| Indexové číslo | 013-002-00-1 |
| Číslo CAS | 7429-90-5 |
| Číslo ES | 231-072-3 |

3.3 Nastavení stroje a teplotní profil

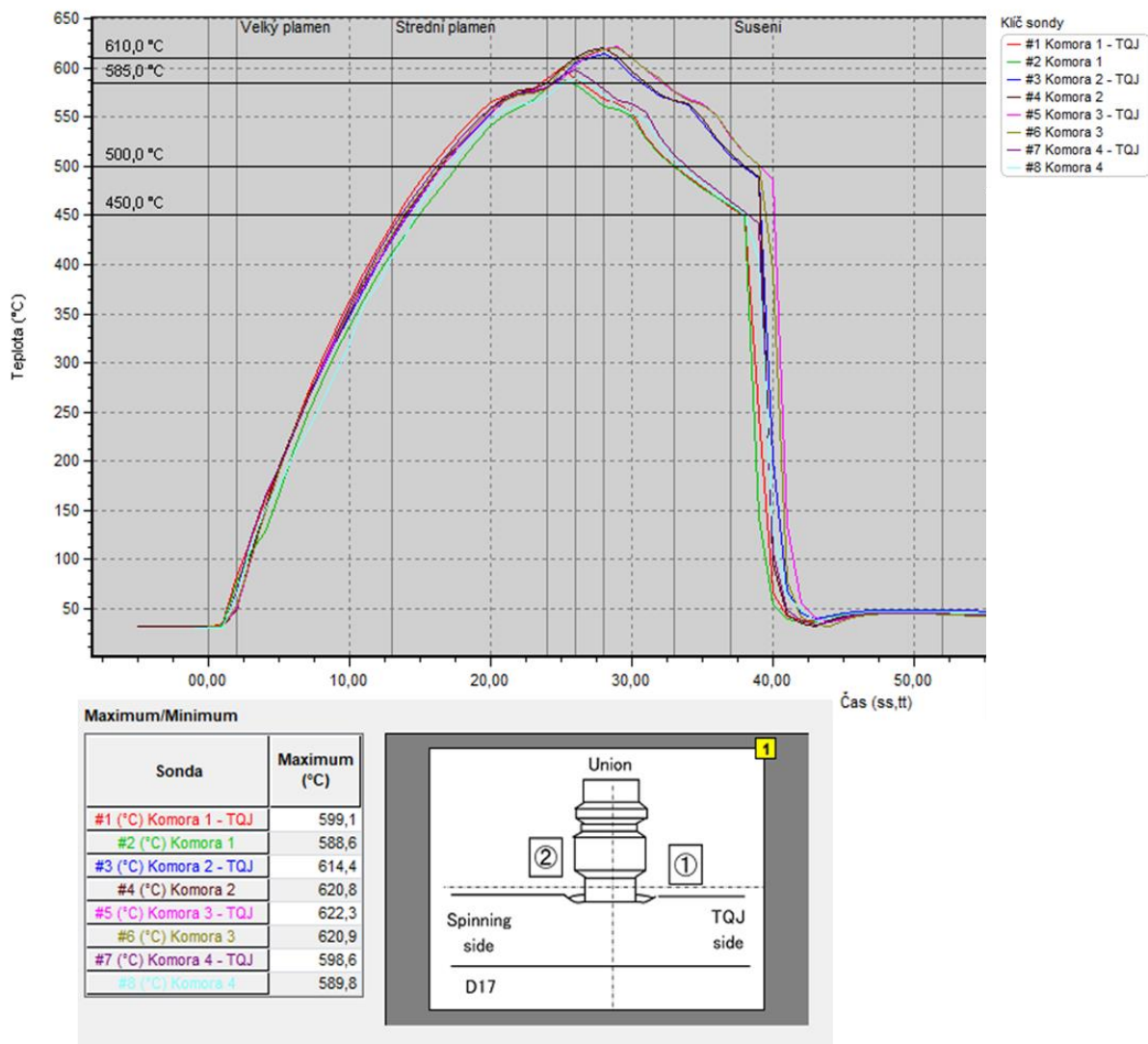
Tab. 4 Nastavení směsi pro jednotlivé hnízda pájecího karuselu

| Nastavení | | čas | | | | Mass flow | | | |
|-----------|-----------------|-----------|------|------------|-----|-----------|-------|------------|-------|
| | | | | | | union (1) | | trubka (2) | |
| KOMORA | plamen | union (1) | +/- | trubka (2) | +/- | GAS | AIR | GAS | AIR |
| 1. | velký plamen | 13,2 | 0 | 13,9 | 0 | 4,00 | 31,10 | 4,40 | 33,40 |
| | stře dní plamen | 9 | 0 | 9,4 | 0 | 3,80 | 29,95 | 4,35 | 31,50 |
| | nízký plamen | - | - | - | - | 3,00 | 26,50 | 3,30 | 27,00 |
| 2. | velký plamen | 13,2 | -0,3 | 13,9 | 0 | 4,00 | 31,10 | 4,40 | 33,40 |
| | stře dní plamen | 9 | 0,5 | 9,4 | 0 | 3,80 | 29,95 | 4,35 | 31,50 |
| | nízký plamen | - | - | - | - | 3,00 | 26,50 | 3,30 | 27,00 |
| 3. | velký plamen | 13,2 | 0,1 | 13,9 | 0,4 | 4,00 | 31,10 | 4,40 | 33,40 |
| | stře dní plamen | 9 | 0,2 | 9,4 | 0,4 | 3,90 | 29,95 | 4,35 | 31,50 |
| | nízký plamen | - | - | - | - | 3,00 | 26,50 | 3,30 | 27,00 |
| 4. | velký plamen | 13,2 | 0 | 13,9 | 0,1 | 4,05 | 31,10 | 4,40 | 33,40 |
| | stře dní plamen | 9 | 0 | 9,4 | 0,1 | 3,95 | 29,95 | 4,35 | 31,50 |
| | nízký plamen | - | - | - | - | 3,00 | 26,50 | 3,30 | 27,00 |

| | |
|-------------------|-----|
| Pozice oscilace | 208 |
| Offset oscilace | 6 |
| Rychlost oscilace | 115 |
| Water shot | 11 |



Obr. 3.3 Pájecí hořáky uvnitř pájecího karuselu



Obr. 3.4 Teplotní profil (graf) pro všechny hnízda pájecího karuselu

Nastavení stroje se provádí pouze pomocí vypsanych hodnot dle tab. 4, hodnoty se upravují dle firemních směrnic a požadavků zákazníka, pro ověření správného nastavení se provádí měření teplotního profilu, který můžete vidět na obr. 3.4. Pokud je potřeba upravit nastavení, v důsledku špatného pájení nebo vizuálního stavu pájené oblasti, upravují se pouze hodnoty časové, tedy je to zde hlavní nastavovací parametr, kterým se následně upravuje průběh pájení, který můžeme vidět znovu na obr. 3.4. Ostatní hodnoty se neupravují, ty určují výhřevnost plamene, které by měli být na stále stejné úrovni, tvoří tzv. velký nebo střední plamen, kdy se zde mění poměr vzduchu a zemního plynu. Pravidelně se sleduje vizuální stav pájeného spoje, podle kterého se nastavují časové hodnoty pájení jednotlivých hořáků (Obr. 3.3). Např. pokud se uniony napalují, sníží se čas na středním plamenu a docílí se nižší maximální teploty, kterou dosáhneme v místě pájeného spoje. Pravidelně se také měří teplotní profil, aby se kontroloval stav stability pájecího cyklu, kontrola pozice hořáků a také upnutí pájené součásti.

3.4 Provedení experimentální části

Pájení v našem případě je automatizovaný proces, řízený předpisy a specifikacemi dané firmy, nikoli striktně dle normy ČSN EN 13134. Tento přístup umožňuje pružně reagovat na specifické požadavky a optimalizovat proces pájení pro danou aplikaci. V první fázi je provedena vizuální kontrola, která zahrnuje posouzení napálení (tepelné ovlivnění pájeného spoje) a následně vizuálně viditelné vady, jako jsou praskliny, trhliny, díry.

Důraz je kladen na vizuální kontrolu, nikoliv na mechanické vlastnosti dosažené po pájení. Dosažení požadované tvrdosti spoje, což je klíčový atribut pro funkčnost a dlouhodobou odolnost výrobku, která je zde dosažena. K ověření kvality spoje jsou prováděny makroskopické a mikroskopické zkoušky, které odhalují případné vady v pájce a strukturní nehomogenity. Mikro a makrostruktura spoje jsou dále hodnoceny v kontextu jejich vlivu na mechanické vlastnosti, zejména tvrdost. Kterou jsme prováděli na hlavním závitu, ten zde hraje hlavní roli po pájeném spoji, který byl ověřen již zmiňovaným héliovým testem, který odhalí jakýkoliv únik, pomocí napuštění helia a jeho natlakování do zkoušeného systému.

Finální analýza struktury je prováděna pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM), což umožňuje detailní pohled na mikrostrukturu spoje a zjištění, zda odpovídá očekávaným výsledkům a předpokladům z předešlých testů. Výsledky SEM analýzy jsou doplněny EDS analýzou pro přesnější chemické složení a distribuci prvků v spoji.

Tento komplexní přístup k hodnocení kvality pájených spojů zajišťuje, že výsledné produkty splňují vysoké standardy a specifikace vyžadované firmou nebo zákazníkem, kdy se snažíme vyhodnotit vizuální vadu, která má negativní vliv jak na vizuální stránku produktu, ale také na stránku mechanických vlastností. Chceme docílit výsledku, kdy buď potvrdíme či vyvrátíme, danou problematiku vizuální změny unionu (napálení) a to, že to má pouze za důsledek vizuální změnu vzhledu nebo společně s tím, výraznou změnu mechanických vlastností unionu (včetně hlavního závitu), který by mohl být natolik ovlivněn, aby mohl zamezit funkčnosti ventilku (plnění média a udržení tlaku v soustavě).

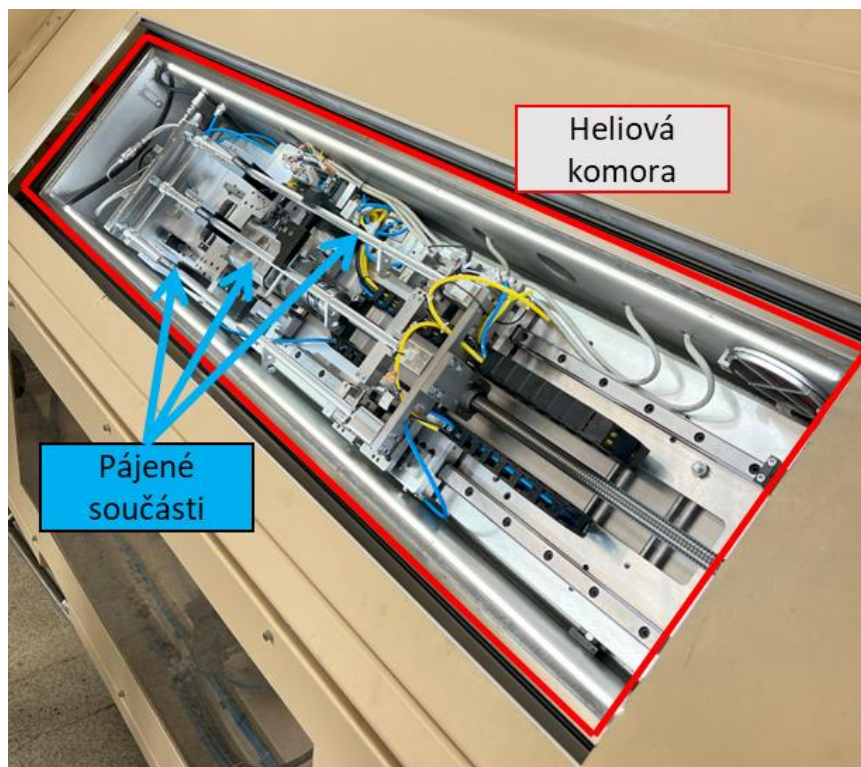
Postup, který jsme zde aplikovali, byl proveden dle následujících kroků:

- 1) Héliový test a vizuální kontrola stavu pájeného spoje.
- 2) CT sken a SEM metoda na povrchu součástí.
- 3) Příprava vzorků pro měření mikrotvrdosti (rozříznutí, broušení, leštění, ...).
- 4) Měření mikrotvrdosti, SEM metoda.

3.4.1 Hélioový test

V tomto případě byl využit héliový test, který byl proveden ve firmě Y. Postup při této zkoušce zahrnuje čistotu a utěsnění daného dílu, který musí být proveden správně, aby nedošlo k únikům v jiné části, než je pájený spoj, poté by došlo ke zkresleným výsledkům. Tuto chybu však lze snadno odhalit, kdy ve většině případech dochází k velkým únikům a test je předčasně ukončen, vlivem velkého úniku helia nebo vzduchu, který se používá v první fázi testování, pro kontrolu hrubých netěsností, až poté se systém napouští héliem. Před aplikací helia se obvykle provede test s využitím vzduchu nebo jiného neškodného plynu k zjištění hrubých netěsností. Tento krok pomáhá rychle identifikovat velké uniky, které by mohly způsobit rychlé vyprázdnění helia a tím pádem zbytečné zvýšení nákladů spojené s jeho používáním.

Proces probíhá vložením utěsněného dílu do komory (Obr. 3.5), kde je vytvořeno vakuum (vysoké vakuum, které dosahuje hodnot $10^{-1} \dots 10^{-5}$ Pa). V první fázi, která je většinou označována jako test hrubých netěsností, je díl natlakován vzduchem, pro odhalení hrubých netěsností, následně je vzduch odsán (vakuovou pumpou) a probíhá hlavní test, pomocí napuštění helia do dílu, který má za úkol odhalit jemnější uniky, díky velikosti molekuly helia, která je mnohonásobně menší než molekula vzduchu. Možné uniky jsou zde detekovány hmotnostními spektrometry, které jsou osazeny tzv. snifferem, který má za úkol detekovat uniky helia.

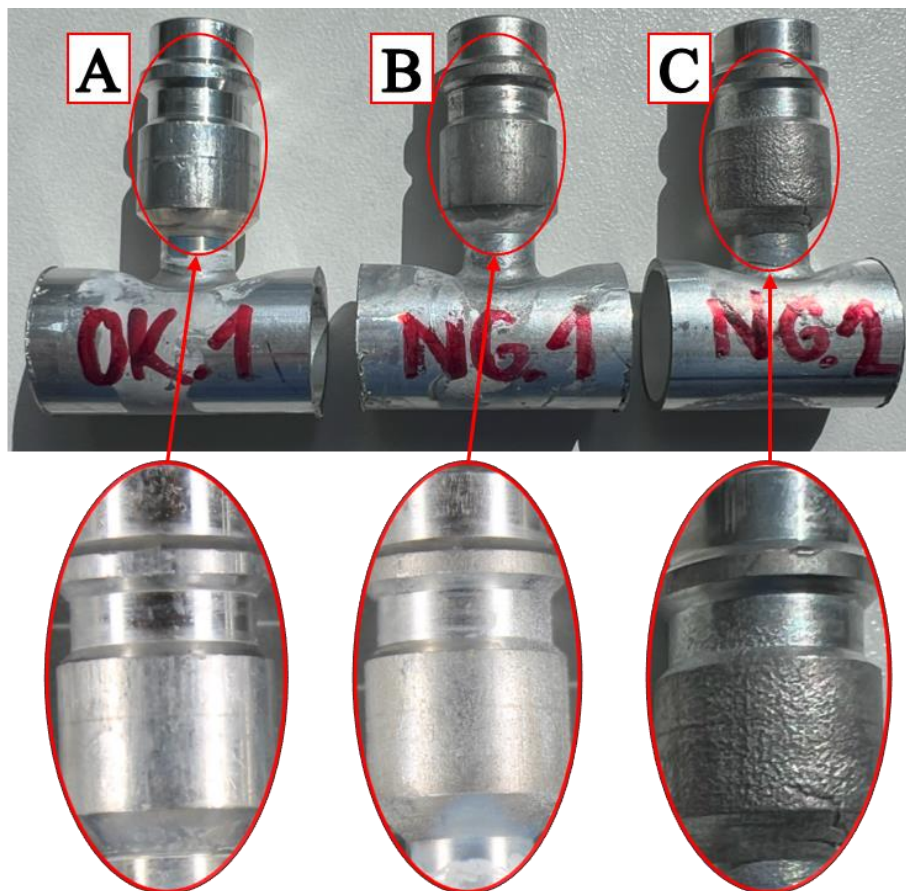


Obr. 3.5 Heliová komora obsahující testované díly

3.4.2 Vizuální kontrola

Tato metoda následuje po heliovém testu, který by měl zajistit odhalení netěsnosti pájeného spoje. Po metodě pájení může vznikat na povrchu pájeného spoje povlak tavidla, který musí být odstraněn, pro správné posouzení pájeného spoje. Můžou se zde vyskytovat povrchové vady, které člověk ve většině případů dokáže identifikovat a vyhodnotit, jako nepřijatelné či nevyhovující, dle určité směrnice nebo nastavených pravidel pro danou operaci (ve firmách např. katalogy vad, které určují hranice pro dobrý (OK) a špatný kus (NG)).

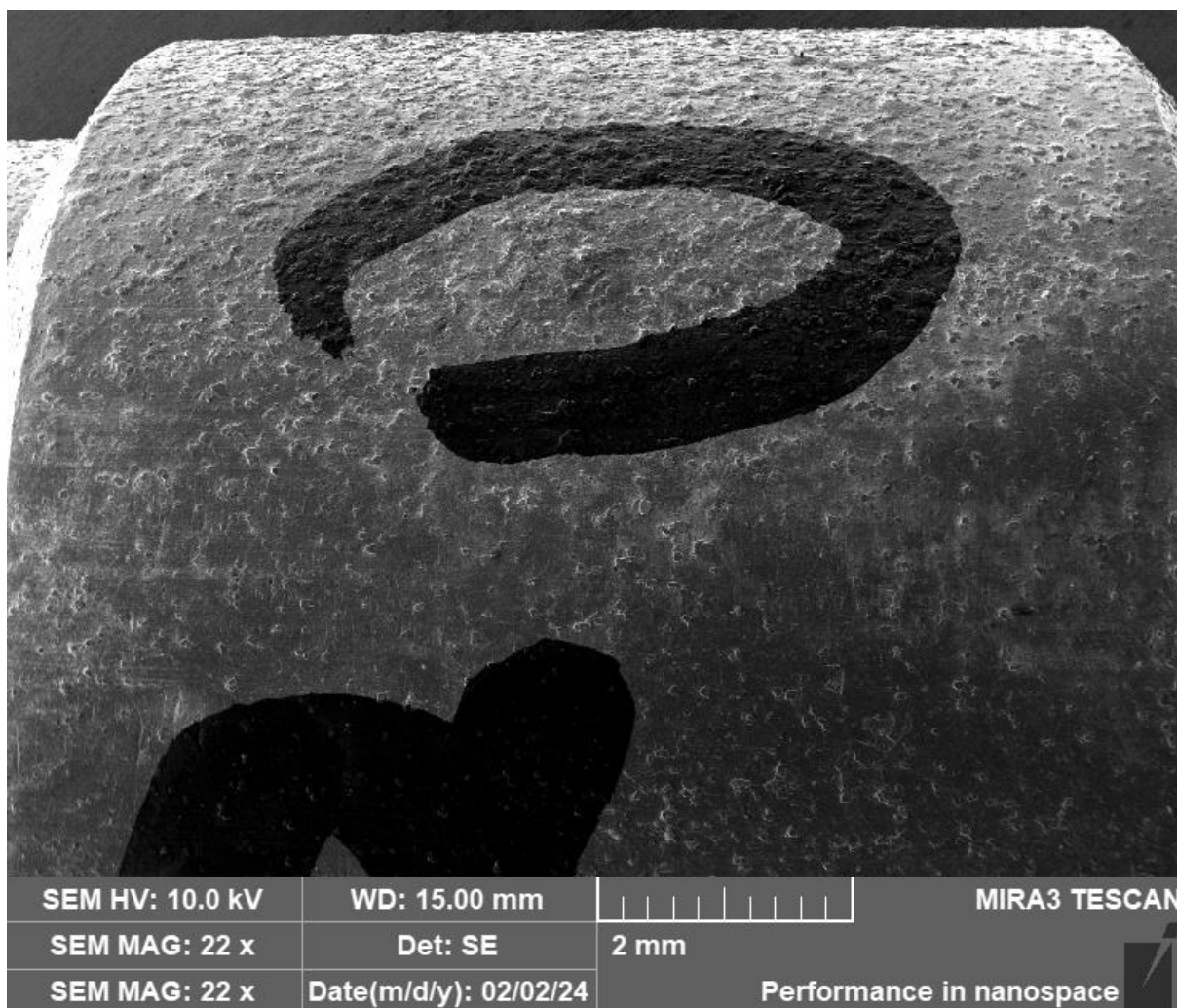
V našem případě vzorky byly bez větších vizuálních vad, které by mohly ovlivnit funkci či vznik potencionálních problémů. Zkoumali jsme jak vzorky, které jsou v pořádku, tak i vzorky, které byly více ovlivněny tepelným účinkem, to mělo za následek napálení unionu, který následně změnil barvu (zlatavá až nahnědlá barva) a došlo k narušení materiálu unionu, vznik tzv. krupičky na povrchu (Obr. 3.6–a, b). U některých došlo i k změně povrchu, na hlavní části unionu, v tomto případě se jedná o závit, který musí zajistit těsnost a funkci pro doplnění a udržení média v systému. Na obr. 3.6 vzorek C, můžeme vidět úplné spálení unionu, kde můžeme rovnou tvrdit NG kus, díky vrchní prasklině na unionu (nebyl tento vzorek hodnocen).



Obr. 3.6 Příklady vizuální vady (napálení), a) OK kus, b) NG kus (napálení nebo tzv. krupička) a c) NG kus (úplná změna povrchu a povrchová prasklina unionu)

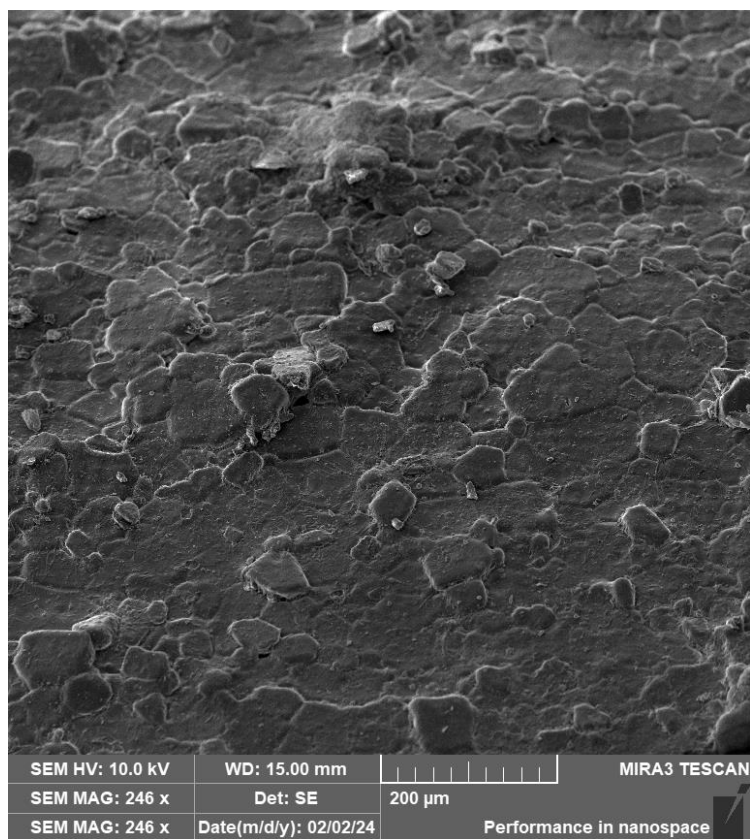
3.5 Vyhodnocení SEM a EDS analýzy povrchové vrstvy

V tomto vyhodnocení se soustředíme na dvě klíčové analýzy, jak již napovídá název. Nejdříve byla provedena analýza obrazů získaných pomocí elektronového mikroskopu. Poté následovalo podrobné zkoumání domněnek týkajících obrazů z elektronového mikroskopu, které podpoříme chemickou mikroanalýzou. Analyzované oblasti zahrnují oblasti napálení, především se zde budeme zabývat napálením unionu a všech věcí okolo toho.

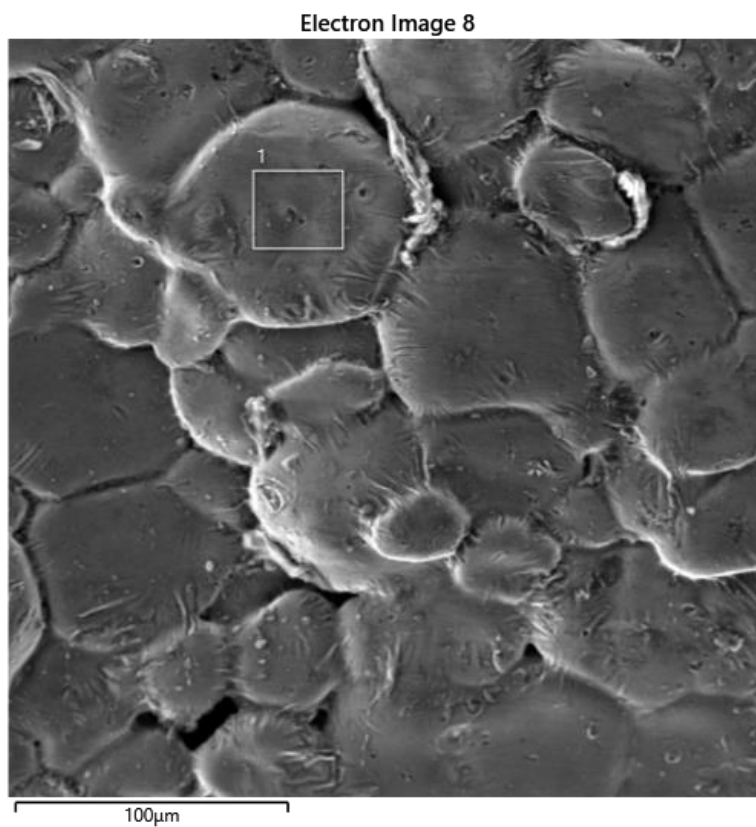


Obr. 3.7 Makrostruktura napáleného unionu (V1) a označená zkoumaná oblast, 22x zvětšení, SE

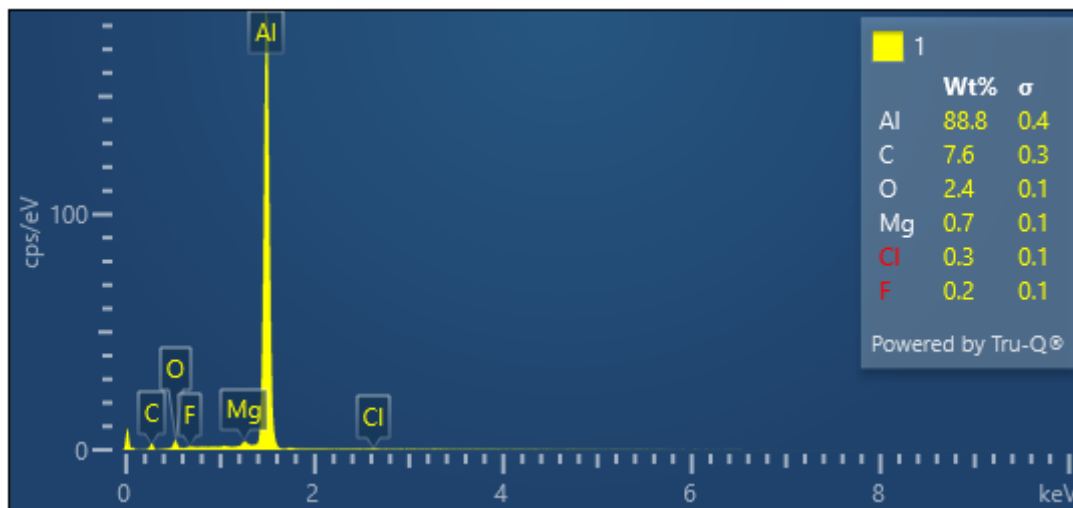
Obr. 3.7 byl pořízen před vyhotovením vzorku pro mikrotvrdot, tedy je to vzorek s označením V1. Jak můžeme vidět, jedná se o zřetelnou vizuální vadu, kterou doprovází zbarvení části unionu do zlatavé barvy (zlato-hnědá barva), z obrázku nelze poznat. Dle prvních odhadů, by se mělo jednat o pozůstatky pájecího drátu, které přilnuly k povrchu unionu a udělali tzv. krupičku na povrchu unionu. Proto jsme aplikovali metodu EDS analýzy pro detailnější chemický rozbor této oblasti.



Obr. 3.8 Makrostruktura napáleného unionu v označené oblasti, 246x zvětšení, SE



Obr. 3.9 Detailnější pohled na oblast napálené oblasti (krupečka)

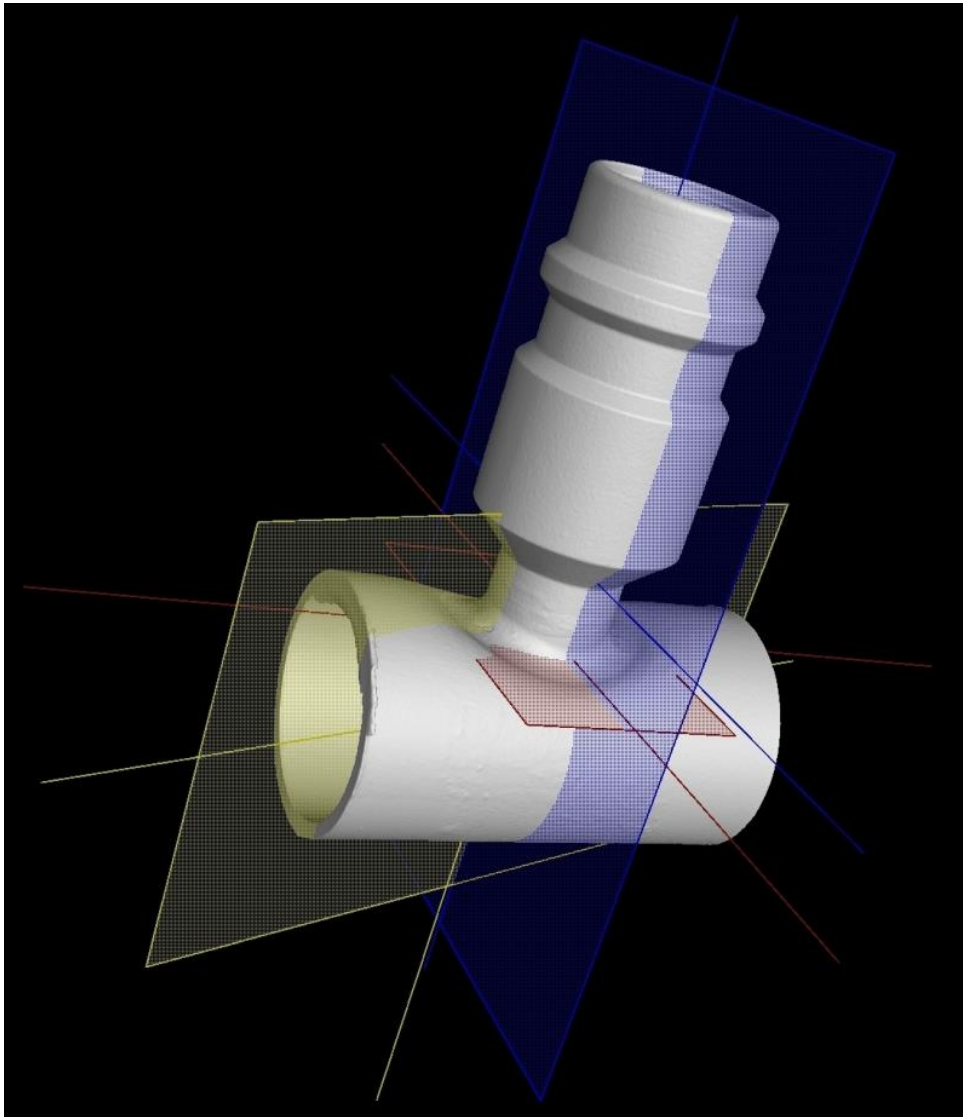


Obr. 3.10 EDS analýza – chemické složení prvků (%) krupičky na povrchu unionu

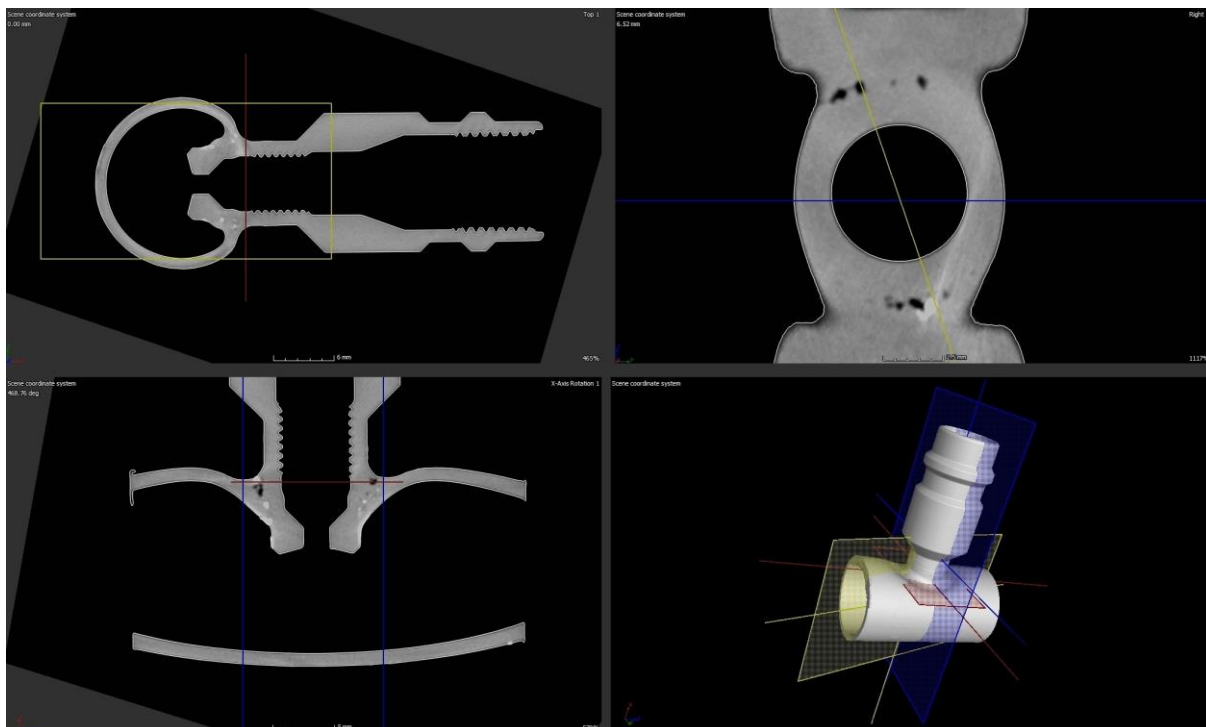
Z detailnější pohledu (Obr. 3.8 a 3.9) a chemické analýzy (Obr. 3.10) z oblasti napálení (krupičky), došlo k zjištění že krupičku na povrchu unionu, netvoří prvky a nemá za následek pájecí drát a jeho složení. Ale vznik napálení nebo tzv. krupičky na povrchu unionu, má za následek samotný materiál unionu. Dochází zde k tepelnému ovlivnění, které způsobí změnu struktury materiálu, jak uvnitř, tak i na povrchu unionu. Z teplotního profilu (grafu) viz obr. 3.4, můžeme vidět že teplota v některých komorách, přesáhla hodnotu 615 °C. Tedy teplota materiálu přechodně překročí teplotu tání, která se pohybuje mezi 615 až 655 °C a má za následek, že povrchová vrstva materiálu se částečně rozpustí a rychle ztuhne, což vede k vytvoření hrubého a porézního povrchu (Obr. 3.7).

3.6 Metoda výpočetní tomografie (CT) – pájený spoj

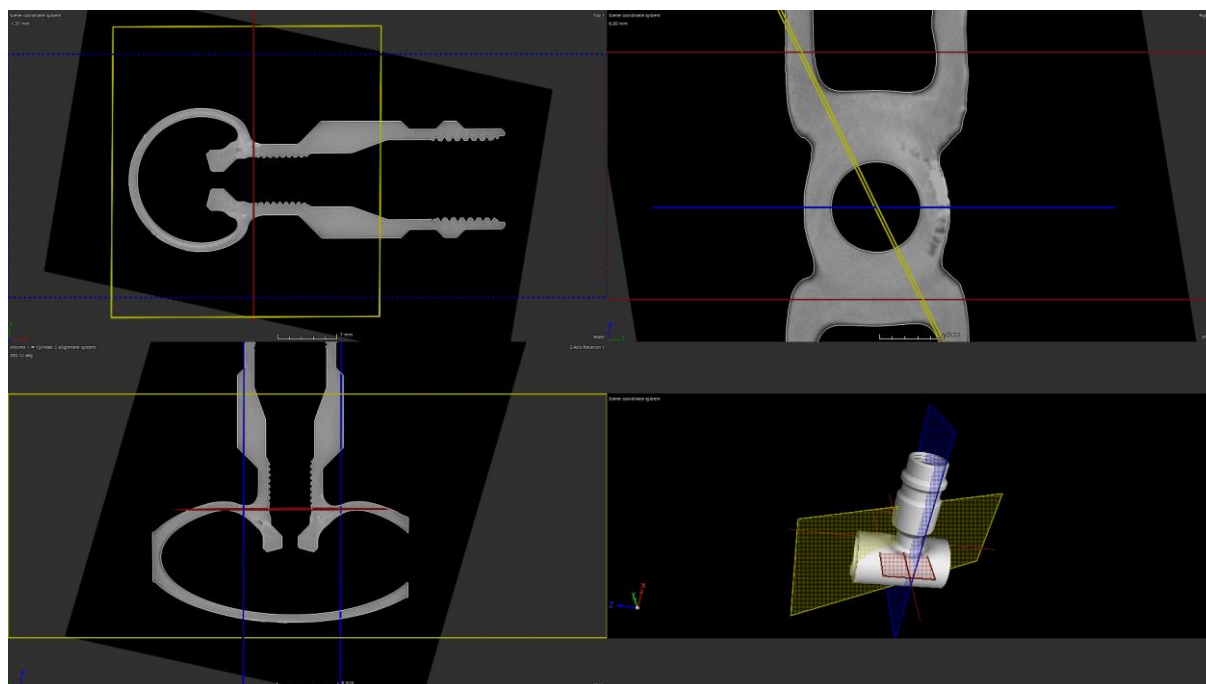
Pro komplexní kontrolu pájeného spoje jsme použili metodiku výpočetní tomografie (Obr. 3.11), díky které můžeme vidět vnitřní vady v pájeném spoji. Byla provedena před přípravou vzorků na měření mikrotvrdomosti. Pro běžnou kontrolu pájených spojů se tato metodika nevyužívá kvůli nákladnosti této metody. Namísto toho se používá makroskopické zkoumání pájeného spoje. Pro lepší viditelnost se vzorky nechávají naleptat, pokud je to potřeba. V případě výpočetní tomografie nedojde k destruktivní zkoušce, proto se tato metoda využívá u více náročných dílů, kde nechceme porušit daný díl a bylo by obtížné, v potřebné oblasti provést oddělení materiálu pro vyhotovené mikroskopické zkoušky. Také mezi velké výhody patří flexibilita zobrazení součásti, zobrazení jakékoliv roviny či řezu příslušným dílem oproti makroskopické metoě, kde použijeme mikroskop s omezeným přiblížením, rozsahem a zkoumaná je pouze část, ve které je řez proveden.



Obr. 3.11 Výpočetní tomografie – zobrazení použitých rovin pro vzorek OK01



Obr. 3.13 Výpočetní tomografie – vzorek OK01

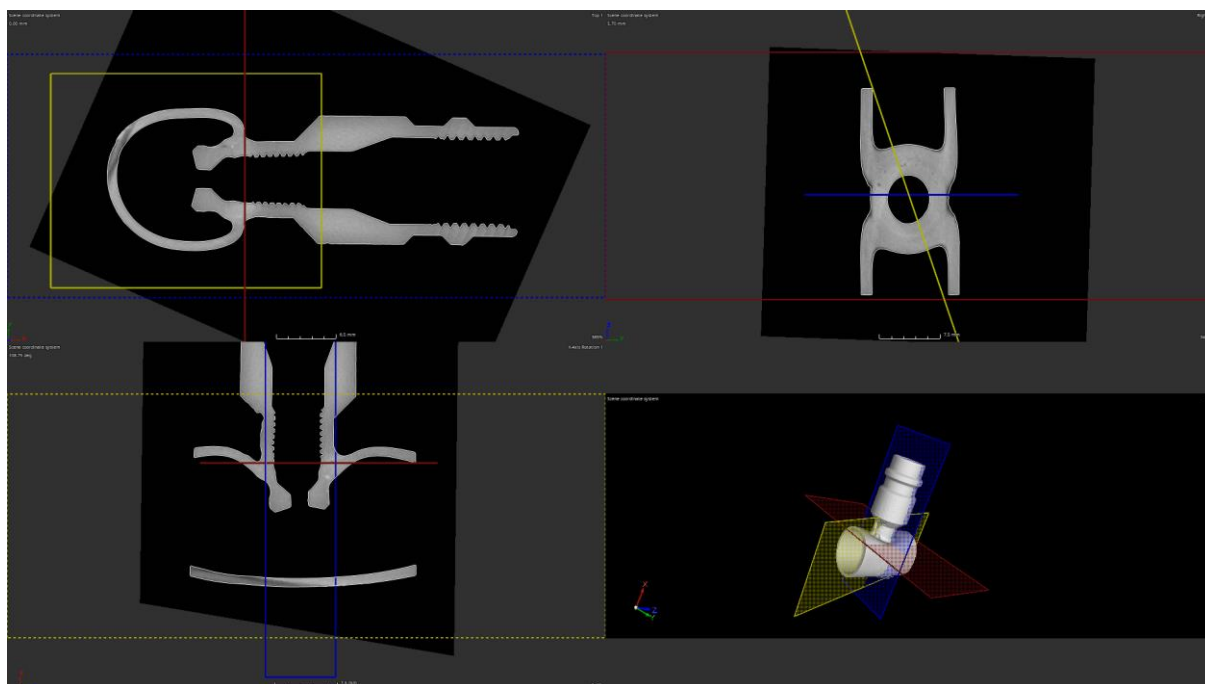


Obr. 3.12 Výpočetní tomografie – vzorek NG01

Při porovnání scanů z CT metody (Obr. 3.12 a 3.13) můžeme vidět rozdíly mezi OK a NG kusem pájené součásti, kde ve vzorku OK kusu se nacházejí vnitřní vady, které můžeme definovat jako díry, vměstky nebo také praskliny. Naproti tomu při NG kusu nejsou přítomny v tak velké míře, ale stále se zde také vyskytují.

Kdybychom hodnotili tyto scany, které nám umožní kompletní nahlédnutí do vnitřní struktury, pájené spoje by neprošly v důsledku nalezení vnitřních vad, které jsou nepřijatelné.

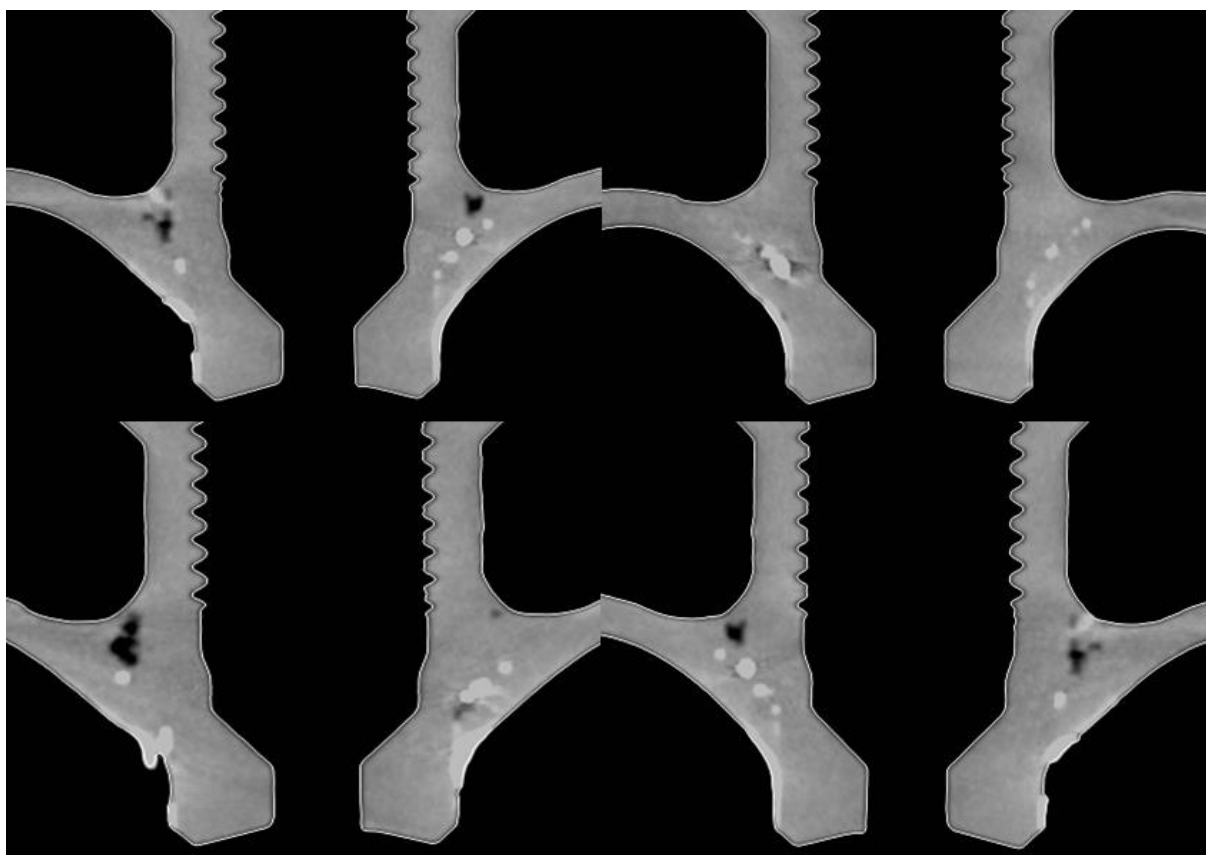
Jelikož tyto díly prošly heliovým testem, který neukázal žádný únik, tedy pájený spoj zaručí nepropustnost heliové molekuly. Proto je pájený spoj uznán, jako správný (vyhovující) dle heliové kontroly. Při kontrole pomocí metody mikroskopie, kdy příslušný vzorek je rozříznut na dvě poloviny a následně vybroušen, vyleštěn, tak nedokážeme v některých případech odhalit tyto vnitřní vady. Pokud jsou vady nalezeny stále zde hraje pravidlo vnitřní směrnice firmy, která do určité míry povoluje vnitřní vady, pokud tyto vady v součtu přesáhnou danou míru, je pájený díl považován za nevyhovující, tedy NG kus. Bohužel se nedá každý pájený kus testovat tímto způsobem, tedy destruktivní zkouškou, díky které vidíme část pájeného spoje, ale pouze v náhodně zvoleném řezu, který provedeme při přípravě vzorku pro dokončovací operace. Proto se uvolňují pájené spoje ve více kusech, pokud tyto vzorky splňují firemní směrnice, jsou považovány za OK kusy, ale jen tehdy pokud projdou heliovým testem. Heliový test zde zaujímá hlavní kontrolu pro určení OK a NG kusu, poté následuje test pomocí metody mikroskopie.



Obr. 3.14 Výpočetní tomografie – vzorek NG02

Metoda CT je v tomto případě výborným pomocníkem, ale bohužel z důvodu vysokých nákladů není zahrnuta do běžné metodiky kontroly pájených spojů. Proto zde hlavní kontrolu zajišťuje heliový test, který vyhodnotí pouze OK a NG kus. Z dalšího obr. 3.14 můžeme vidět znovu lepší výsledky než u OK kusu (Obr. 3.12), ale v bližším prozkoumání všech rovin a natočení pájeného spoje, nalezneme také vnitřní vady ve formě děr, vměstků a prasklin.

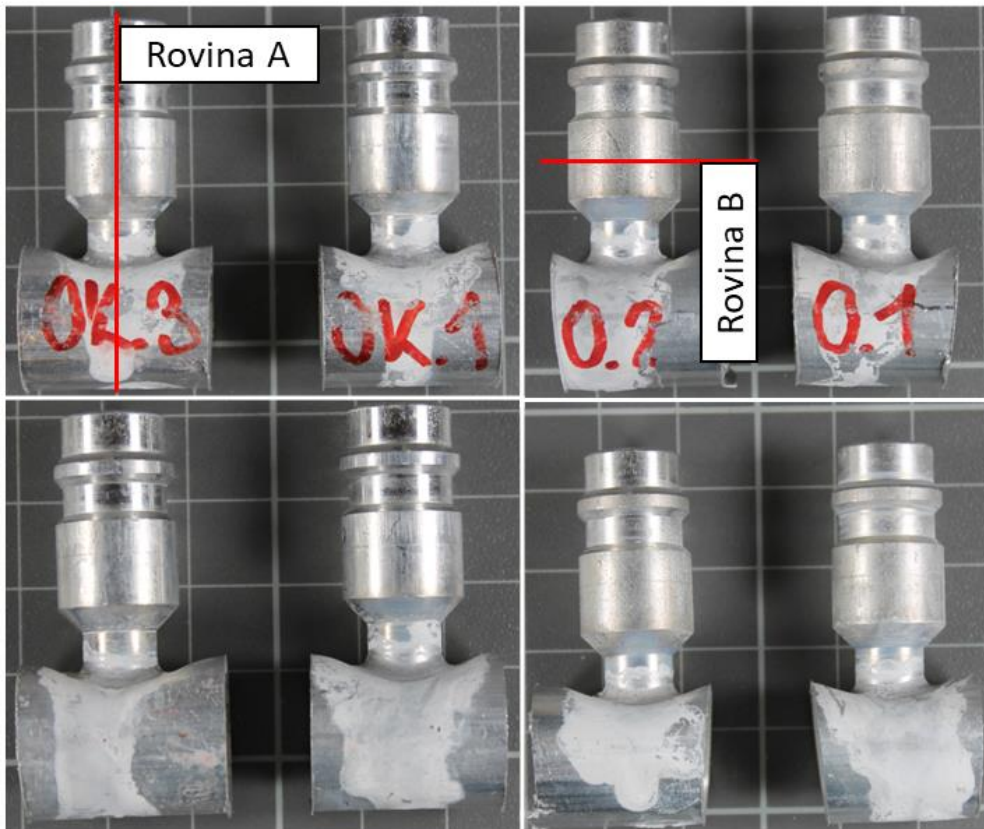
Pokud bychom hodnotili tyto vzorky pouze pomocí heliového testu a CT metody, tak bychom uznali tyto vzorky za NG všechny, protože nálezy vnitřních vad jsou poměrně velké (Obr. 3.15). Ale z firemního pohledu, kdy pájený spoj vyjde pomocí heliového testu jako OK a z pohledu vnitřních vad také, protože narazíme na pohled, který se při přípravě zvolil a dle firemních směrnic vychází, avšak nedokážeme úplně prozkoumat zbytek pájeného spoje, ale právě ten jeden daný pohled, který je ovlivněn přípravou vzorku. Proto tato metoda je určena spíše ke kontrole velkých a cenově dražších součástí, kdy si potřebuje být výrobce stoprocentně jistý se správností vyrobeného kusu.



Obr. 3.15 Výpočetní tomografie – detail vnitřních vad pro vzorek OK01

3.7 Příprava vzorků pro experiment

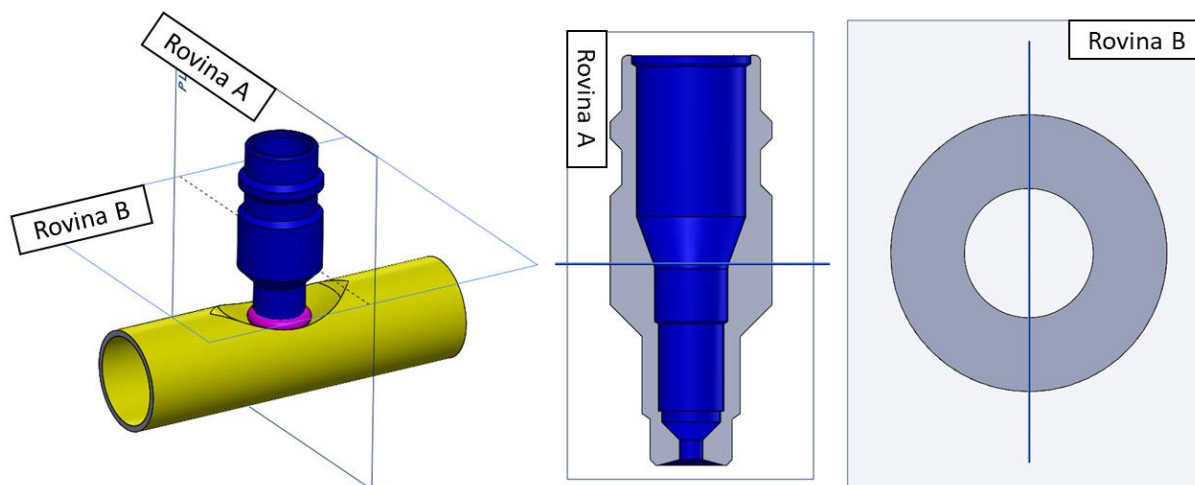
Vzorky pro testování jsou jen nepatrné části z celé soustavy klimatizace, vzorky byly proto připraveny pro vhodnou manipulaci, testování a správně označeny dle potřeb (Obr. 3.16). Pro přípravu a zhotovení těchto vzorků bylo použito několik strojů, které byly k tomu určeny pro zajištění co nejmenšího ovlivnění potřebné části vzorku. Většina vzorků byla tedy rozřezána, dle určených rovin (Obr. 3.17) na velmi přesné automatické pile Brillant 220 s diamantovým kotoučem viz obr. 3.18, která má dostatečnou podporu chlazení a kontinuální rychlost přísuvu stolu. Vzorky, které byly určeny pro test tvrdosti museli být v co nejlepší kondici a mít rovinnost, pro správné změření tvrdosti. Díky materiálu, který je v tomto případě velice měkký (slitina hliníku) se musely vzorky zalít do Dentacrylu, který tvrdne několik hodin namísto zalisování na lisu, který dokáže vzorek vytvořit již za několik minut, použitý lis Opal X-press, viz obr. 3.20.



Obr. 3.16 První fáze přípravy metalografických vzorků, na obrázku po pravé straně NG kusy s napálenou strukturou na unionu, na levé straně OK kusy

Vzorky pro metalografické výbrusy byly zalisovány v lisu Opal X-press do granulátu pryskyřice při působící teplotě 200 °C a tlaku 25 MPa. Tento způsob přípravy vzorků vykazoval nepřijatelné deformace vzorku a také hrozilo nebezpečí ovlivnění struktury vlivem vysoké působící teploty.

Z těchto důvodů byly všechny vzorky zality do Dentacrylu s následným postupným broušením a leštěním na přístroji Saphir 550 (Obr. 3.19).



Obr. 3.18 Schéma pro přípravu vzorků – rozříznutí vzorků dle určených rovin

Pro broušení byl zvolen automatický proces, kterým eliminujeme manuální nedostatky a pokusíme se docílit co nejlepšího výsledku. Pro dosažení hladkého a dokonale upraveného povrchu materiálu, byly použity čtyři typy brousících kotoučů. Díky špatným vlastnostem hliníku pro operaci broušení a leštění. První použitý kotouč měl hrubost P320, což umožnilo hrubé broušení povrchu. Druhý kotouč s hrubostí P600, zajistil středně jemné broušení. Finální broušení skoro leštění, bylo provedeno s využitím kotouče s hrubostí P1200 a P2000, na které byla aplikována 3 mikronová diamantová suspenze. Finální doleštění bylo provedeno s využitím kotouče z tkaniny, na který byla aplikována 1 až 3 mikronová korundová suspenze, což zaručilo vysoký lesk a dokonalou hladkost finálního povrchu materiálu.



Obr. 3.17 Přesná rozbrušovací pila Brillant 220 [35]

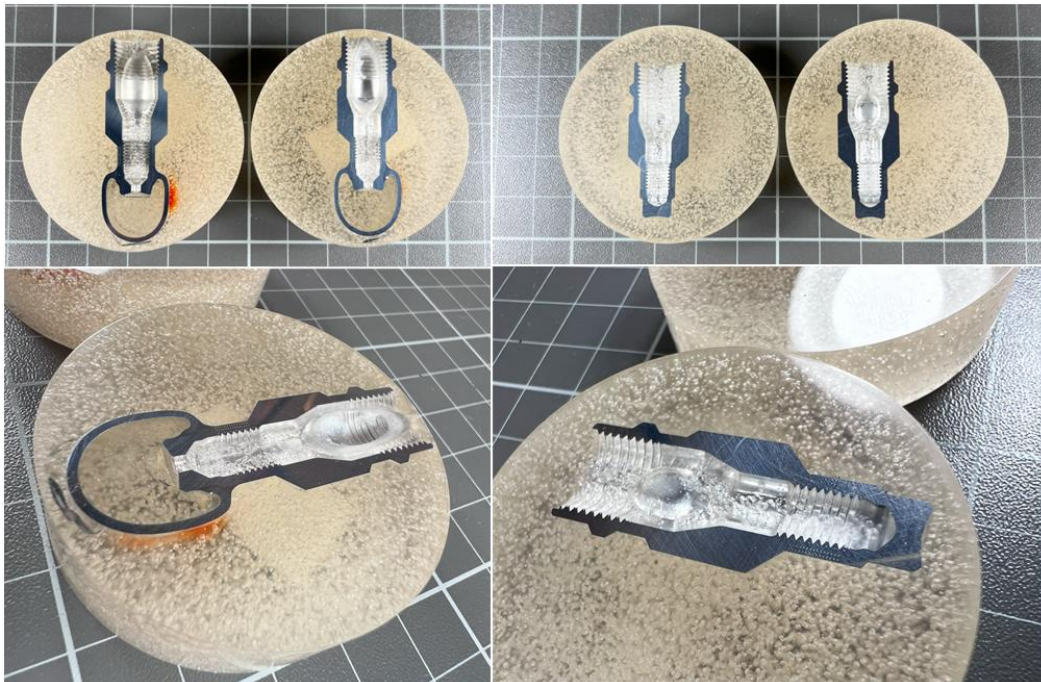


Obr. 3.20 Metalografický lis Opal X-press [36]



Obr. 3.19 Automatická bruska/leštička Saphir 550 [37]

Výslednou podobu vzorků pro měření mikrotvrlosti, můžete vidět na obr. 3.21 tyto vzorky jsou po všech dokončovacích operacích, jako je broušení a následné leštění.



Obr. 3.21 Výsledná fáze přípravy metalografických vzorků, na levé straně vzorky pájených spojů, na pravé straně obrázku zkoušené čisté uniony, které nebyly ovlivněny tepelným namáháním

3.8 Podmínky pro měření mikrotvrdosti

Měření: V této sekci popisují podmínky a metodiku měření použité v rámci diplomové práce. Cílem je zajistit reprodukovatelnost a validitu získaných výsledků.

Místo měření: Měření bylo provedeno v laboratoři Katedry strojírenské technologie na Technické univerzitě Liberec. Laboratoř byla vybrána pro svou technickou vybavenost a stabilní environmentální podmínky.

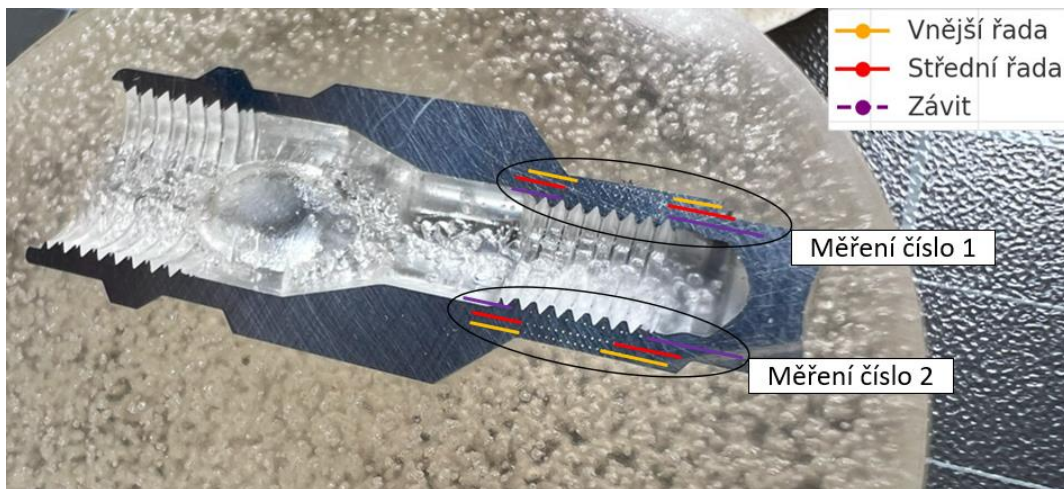
Měřicí přístroj: Pro měření byl použit Tvrdoměr a mikrotvrdoměr Qness Q 30 A.

Podmínky měření: Měření probíhalo při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 48 ± 5 %. Tyto podmínky byly udržovány konstantní během celého experimentu za pomoci klimatizačního zařízení, což minimalizuje vliv vnějších faktorů na výsledky měření

Použité normy: Měření bylo provedeno v souladu s ČSN EN ISO 6507.

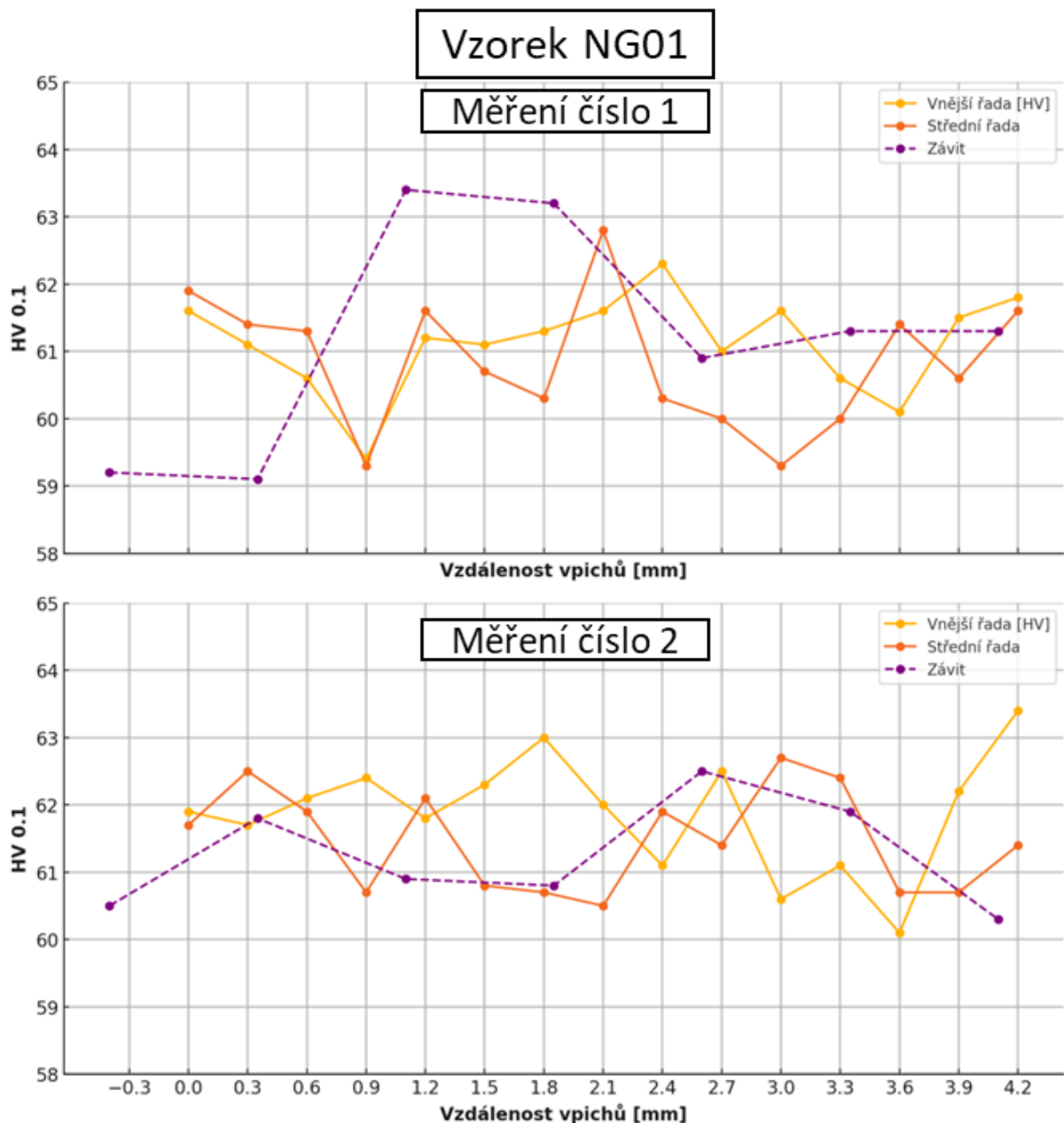
3.9 Měření a grafické znázornění mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti probíhalo na několika vzorcích, které byly připraveny dle potřeb. Vzorků bylo dohromady sedm, na každém vzorku byly provedeny dvě měření pro každou stranu rozříznutého vzorku jedno měření. Všechny naměřené hodnoty pro každý vzorek, jsou zaneseny do samostatného grafu a číselné hodnoty, můžete najít v příloze této práce. Metodika měření a rozmístění vpichů pro jednotlivé vzorky, jsou znázorněné na obr. 3.22. Mezi jednotlivými vpichy (rozestupy) pro vnější a střední řadu (vodorovný směr), byla zvolena hodnota 0,3 mm, dle požadavku normy ČSN EN ISO 6507, pro hliník (lehký kov).



Obr. 3.22 Rozmístění vpichů pro každý vzorek (union)

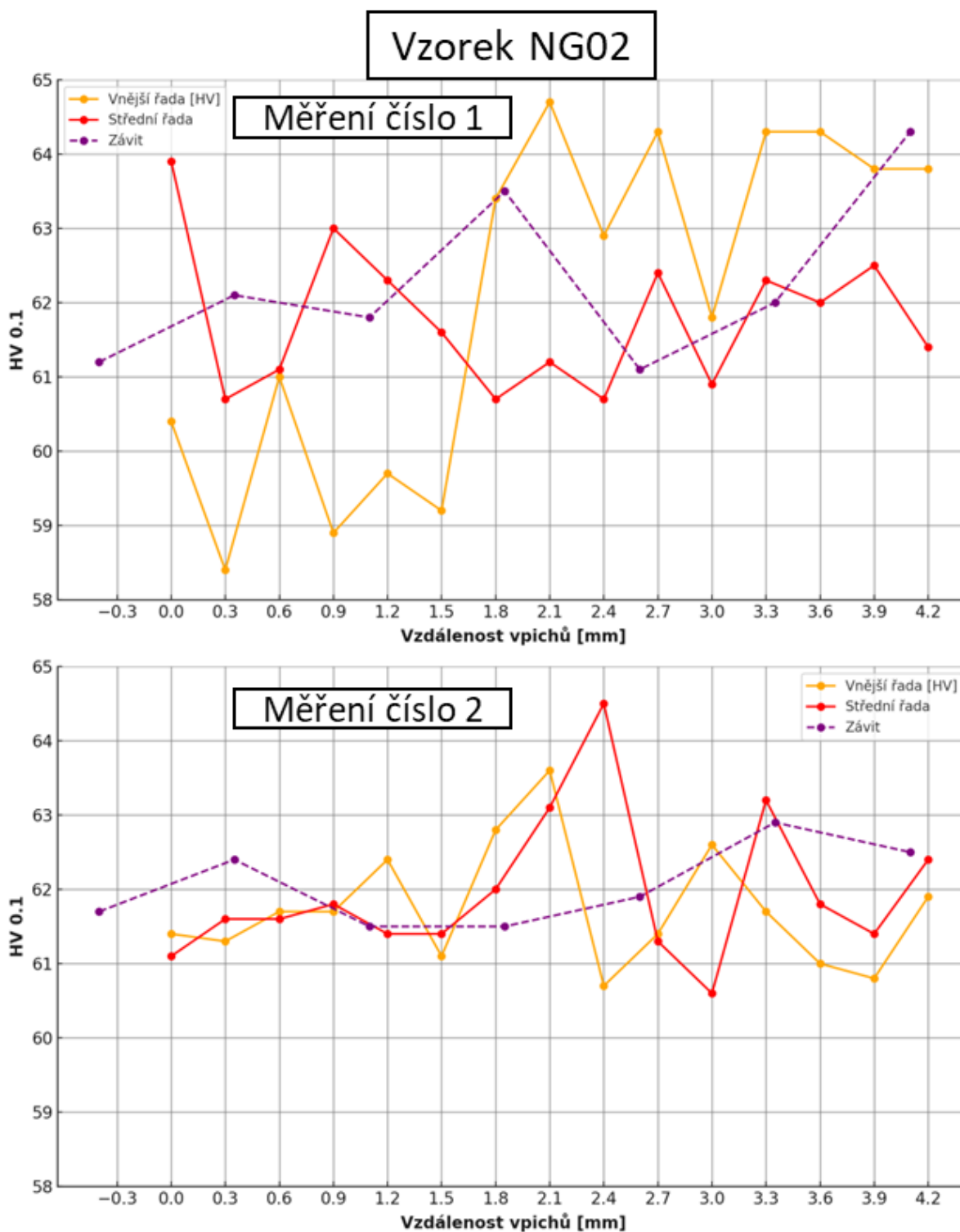
Pro řadu závitů byla použita hodnota stoupání závitů (0,75 mm), která splňuje minimální podmínku rozestupu 0,3 mm. Minimální rozestup mezi řadami ve směru svislém, je 0,3 mm dle normy ČSN EN ISO 65070 a první řada od okraje vzorku, má mít minimální rozestup pouze 0,15 mm, zvolena hodnota 0,2 mm od okraje vzorku. Mezi vnější a střední řadou byla zvolena hodnota 0,4 mm a pro poslední řadu závitů, byla zvolena hodnota rozestupu 0,5 mm pro dosažení optimální vzdálenosti pro jednotlivé závitů. Tyto hodnoty rozestupů, byly použity pro všechny testované vzorky společně s mikrotvrdostí HV 0,1 (100g).



Obr. 3.23 Závilost mikrotvrlosti jednotlivých řad na vzdálenosti vpichů pro vzorek NG01

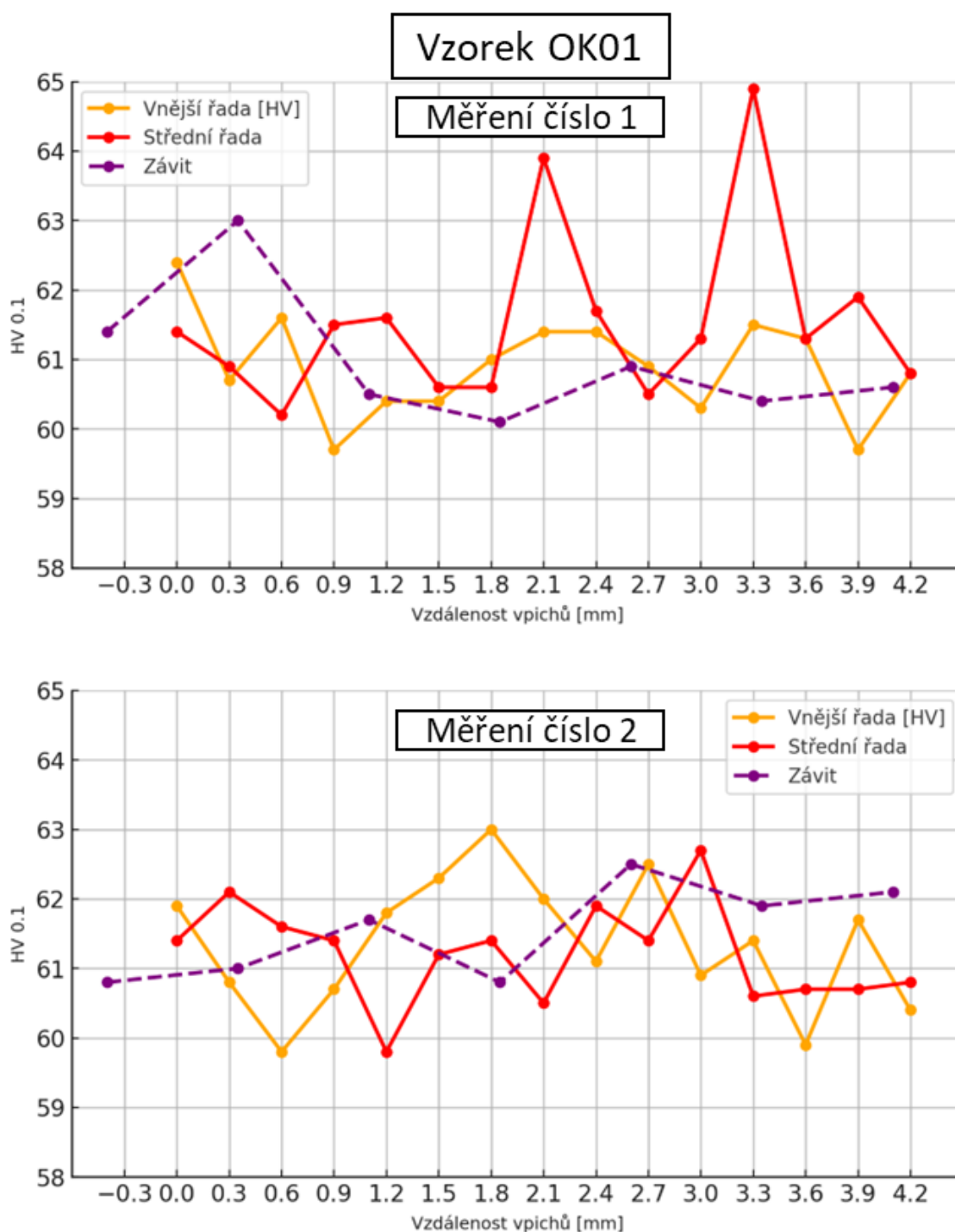
Pro porovnání naměřených hodnot mikrotvrlosti v oblasti hlavního závitu pro vzorky NG01 a NG02 použijeme OK kusy, tak i nezapájené kusy, které nebyly nijak ovlivněny tedy čistý union bez pájení (tepelného ovlivnění), které značíme Č1 a Č2. Na obr. 3.23 můžeme vidět závislost mikrotvrlosti jednotlivých řad pro vzorky NG01, NG02 (měření číslo 1 a 2). Z grafu můžeme usoudit, že hodnoty jsou velmi podobné až na malé rozdíly, které při měření takto měkkého kovu nelze považovat za markantní rozdíl. Všechny hodnoty jsou zaznamenány do celkové tab. 5, pro porovnání vypočtených průměrných hodnot s výběrovou směrodatnou odchylkou.

Podíváme se na vzorek NG02, který má také lehké rozdíly mezi jednotlivými řadami, ale není to nic, co by ukazovalo na nějakou větší změnu mikrotvrdosti v dané oblasti. Více toho uvidíme na porovnání všech vypočtených průměrných hodnot u všech vzorků.



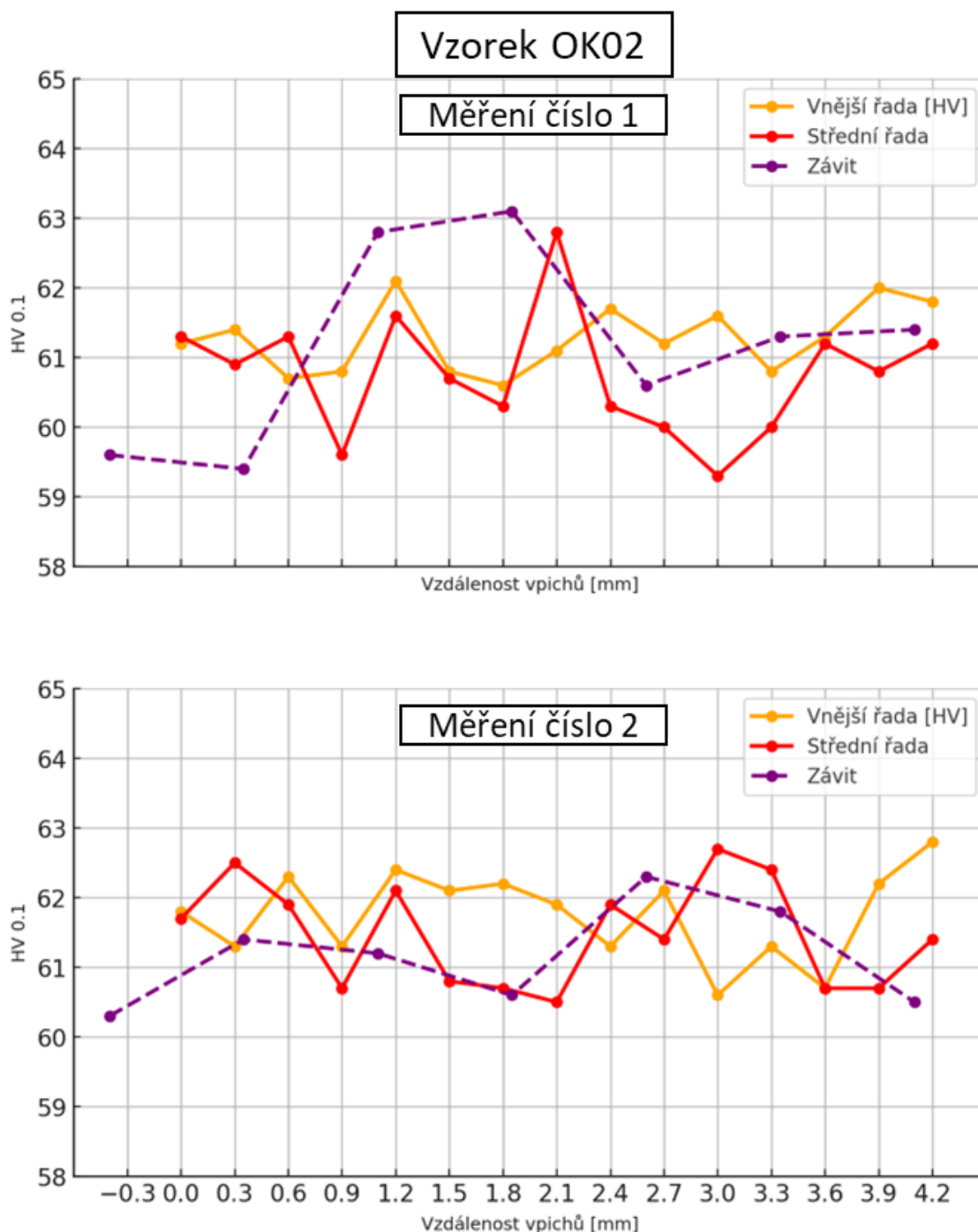
Obr. 3.24 Závislost mikrotvrdosti jednotlivých řad na vzdálenosti vpichů pro vzorek NG02

Vidíme u obou vzorků NG01 a NG02, že měření číslo 1 má hodnoty řad více rozdílné než u měření číslo 2. Tento rozdíl může být způsoben rozdílným působením hořáku, který v tomto případě ovlivňuje více jednu stranu unionu než druhou. Protože měření číslo 1 a 2, zastává roli jedné strany unionu a druhé strany unionu. Proto může být na jedné straně hořák blíže nebo také pod jiným úhlem, či jeho pozice je rozdílná vůči druhé straně. Zde hraje velkou roli nastavení těchto hořáků, protože dochází za velmi krátkých čas k zapájení dané součásti.



Obr. 3.25 Závislost mikrotvrlosti jednotlivých řad na vzdálenosti vpichů pro vzorek OK01

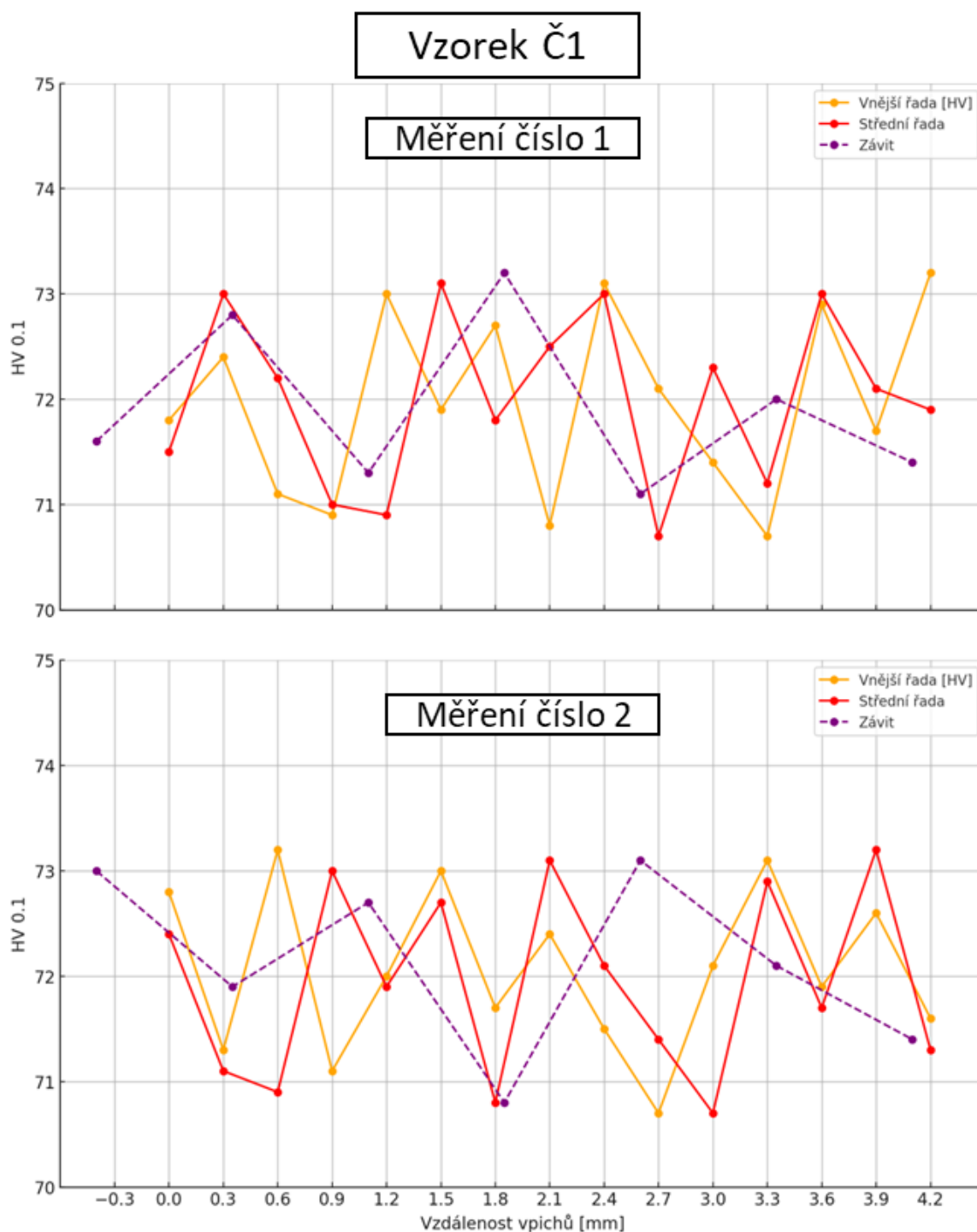
Je zde zredukován čas pájení a chlazení (celého cyklu), takže o polovinu oproti normálnímu cyklu pájení. Proto zde hraje roli každá desetina sekundy nebo již zmiňované nastavení hořáků. Tuto teorii zkusíme ověřit z dalších grafů závislosti a jejich hodnot.



Obr. 3.26 Závislost mikrotvrlosti jednotlivých řad na vzdálenosti vpichů pro vzorek OK02

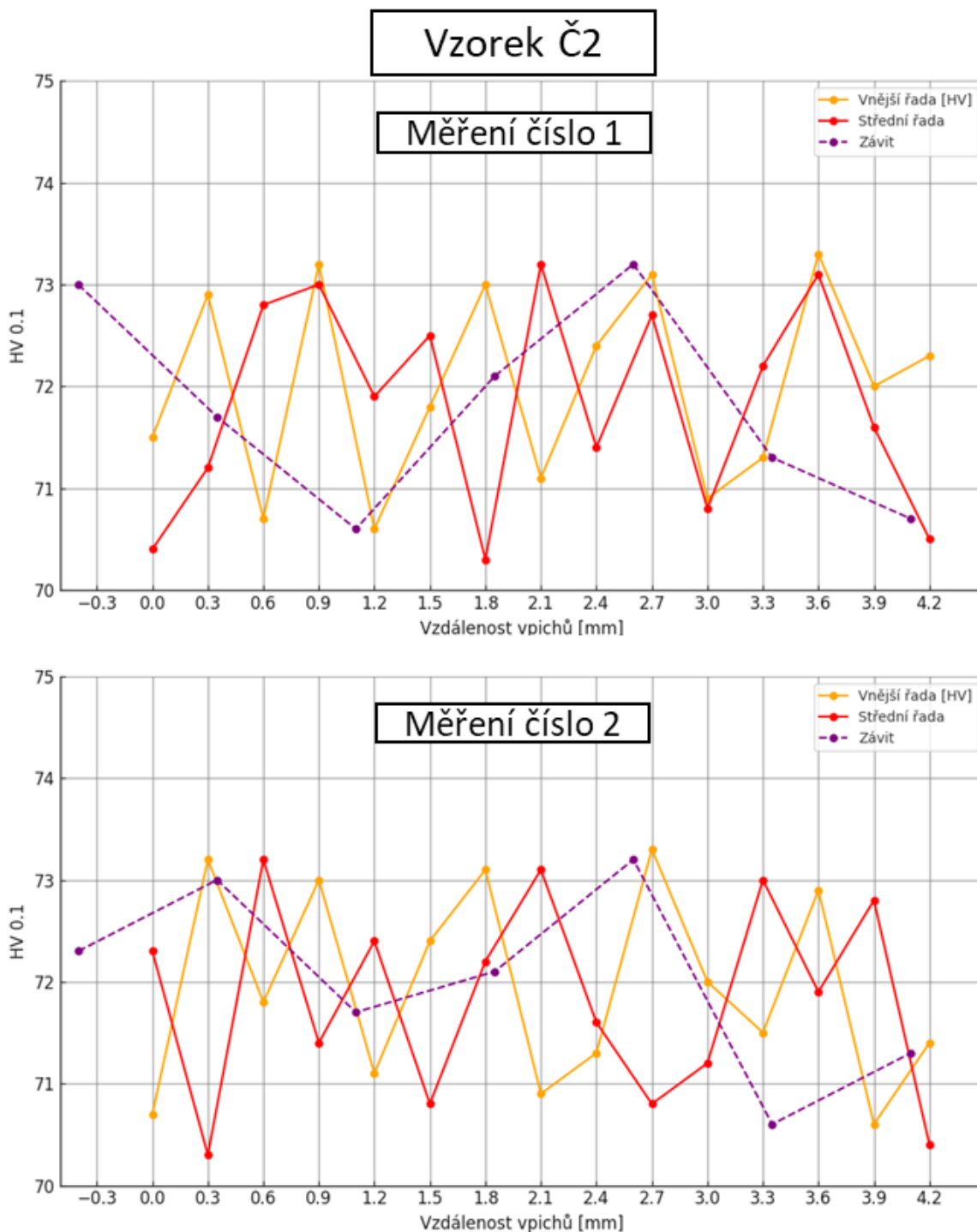
Mezi naměřenými hodnotami mikrotvrlosti u vzorků NG a OK si můžeme dle grafického znázornění povšimnout, že hodnoty vychází dost podobně až na menší odchylky, které jsou způsobeny měřením velice měkkého materiálu, který v této kategorii má pro hliník povolenou odchylku ± 5 HV pro HV 0,1, dle normy ČSN EN ISO 6507-1.

Stále můžeme pozorovat větší odchylku u hodnot mikrotvrlosti u měření číslo 1, může to být způsobeno několika faktory, které zde byly již zmíněny. Pro porovnání naměřených a vypočtených hodnot, proběhlo měření tvrdosti i na čistých unionech. Ty nám sloužily, jako vzorky pro hodnoty mikrotvrlosti materiálu EN AW-6063, který jsme mohli převzít z normy, ale pro přesnější porovnání, byly tyto hodnoty změřeny. Všechny hodnoty mikrotvrlosti byly zaneseny do stejných grafů, pro co nejlepší grafické znázornění a porovnání.

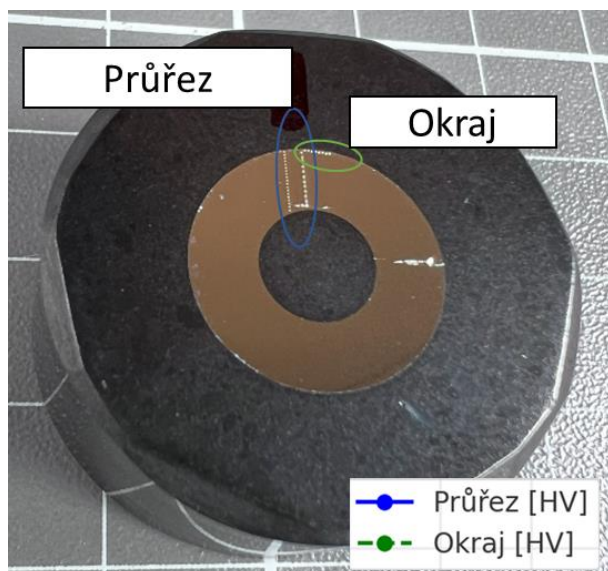


Obr. 3.27 Závislost mikrotvrlosti jednotlivých řad na vzdálenosti vpichů pro vzorek Č1

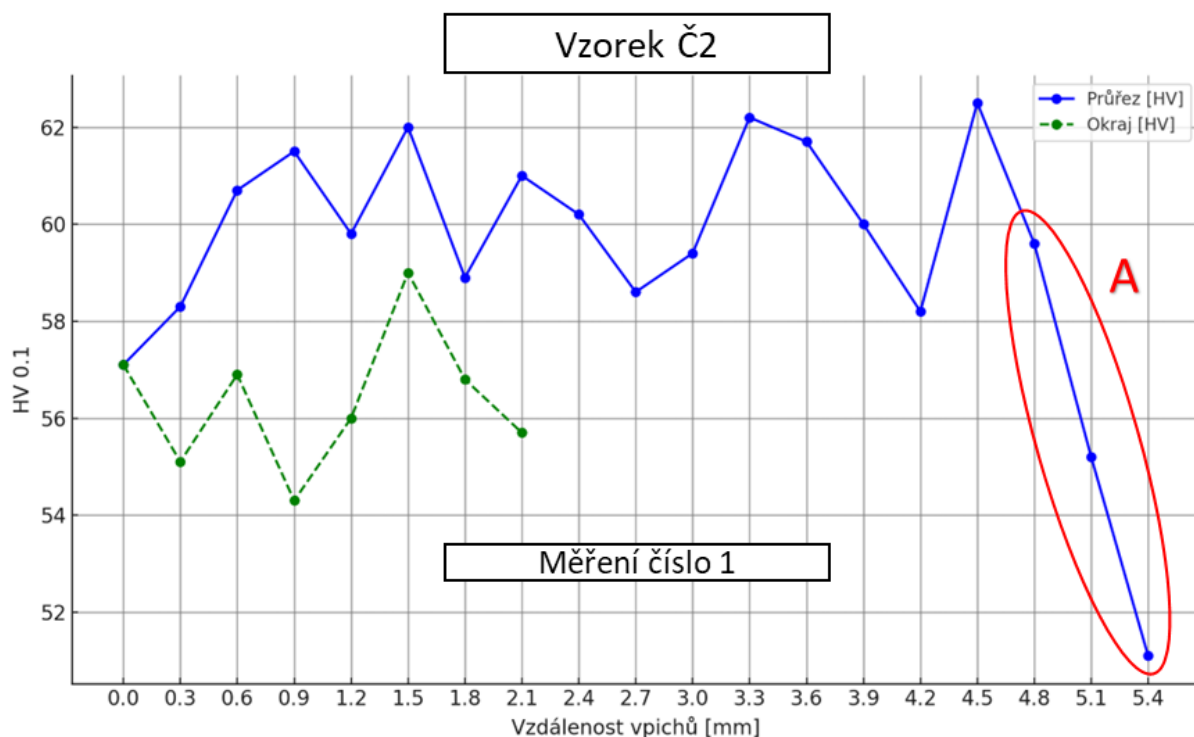
Dle normy ČSN EN ISO 6507-1 by se materiál EN AW-6063 měl pohybovat v rozmezí 70-90 HV pro mikrotvrdotost HV 0,1. Z naměřených hodnot, které můžeme vidět na obr. 3.27 a 3.28 pro vzorky Č1 a Č2 vyplývá, že čistý materiál je v tomto rozmezí 70-90 HV pro mikrotvrdotost HV 0,1. Proto můžeme říci, že dochází k tepelnému ovlivnění materiálu unionu, a to má za následek pokles hodnot mikrotvrdotosti daného materiálu, z důvodu překročení hranice teploty pro rekrystalizaci, odpevnění a změnu vnitřního napětí materiálu.



Obr. 3.28 Závislost mikrotvrdotosti jednotlivých řad na vzdálenosti vpichů pro vzorek Č2



Obr. 3.30 Vzorek pro ověření napálené části unionu s označením VI



Obr. 3.29 Závislost mikrotvrlosti v napálené oblasti pro průřez unionu a pro oblast po obvodu unionu

Z obrázku 3.30 můžeme vidět, že díky příliš velkému napálení nebo vytvoření tzv. krupičky na povrchu ztrácíme v důsledku moc velké teploty nebo vneseného tepla na povrch unionu, mikrotvrdot v celém průřezu unionu, ale hlavně v povrchové vrstvě unionu. V oblasti A z obr. 3.30 můžeme vidět v důsledek překročení limitní teploty pro materiálu unionu a to teploty tání pro EN AW-6063, kde teplota je stanovena na rozmezí 615-655°C. V tomto rozmezí teploty dojde k porušení vrchní vrstvy unionu a dochází tak, k odlupování zrn základního materiálu.

Tab. 5 Celkový přehled naměřených průměrných hodnot u všech vzorků pro HV0,1 (průměrné hodnoty společně s výběrovou směrodatnou odchylkou)

| Vzorek | NG01 | | | Vzorek | NG02 | | |
|--------------|-------------|--------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|
| Číslo měření | Vnější [HV] | Střední [HV] | Závit [HV] | Číslo měření | Vnější [HV] | Vnitřní [HV] | Závit [HV] |
| 1 | 61 ± 0,7 | 61 ± 1,0 | 61 ± 1,7 | 1 | 62 ± 2,3 | 62 ± 1,0 | 62 ± 1,2 |
| 2 | 62 ± 0,9 | 61 ± 0,8 | 61 ± 0,8 | 2 | 62 ± 0,8 | 62 ± 1,0 | 62 ± 0,6 |
| Vzorek | OK01 | | | Vzorek | OK02 | | |
| Číslo měření | Vnější [HV] | Vnitřní [HV] | Závit [HV] | Číslo měření | Vnější [HV] | Vnitřní [HV] | Závit [HV] |
| 1 | 61 ± 0,7 | 62 ± 1,3 | 61 ± 1,0 | 1 | 61 ± 0,5 | 61 ± 0,9 | 61 ± 1,4 |
| 2 | 61 ± 0,9 | 61 ± 0,7 | 62 ± 0,7 | 2 | 62 ± 0,9 | 61 ± 0,8 | 61 ± 0,7 |
| Vzorek | Č1 | | | Vzorek | Č2 | | |
| Číslo měření | Vnější [HV] | Vnitřní [HV] | Závit [HV] | Číslo měření | Vnější [HV] | Vnitřní [HV] | Závit [HV] |
| 1 | 72 ± 0,9 | 72 ± 0,8 | 72 ± 0,80 | 1 | 72 ± 1,0 | 72 ± 1,0 | 72 ± 1,0 |
| 2 | 72 ± 0,8 | 72 ± 0,9 | 72 ± 0,9 | 2 | 72 ± 1,0 | 72 ± 1,0 | 72 ± 0,9 |
| Vzorek | V1 | | | | | | |
| Číslo měření | Průřez [HV] | Okraj [HV] | | | | | |
| 1 | 59 ± 2,7 | 56 ± 1,4 | | | | | |

Z výsledných průměrných hodnot, které můžeme vidět v tab. 5 (průměrné hodnoty jsou uvedeny společně s výběrovou směrodatnou odchylkou). Pro vzorky NG a OK vyšly skoro identicky v rozmezí 60-63 HV. Při porovnání průměrných hodnot mezi vzorky Č1 a Č2 (čisté uniony) se hodnoty liší ve větším měřítku, tepelné ovlivnění materiálu způsobí změnu mikrotvrdosti a to směrem dolů, čisté vzorky Č1 a Č2 se nachází v rozmezí 70-73 HV. Tedy při porovnání průměrných hodnot mikrotvrdosti mezi čistým unionem a zapájeným, je rozdíl hodnot zhruba 10 HV.

Pokud je slitina EN AW-6063 vystavena zvýšeným teplotám, mohou nastat následující změny ve vlastnostech materiálu:

- **Odpevnění:** Při teplotách nad 150 °C se začínají zpevňující částice (precipitáty) spojovat a růst, což snižuje jejich schopnost blokovat pohyb dislokací v krystalové mřížce, proto tento jev snižuje mechanickou pevnost a tvrdost materiálu.
- **Rekrystalizace:** Okolo teploty 250 °C se v materiálu mohou začít formovat nová zrna s menším vnitřním napětím a větší schopností deformace. Nově vytvořená zrna mají menší množství vnitřního napětí, což vede k poklesu pevnosti a tvrdosti.
- **Změkčení materiálu:** S dalším nárůstem teploty, především nad 300 °C, dochází k rozpadu dislokační struktury, což dále snižuje odpor materiálu vůči deformaci. Za následek je znovu pokles tvrdosti.

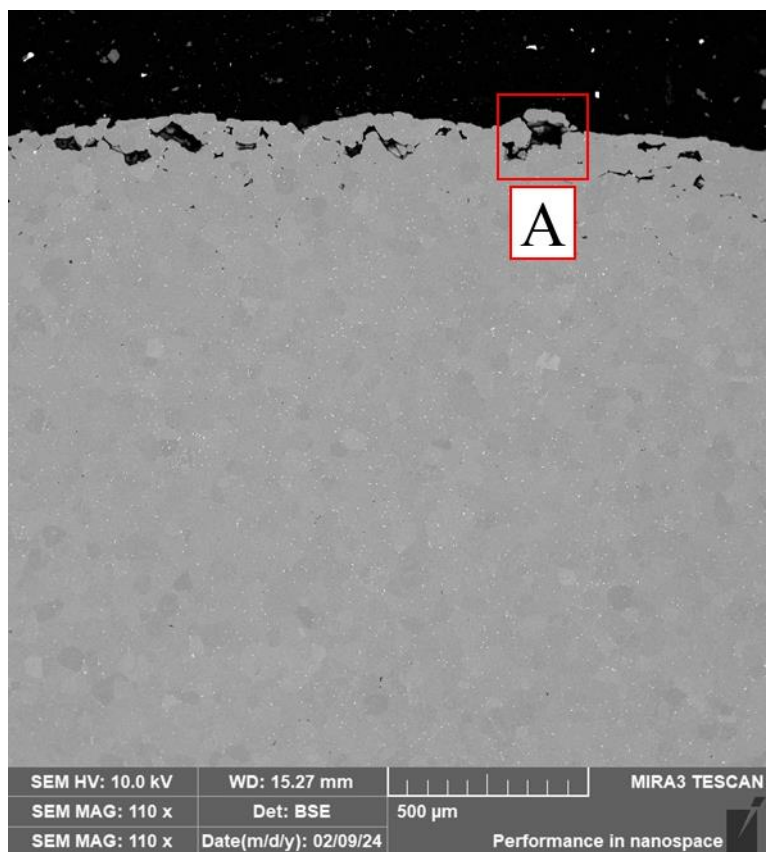
Tyto změny jsou způsobeny zvýšenou pohyblivostí atomů v důsledku tepla, což umožňuje rekombinaci a růst zpevňujících částic a také formování nových zrn.

U vzorku s označením V1 (Obr. 3.29) byl proveden test u velmi napáleného unionu, byl zde proveden řez a měření tvrdosti v celém průřezu. Společně s tím i po obvodu unionu v oblasti, kde se nachází napálení (krupička). Z těchto hodnot dokážeme určit větší ovlivnění než např. u vzorků NG nebo OK, kdy v tomto případě bylo napálení unionu za nepřijatelnou hranicí. Tento vzorek sloužil k potvrzení či vyvrácení teorie, kdy při procesu pájení dochází k softwarové chybě, kdy hořáky zůstanou v pozici pájení o sekundu navíc, a proto se stává, že uniony jsou více napálené než při zachování pájecího cyklu, tedy bez zaseknutí pájecích hořáků. Proto při zaseknutí hořáků je vidět markantní rozdíl při vizuální kontrole, díky polovičnímu cyklu je zde vnesené teplo (energie) hrozně velká. Hraje zde tedy velký faktor čas, kdy každá desetina sekundy může způsobit příliš velké tepelné ovlivnění a proto, dosahujeme menších dosažených hodnot mikrotvrdosti na povrchu unionu ($56 \pm 1,4$ HV), i v jeho průřezu ($59 \pm 2,7$ HV).

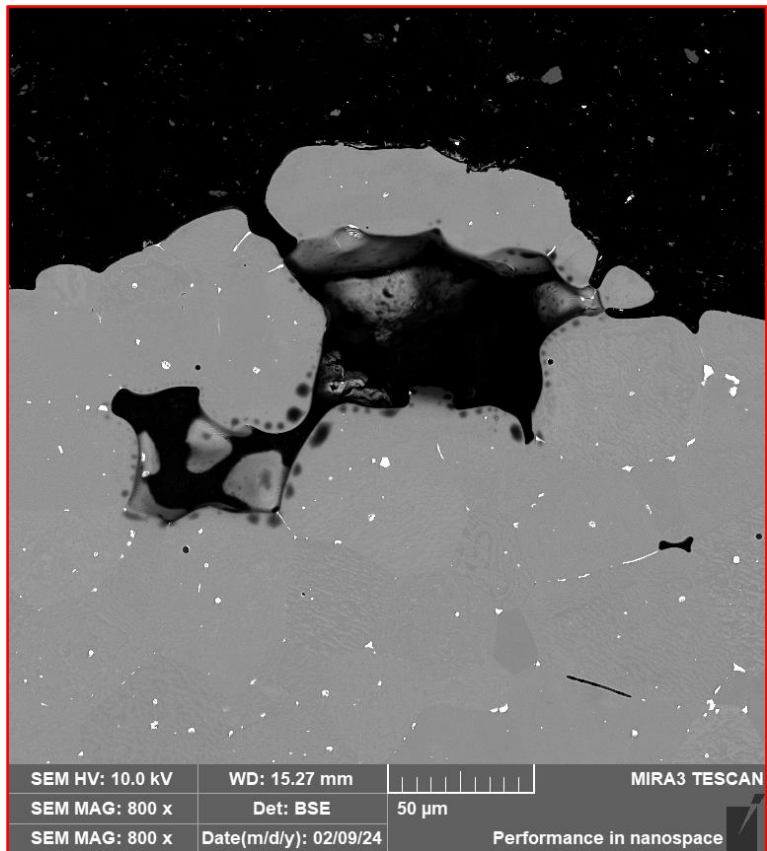
Když teplota materiálu EN AW-6063 přechodně překročí jeho teplotu tání, která se pohybuje mezi $615\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $655\text{ }^{\circ}\text{C}$, může na povrchu dojít k poškození, které označujeme "krupička" nebo napálení materiálu. Tento jev způsobuje, že povrchová vrstva materiálu se částečně rozpustí a rychle ztuhne, což vede k vytvoření hrubého a porézního povrchu. Tento jev je způsoben nerovnoměrným ochlazením a krystalizací materiálu, což vede k vzniku vnitřních napětí mezi různými vrstvami materiálu. Když se tyto napětí stávají příliš velkými, mohou způsobit, že se vrchní vrstvy začnou loupat nebo spíše odlupovat od základního materiálu.

3.10 Vyhodnocení SEM a EDS analýzy vnitřní vrstvy

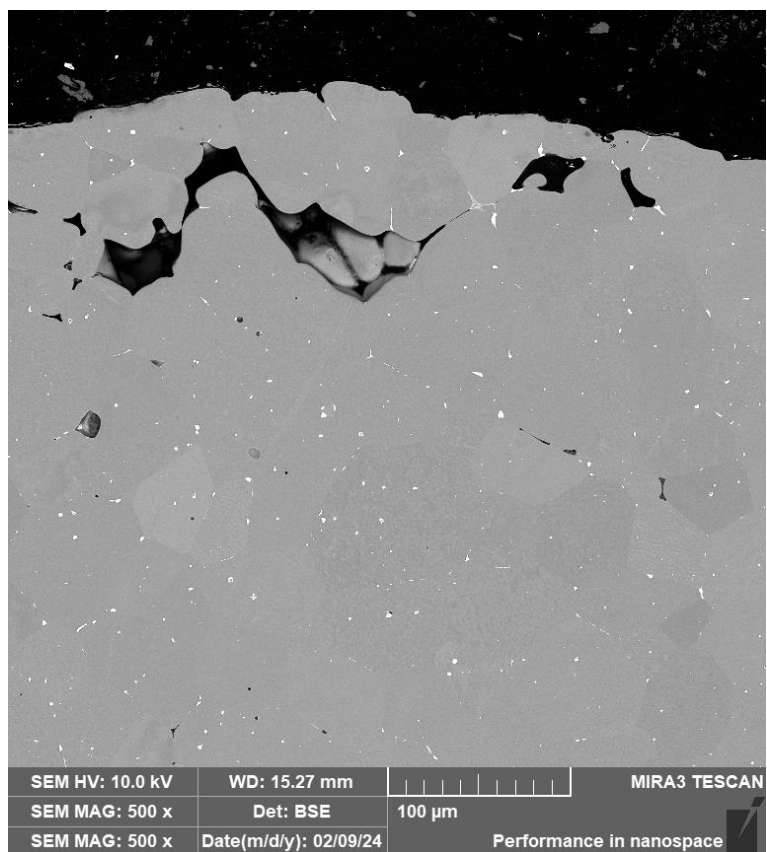
V tomto vyhodnocení se soustředíme na dvě klíčové analýzy, jak již napovídá název. Nejdříve byla provedena analýza obrazů získaných pomocí elektronového mikroskopu, poté následovalo podrobné zkoumání domněnek týkajících obrazů z elektronového mikroskopu, které podpoříme chemickou mikroanalýzou. Analyzované oblasti zahrnují oblasti napálení, především se zde budeme zabývat napálením unionu z pohledu vnitřní vrstvy vzorků, protože povrchovou část jsme již analyzovali a došli k výsledku, že povrchová část napálení nebo tzv. krupičky není způsobena důsledkem ovlivnění pájecího drátu a jeho složením. Pomocí EDS analýzy povrchové části unionu se domníváme, že se jedná o vrstvu základního materiálu unionu, tedy odlupující se vrstvu nebo spíše jednotlivá zrna základního materiálu unionu. Pro důkladnější zkoumání jsme vyhodnotili čistou oblast zapájeného unionu, pro lepší srovnání dosažených hodnot.



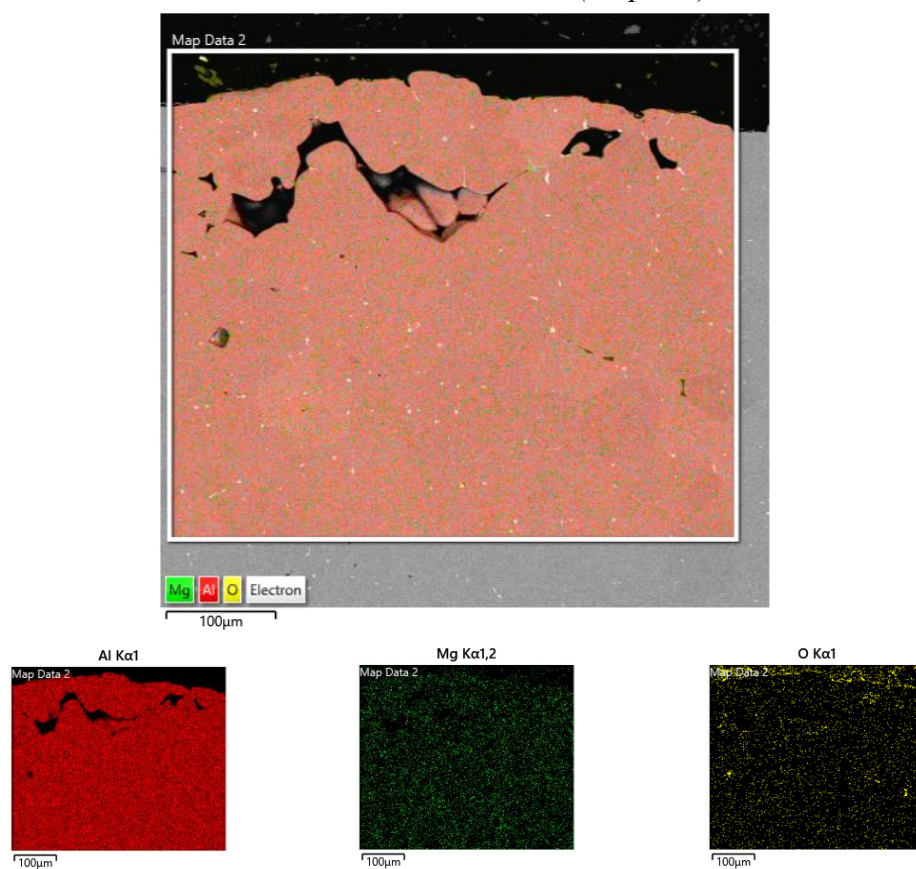
Obr. 3.31 Makrostruktura narušené oblasti (krupička), 110x zvětšení, BSE



Obr. 3.32 Makrostruktura narušené oblasti, detail vrstvy A (krupička), 800x zvětšení, BSE

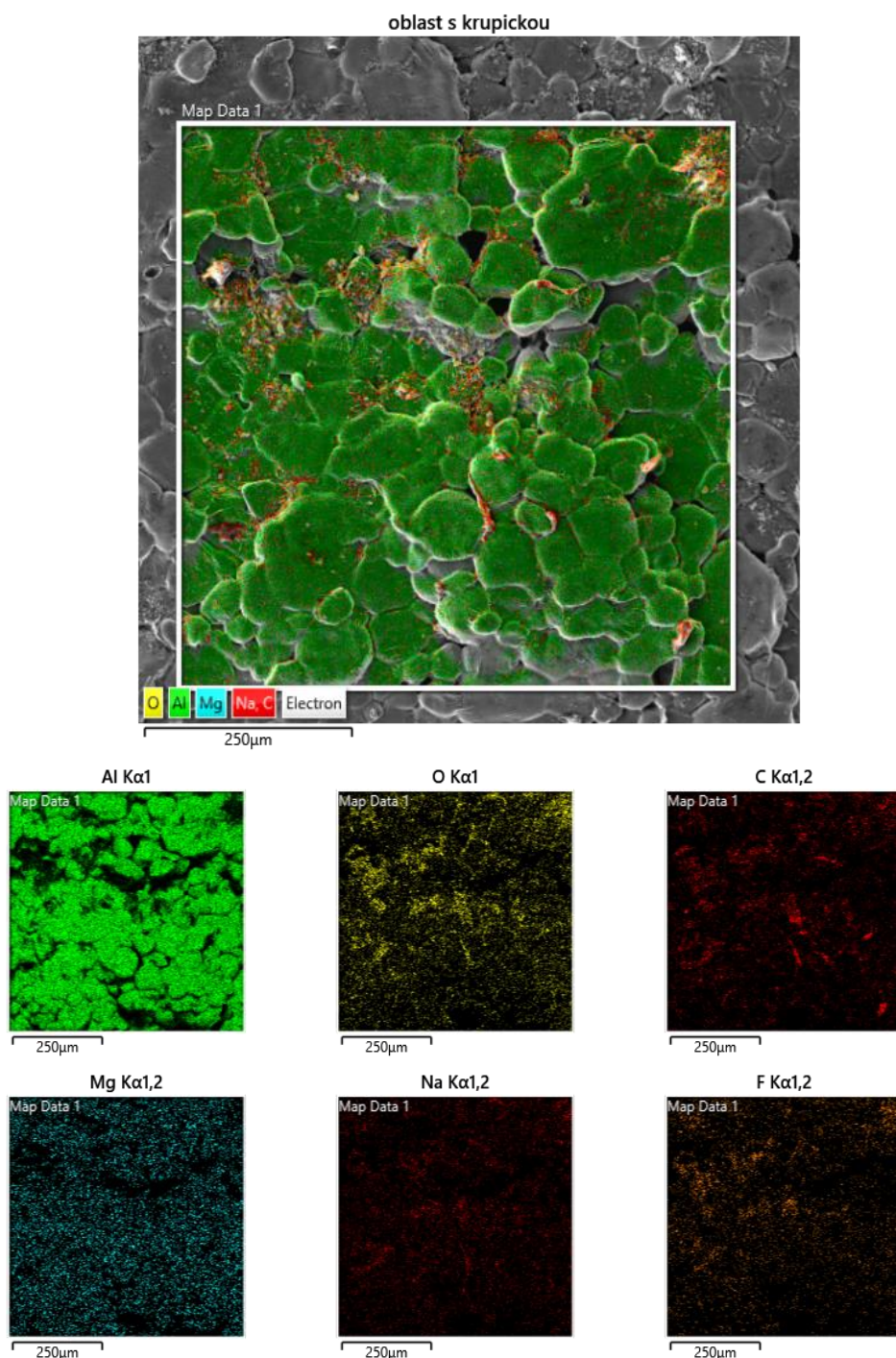


Obr. 3.34 Makrostruktura narušené oblasti (krupička), 500x zvětšení, BSE



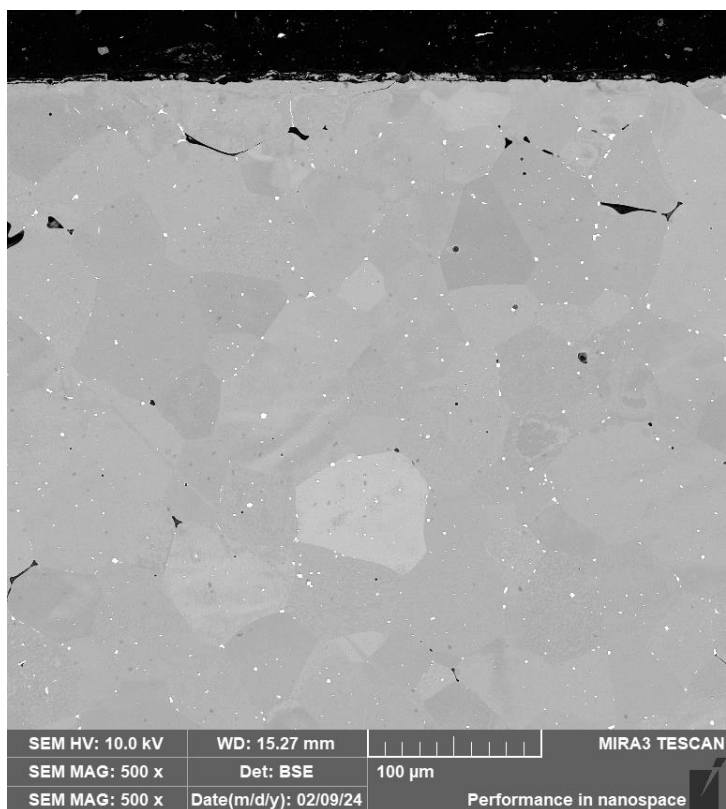
Obr. 3.33 EDS analýza obr. 3.34 – podíl přítomných prvků, detail vrstvy odlupující se krupičky

Při detailnějším zkoumání (Obr. 3.31 a 3.32) si potvrzujeme teorii, že se jedná o vrstvu základního materiálu, tedy že vzniklé napálení (krupička) na povrchu unionu je vrstva základního materiálu, která se odlupuje. Prvky, které se nachází v oblasti napálení se shodují s prvky základního materiálu unionu. Je zde větší přítomnost kyslíku, v důsledku působení atmosféry na zkoumaný vzorek (Obr. 3.33 a 3.34). Vrstva ovlivněné struktury dosahuje velikosti okolo 250-300 μm (0,25-0,30 mm) vrstva, která se částečně odlupuje od základního materiálu dosahuje dle snímků z makrostruktury, pomocí metody BSE hodnoty do 150 μm .

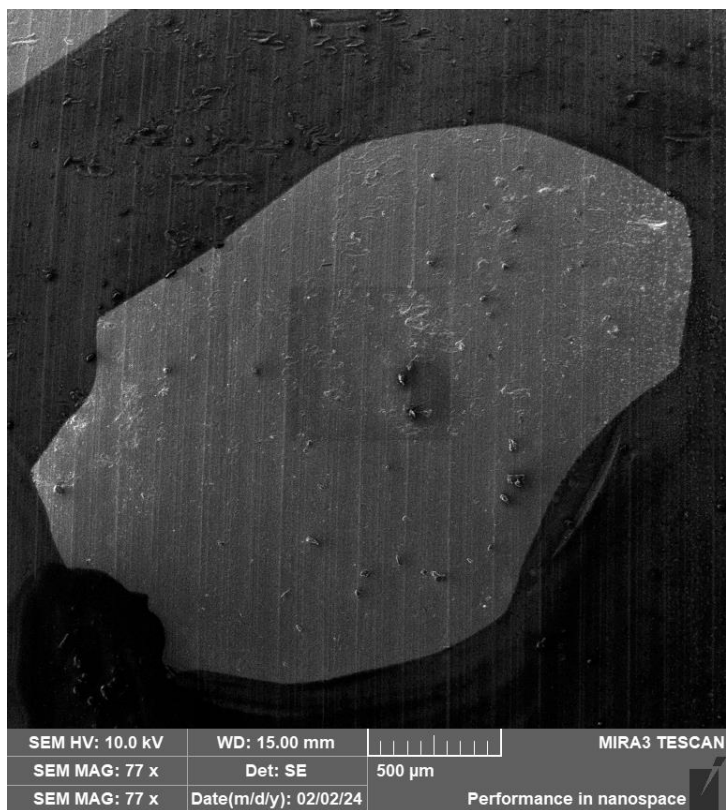


Obr. 3.35 EDS analýza – podíl přítomných prvků, povrch napálené oblasti (krupičky)

(0,15 mm). Pro porovnání oblasti napálení unionu byla použita oblast z OK kusu, která by měla být v pořádku.

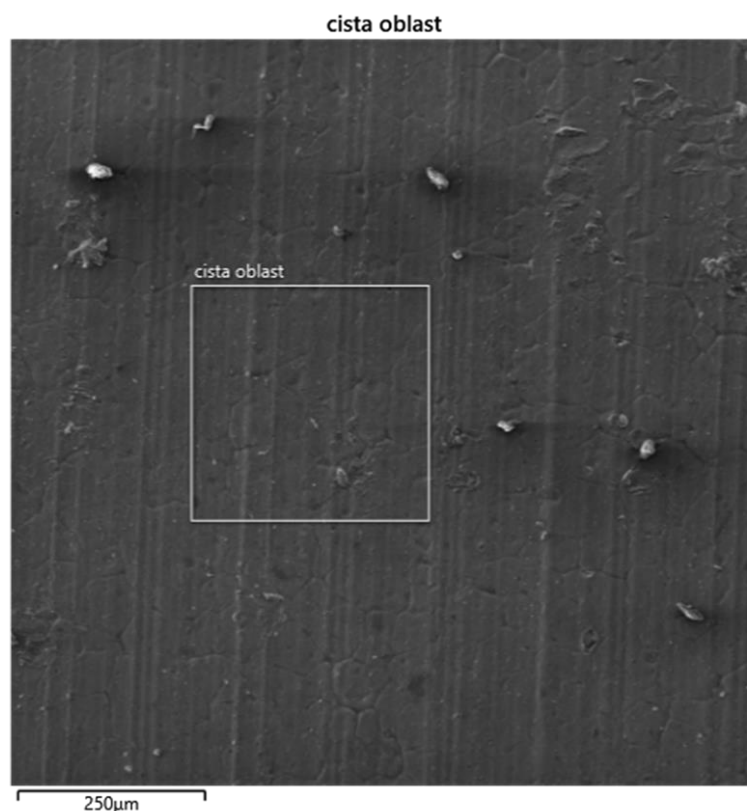


Obr. 3.37 Makrostruktura čisté oblasti (bez krupičky), 500x zvětšení, BSE



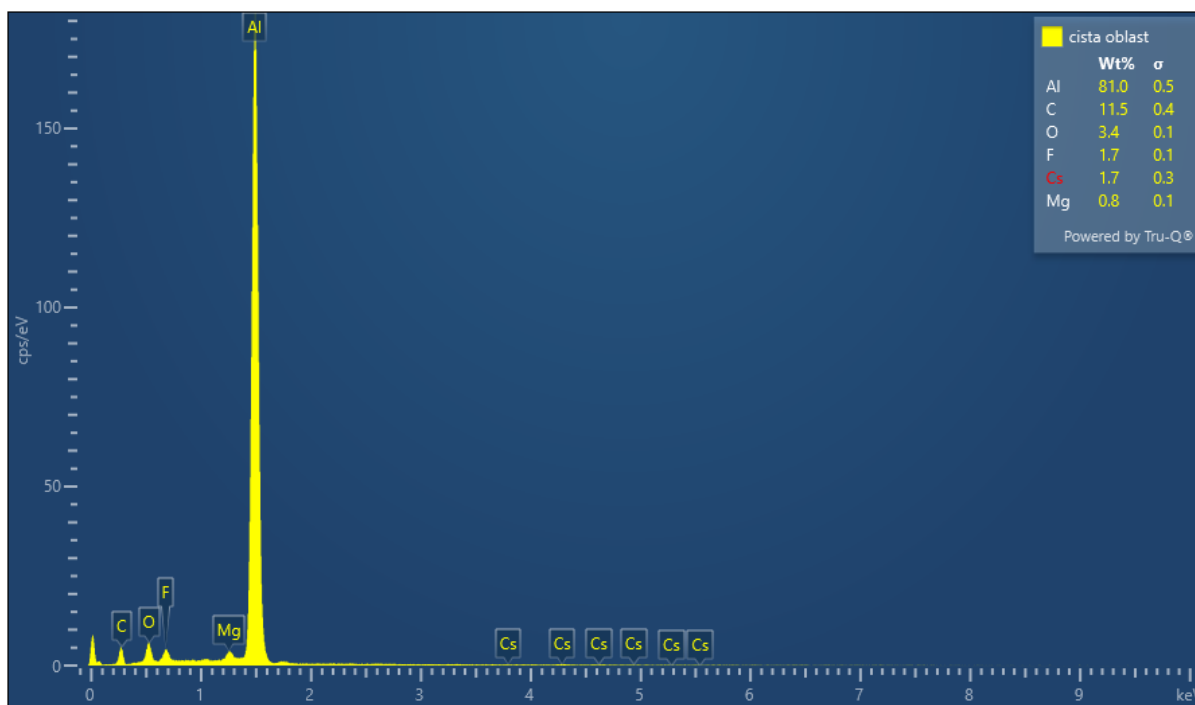
Obr. 3.36 Makrostruktura čisté oblasti (bez krupičky), 77x zvětšení, SE

Z obr. 3.35 je patrné, že oblast při méně detailnějším pohledu má na povrchu prvky, které odpovídají materiálu unionu nikoliv prvkům, které obsahuje pájecí drát (kroužek). Při porovnání napálené oblasti a čisté oblasti unionu (Obr. 3.35 a 3.39) není vidět skoro žádný rozdíl. U čisté oblasti se navíc nachází na povrchu malé množství prvku Cesium (Cs), na několika vzorcích se hodnota pohybovala od 0,2-2 % prvku. Vzorky testované v oblasti krupičky tento prvek neobsahovaly, pravděpodobně způsobeno odstraněním tohoto prvku pomocí tepelného působení, které dosahovalo zvýšené teploty.



Obr. 3.38 Makrostruktura čisté oblasti (bez krupičky), SE

Z obr. 3.39 vyplývá že čistá oblast obsahuje prvky základního materiálu, ale i malé množství prvku Cesium (Cs) na několika vzorcích, v rozmezí hodnoty od 0,2-2 % prvku. Oproti zkoumané oblasti krupičky, která vzniká díky velkému tepelnému ovlivnění na danou oblast unionu a společně s tím, že jeden z hořáků je namířen na oblast unionu. Také z výsledných hodnot mikrotvrdosti, pro oblast napálení (krupičky), můžeme říct, že zde působí větší tepelné namáhání, které přesahuje hranici pro teplotu tání základního materiálu unionu. Vše je způsobeno překročenou teplotou tání ovlivněného materiálu, díky působení hořáků a velkého vneseného tepla do oblasti unionu za určitý časový úsek, který zde hraje velkou roli.



Obr. 3.39 EDS analýza – chemické složení prvků (%) čisté oblasti na povrchu unionu

4 Statistické vyhodnocení experimentu

Pro statistické vyhodnocení byly vybrány vzorky z pájených spojů, kde data byla získána z řady měření mikrotvrdoti pomocí Vickersovy zkoušky tvrdosti. Pro každý vzorek bylo vytvořeno několik měření napříč různými oblastmi spoje, aby bylo možné posoudit rozložení tvrdosti v důsledku tepelného zpracování během pájení. Statistické analýzy dat z mikrotvrdoti potvrdily signifikantní rozdíly mezi mikrotvrdotí v různých oblastech spoje v porovnání s čistým materiálem (nebyl zapájen). Zjištění poukazují na to, že největší změna tvrdosti byla v oblastech, které byly nejvíce vystaveny tepelnému zpracování. Experimentální data z mikrotvrdotních zkoušek a makroskopické analýzy potvrzují, že pájení plamenem významně ovlivňuje strukturu a vlastnosti materiálu (EN AW-6063) v oblasti spoje. Tepelné namáhání během pájení vede k strukturním změnám, které jsou příčinou snížení tvrdosti materiálu. Výsledné průměrné hodnoty mikrotvrdoti můžeme nalézt v tab. 5, ze které můžeme potvrdit snížení tvrdosti materiálu unionu.

Pro statistické vyhodnocení experimentu jsme zvolili analýzu T-test, a protože porováváme dva různé vzorky, nemůžeme pozorování nijak spárovat. Naopak předpokládáme shodný rozptyl hodnot, proto můžeme použít dvouvýběrový t-test. Také máme stejný počet měření, tedy můžeme použít metodu dvouvýběrového t-testu s rovností rozptylů.

| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
|---|------------------|-------------------|
| | OK01_vnější_řada | NG_01_vnější_řada |
| Stř. hodnota | 60,9 | 61,12 |
| Rozptyl | 0,54 | 0,520285714 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,530142857 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -0,827478761 | |
| P(T<=t) (1) | 0,207481396 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,414962791 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |

Obr. 4.1 Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG01 vs OK01 (pro vnější řadu, měření č.1)

Výsledek se čte tak, že: zajímá nás hodnota "t krit (2)" což znamená, že se bere oboustranný test (vyznačeno zeleně v obr. 4.1) a porovnáme ji s hodnotou "t Stat" (vyznačeno červeně v obr. 4.1). Pokud hodnota "t Stat" se nachází v intervalu hodnoty \pm "t krit (2)" tzn. v našem případě v intervalu od -2,04 do +2,04, tak odchylky střední hodnoty lze brát jako nevýznamné, tzn. střední hodnoty jsou stejné.

V našem případě je hodnota "t Stat" rovna -0,82, což padá do intervalu hodnoty \pm "t krit (2)" a znamená to tedy, že střední hodnoty obou sledovaných souborů jsou stejné. Tato analýza byla provedena pro všechny vzorky, ve všech případech porovnání mezi vzorky NG a OK, hodnota "t Stat" ležela v intervalu hodnoty \pm "t krit (2)", tedy všechny střední hodnoty sledovaných řad pro vzorky NG a OK jsou stejné, můžeme tedy tyto vzorky považovat za rovné z pohledu mechanických vlastností (mikrotvrdość) s rozdílem vizuálního stavu. Kompletní porovnání mezi vzorky NG a OK najdete v příloze této práce, pro představu kompletního porovnání u vzorku OK01 vs NG01 pro všechny řady a měření číslo 1, můžete vidět na obr. 4.2.

| VZORKY OK_01 VS NG_01 PRO MĚŘENÍ Č.1 | | |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK01_vnější_řada</i> | <i>NG_01_vnější_řada</i> |
| Stř. hodnota | 60,9 | 61,12 |
| Rozptyl | 0,54 | 0,520285714 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,530142857 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -0,827478761 | |
| P(T<=t) (1) | 0,207481396 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,414962791 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK1_střední_řada</i> | <i>NG01_střední_řada</i> |
| Stř. hodnota | 61,54 | 60,83333333 |
| Rozptyl | 1,625428571 | 0,983809524 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 1,304619048 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 1,694350989 | |
| P(T<=t) (1) | 0,050647527 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,101295053 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závít OK_01</i> | <i>Závít NG_01</i> |
| Stř. hodnota | 60,98571429 | 61,2 |
| Rozptyl | 0,958095238 | 2,893333333 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 1,925714286 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | -0,288889206 | |
| P(T<=t) (1) | 0,388798037 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 0,777596073 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Obr. 4.2 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG01 vs OK01 (všechny řady, měření č.1)

T-test byl proveden i u vzorků Č1 a Č2, kde hodnoty "t Stat" ležely v intervalu hodnoty \pm "t krit (2)", tedy všechny střední hodnoty sledovaných řad pro vzorky Č1 a Č2 jsou stejné, můžeme tedy tyto vzorky považovat za rovné z pohledu mechanických vlastností (mikrotvrdość). Změna nastává při porovnání vzorků NG nebo OK se vzorky Č1 a Č2 (tedy vzorky zapájené vs vzorky čistého materiálu bez tepelného ovlivnění). Zde hodnoty "t Stat", neležely v intervalu hodnoty \pm "t krit (2)", tedy všechny střední hodnoty sledovaných řad pro vzorky OK, NG vs Č1 a Č2 nejsou stejné, proto nemůžeme tedy tyto vzorky považovat za rovné z pohledu mechanických vlastností (mikrotvrdość). Výsledné hodnoty mezi vzorky Č1 a NG01 můžete vidět na obr. 4.3 a kompletní porovnání naleznete v příloze této práce.

| VZORKY Č1 VS NG01 PRO MĚŘENÍ Č.1 | | |
|---|------------------------|---------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č1 vnější řada</i> | <i>NG_01 vnější řada</i> |
| Stř. hodnota | 71,98 | 61,12 |
| Rozptyl | 0,768857143 | 0,520285714 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,644571429 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 37,04460186 | |
| P(T<=t) (1) | 1,23212E-25 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 2,46423E-25 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č1 střední řada</i> | <i>NG_01 střední řada</i> |
| Stř. hodnota | 72,01333333 | 60,83333333 |
| Rozptyl | 0,674095238 | 0,983809524 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,828952381 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 33,62851143 | |
| P(T<=t) (1) | 1,74622E-24 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 3,49243E-24 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závit Č1</i> | <i>Závit NG_01</i> |
| Stř. hodnota | 71,91428571 | 61,2 |
| Rozptyl | 0,641428571 | 2,893333333 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 1,767380952 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | 15,07759802 | |
| P(T<=t) (1) | 1,83185E-09 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 3,66369E-09 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Obr. 4.3 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č1 vs OK01 (všechny řady, měření č.1)

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjistit a provést analýzu pájeného spoje z hlediska změny struktury materiálu, tvrdosti (mikrotvrdosti) v okolí pájeného spoje a změny mechanických vlastností spojovaného materiálu důsledkem tepelného namáhání. Hlavním zkoumaným materiálem byla slitina hliníku s označením EN AW-6063 (AlMg0,7Si), ze které byla vyrobena hlavní část pájené součásti a to union. Podrobnější informace o vlastnostech můžete najít v tab. 2 nebo pomocí katalogového listu v příloze č.13.

V experimentální části byly nejprve použity metody, které nedestruktivně zkoumají vzorky. Jako první byl proveden heliový test ve firmě Y na vzorcích s označením X. Všechny tyto vzorky prošly heliovým testem úspěšně. Poté následovala vizuální kontrola stavu pájeného spoje, při níž byly všechny vzorky v pořádku z pohledu povrchových vad. Následně jsme použili metodu CT, která po vyhodnocení výsledků odhalila, že pájené spoje obsahují vysoké procento vnitřních vad (díry, praskliny, vměstky), a to jak u vzorků označených jako OK, tak u NG vzorků. Proto bych všechny testované vzorky vyhodnotil jako nevyhovující, přestože testované vzorky prošly heliovým testem, tedy splňují podmínku těsnosti. Před destruktivními zkouškami byla provedena metoda SEM a EDS analýza povrchové části. Zaměřilo se na oblast napálení nebo tzv. krupičku a poté i čistou oblast unionu. Z výsledků SEM obrazů a EDS analýzy jsme zjistili, že tzv. krupička není způsobena vlivem pájecího drátu, ale jedná se o odlupující se vrstvu základního materiálu unionu, proto další metody byly věnovány této problematice.

Pro další důležité zkoušky bylo potřeba vzorky vhodně upravit a destruktivně ovlivnit, pro důkladné vyšetření tvrdosti (mikrotvrdosti dle Vickerse) a mikrostrukturních změn pomocí obrazů z elektronového mikroskopu, které jsme podpořili chemickou mikroanalýzou v oblastech blízkých pájeným spojům, které jsou klíčové pro vedení chladícího média v automobilových klimatizačních systémech. Výsledky ukázaly, že v oblasti spoje došlo k výraznému poklesu tvrdosti (mikrotvrdosti) v celém průřezu zkoumaného dílu (unionu), který má za úkol udržet tlak v systému a plnit funkci doplnění klimatizačního média. V důsledku tepelného ovlivnění během pájení dochází k ovlivnění celého pájeného spoje, ale hlavně v našem případě napálení nebo vznik tzv. krupičky na povrchu unionu. Všechny hodnoty byly porovnány s naměřenými hodnotami, které jsme získaly z čistého materiálu unionu, který nebyl nijak tepelně ovlivněn. Dle těchto měření a následného porovnání jsme zjistili, že dochází k již zmiňovanému poklesu tvrdosti v celém průřezu unionu.

Na základě dosažených výsledků je možné učinit následující závěry:

- Při tomto procesu pájení pro specifický materiál (EN AW-6063) a tvarově složitější součásti, kde se potřebujeme dostat k hranici 600 °C pro úplné roztavení pájecího drátu a správného zapájení součásti, dochází k natolik velkému tepelnému ovlivnění, že struktura mění svoje zrna v celém průřezu a proto v tomto případě snižuje svoji tvrdost (mikrotvrdost).
- Pokud je slitina EN AW-6063 vystavena zvýšeným teplotám, které překročí jistou teplotní hranici, nastanou následující změny ve vlastnostech materiálu:
 - Odpevnění: Při teplotách nad 150-200 °C se začínají zpevňující částice (precipitáty) spojovat a růst, což snižuje jejich schopnost blokovat pohyb dislokací v krystalové mřížce, proto tento jev snižuje mechanickou pevnost a tvrdost materiálu.
 - Rekrystalizace: Okolo teploty 250-300 °C se v materiálu mohou začít formovat nová zrna s menším vnitřním napětím a větší schopností deformace. Nově vytvořená zrna mají menší množství vnitřního napětí, což vede k poklesu pevnosti a tvrdosti.
 - Změkčení materiálu: S dalším nárůstem teploty, především nad 300 °C, dochází k rozpadu dislokační struktury, což dále snižuje odpor materiálu vůči deformaci. Za následek je znovu pokles tvrdosti.
- Tyto změny jsou způsobeny zvýšenou pohyblivostí atomů v důsledku tepla, což umožňuje rekombinaci a růst zpevňujících částic a také formování nových zrn.
- Když teplota materiálu EN AW-6063 přechodně překročí jeho teplotu tání, která se pohybuje mezi 615 °C až 655 °C, může na povrchu dojít k poškození, které označujeme napálením materiálu nebo "krupička". Tento jev způsobuje, že povrchová vrstva materiálu se částečně rozpustí a rychle ztuhne, což vede k vytvoření hrubého a porézního povrchu. Tento jev je způsoben nerovnoměrným ochlazením a krystalizací materiálu, což vede k vzniku vnitřních napětí mezi různými vrstvami materiálu. Když se tyto napětí stávají příliš velkými, mohou způsobit, že se vrchní vrstvy začnou loupat nebo spíše odlupovat od základního materiálu, což nastalo v našem případě.

Přestože se obecně předpokládá, že hodnota tvrdosti (mikrotvrdosti) po zapájení součásti bude klesat, tak nemůžeme přesto určit v jaké míře je vizuální stav dle napálení či krupičky v toleranci či mimo ni, abychom mohli potvrdit striktní hranici pro tzv. OK či NG kus. Pouze v tomto případě můžeme potvrdit, že napálení nebo tzv. krupičku způsobuje překročení teploty tání pájeného materiálu (unionu), která způsobí že povrchová vrstva materiálu se částečně rozpustí a rychle ztuhne, tím vytvoří na povrchu hrubou (porézní) strukturu.

Ze statistického vyhodnocení naměřených hodnot, kde jsme provedli T-test, můžeme potvrdit že mezi vzorky OK a NG nejsou rozdíly v mechanických vlastnostech (mikrotvrdosti), ale pouze ve vizuálním vzhledu zapájené součásti, v tomto případě unionu. Při porovnání vzorků OK a NG vůči vzorkům Č1 a Č2 můžeme potvrdit rozdílnou hodnotu mechanických vlastností (mikrotvrdosti), kdy mikrotvrdost klesla po procesu pájení v průměru o hodnotu 10 HV.

Z dosažených hodnot tohoto experimentu, nemůžeme určit hranici pro určení NG a OK kusu pro vizuální kontrolu napálení, ale můžeme potvrdit, že vrstva napálení nebo tzv. krupička se zde objevuje jen v malé vrstvě (do 150 μm). Daná vrstva ovlivňuje pouze vizuální stránku pájeného spoje, ale vnitřní struktura a tvrdost (mikrotvrdost) zůstává přímo úměrná působící teplotě, a hlavně jednotce času (vnesenému teplu). Dle dosažených výsledků můžeme tvrdit, že se jedná pouze o vizuální vadu, která nemá až tak velký vliv na mechanické vlastnosti pájeného materiálu, ale nedokážeme určit požadovanou hranici pro vizuální kontrolu. Navrhoval bych proto zavést kontrolu pomocí drsnosti povrchu unionu, která by musela vycházet z jisté řady měření, kde by se daná hranice dokázala určit namísto vizuální kontroly, kde každý člověk má jinou úroveň rozpoznání a vyhodnocení. Zároveň je třeba poznamenat, že naše testy nedokáží předpovědět, jak bude ovlivněná struktura na povrchu reagovat na vnější podmínky, jako je např. koroze v dlouhodobém horizontu několika let. Tento aspekt vyžaduje další dlouhodobé studie a analýzy, aby bylo možné plně pochopit a předpovědět chování materiálu v reálných podmínkách.

Použitá literatura

- [1] R. Kříž a kol. Stavba a Provoz strojů strojů I. SNTL – Nakladatelství technické literatury. 1977
- [2] ŽIVČÁK, Tomáš. Stavba a provoz strojů I [online]. 1. Publi.cz, 2015 [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/book/208-stavba-a-provoz-stroju-i>
- [3] doc. Ing. Jaromír MORAVEC, Ph.D., Teorie svařování, pájení a tepelného dělení Přednáška č. 1., Presentation presented at: [Katedra strojírenské technologie, E-E311 ; 2023 Mar 5; Liberec, Czechia.]
- [4] PETERKA, Jindřich. Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980. 788 s.
- [5] HABENICHT, Gerd. Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung. 4. doplněné vydání. Berlin: Springer, 2002. 921 s. ISBN 3-540-43340-6.
- [6] COGNARD, Philippe. Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques. Handbook of Adhesives and Sealants. Volume 1. Oxford: Elsevier 2005
- [7] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-244-8.
- [8] LASERY A OPTIKA. Seriál na téma lasery – Základní princip laseru a jejich dělení [online]. 2013 [cit. 2024-02-27]. Dostupné také z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-natema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [9] BRAJER, Jan. Svařování laserem. Praha: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii.
- [10] NEUMANN, Heinz. Teorie svařování a pájení. Část 1, Tavné svařování. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-171-9.
- [11] KOŘÁN, P. Hlavní typy laserů [online]. Praha: Lao.cz, 2011, 15.3.2011 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laserupouzivanych-v-prumyslu-128>
- [12] PLÍVA, Ladislav. Odporové svařování. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975, 265, [1] s. Řada strojírenské literatury.

- [13] LIPA, Milan. Bodové a švové zvaranie. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966, 341 s. Knižnica Výskumného ústavu zvaračského v Bratislave.
- [14] RADAJ, Dieter a Dieter RADAJ. Welding residual stresses and distortion: calculation and measurement. Rev. ed. Düsseldorf: DVS-Verl, 2003. English edition, 2. ISBN 978-3-87155-791-0.
- [15] KOU, Sindo. Welding metallurgy. 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2003. ISBN 978-0-471-43491-7.
- [16] SZENDIUCH, I. Základy technológie mikroelektrotechnických obvodů a systémů. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2006. 379 s. ISBN 80-214-3292-6
- [17] STARÝ, J., M. ZATLOUKAL. Montážní a propojovací technologie. Brno, 2015. Skripta. Vysoké učení technické v Brně. 272 stran.
- [18] SZENDIUCH, Ivan. Mikroelektronické montážní technologie. Brno: VUTIUM, 1997. ISBN 80-214-0901-0.
- [19] ZÁHLAVA, Vít a České vysoké učení technické v Praze. Elektrotechnická fakulta. Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Vyd. 1. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN ISBN 9788001033517.
- [20] MATRAS, J. Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnost při pájení v parách. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.
- [21] MACH, Pavel. Pájení [online]. [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/44479/mod_resource/content/1/Pájení.pdf
- [22] doc. Ing. Jaromír MORAVEC, Ph.D., Teorie svařování, pájení a tepelného dělení Přednáška č. 13., Presentation presented at: [Katedra strojírenské technologie, E-E311; 2023 Mar 5; Liberec, Czechia.]
- [23] STK PRAHA. Pájení. Spálená 51, 113 02 Praha 01: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988. L13-B3III-31 F/22871.
- [24] Mechanizované pájení plamenem s více hořáky [online]. [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.aluminium-brazing.com/2018/11/19/aluminium-flame-brazing-basics-part-1/>

- [25] Různé druhy induktorů pro indukční pájení [online]. [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://kaybrazing.com/brazing-articles/1000927-induction-brazing-vs-vacuum-brazing/>
- [26] MÍŠEK, Bohumil. Metody nedestruktivního zkoušení kovových materiálů a výrobků. Brno: TESYDO, 2014. ISBN 978-80-87102-09-1.
- [27] KOLAŘÍK, Ladislav. Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů [online prezentace]. Praha: Ústav strojírenské technologie, ČVUT [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/zkousky_svaru_ndt.pdf
- [28] ČSN EN 12799 (05 5922) Tvrdé pájení – Nedestruktivní zkoušení pájených spojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 28 s. Třídící znak 055922.
- [29] ČSN EN 12797 (05 5922) Tvrdé pájení – Destruktivní zkoušení pájených spojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 28 s. Třídící znak 055922.
- [30] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. Strojírenská technologie 1. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN 978-80-7183-265-2.
- [31] Zkoušky tvrdosti. Ateam [online]. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [32] KOPEČEK, Jaromír. Schéma interakční oblasti. In: FZÚ AV ČR [online]. Česká republika: 2017 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <http://utf.mff.cuni.cz/~jobdr/download/U3V/2017-8/SEM.pdf>
- [33] Co je to CT skenování – úvod (I). 3D scan [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/co-je-to-ct-skenovani-uvod-i/>
- [34] CANTATORE, Angela; MÜLLER, Pavel. Introduction to computed tomography. 2011.
- [35] Přesná rozbrušovací pila Brillant 220 [online]. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://www.qatm.com/files/104163/brillant-220.pdf>
- [36] Metalografický lis Opal X-press [online]. [cit. 2024-04-09]. Dostupné z: https://www.qatm.com/news/news-details/news_detail/new-opal-x-press-modular-mounting-press-1

[37] Automatická bruska/leštička Saphir 550 [online]. [cit. 2024-04-09].

Dostupné z:<https://www.qatm.com/products/grinding-polishing-etching/automatic-grinder-polisher/saphir-550-rubin-520/>

Seznam příloh

- Příloha č. 1** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek NG01
- Příloha č. 2** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek NG02
- Příloha č. 3** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek OK01
- Příloha č. 4** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek OK02
- Příloha č. 5** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek Č1
- Příloha č. 6** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek Č2
- Příloha č. 7** Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek V1
- Příloha č. 8** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG01 vs OK01
(všechny řady, měření č.2)
- Příloha č. 9** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG02 vs OK02
(všechny řady, měření č.1)
- Příloha č. 10** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG02 vs OK02
(všechny řady, měření č.2)
- Příloha č. 11** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č1 vs Č2
(všechny řady, měření č.1)
- Příloha č. 12** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č1 vs Č2
(všechny řady, měření č.2)
- Příloha č. 13** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č1 vs NG01
(všechny řady, měření č.2)
- Příloha č. 14** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č2 vs NG02
(všechny řady, měření č.1)
- Příloha č. 15** Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č2 vs NG02
(všechny řady, měření č.1)
- Příloha č. 16** Katalogový list pro materiál EN AW-6063

Příloha č. 1 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek NG01

| Vzorek NG01 | | | | | |
|----------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------|
| | Vzdálenost vpichu [mm] | Vnější řada [HV] | Střední řada [HV] | Vzdálenost vpichu [mm] | Závit [HV] |
| | Měření číslo 1 | 0 | 61,6 | 61,9 | -0,40 |
| 0,3 | | 61,1 | 61,4 | 0,35 | 59,1 |
| 0,6 | | 60,6 | 61,3 | 1,10 | 63,4 |
| 0,9 | | 59,4 | 59,3 | 1,85 | 63,2 |
| 1,2 | | 61,2 | 61,6 | 2,60 | 60,9 |
| 1,5 | | 61,1 | 60,7 | 3,35 | 61,3 |
| 1,8 | | 61,3 | 60,3 | 4,10 | 61,3 |
| 2,1 | | 61,6 | 62,8 | | |
| 2,4 | | 62,3 | 60,3 | | |
| 2,7 | | 61 | 60 | | |
| 3 | | 61,6 | 59,3 | | |
| 3,3 | | 60,6 | 60 | | |
| 3,6 | | 60,1 | 61,4 | | |
| 3,9 | | 61,5 | 60,6 | | |
| 4,2 | | 61,8 | 61,6 | | |
| Měření číslo 2 | 0 | 61,9 | 61,7 | -0,40 | 60,5 |
| | 0,3 | 61,7 | 62,5 | 0,35 | 61,8 |
| | 0,6 | 62,1 | 61,9 | 1,10 | 60,9 |
| | 0,9 | 62,4 | 60,7 | 1,85 | 60,8 |
| | 1,2 | 61,8 | 62,1 | 2,60 | 62,5 |
| | 1,5 | 62,3 | 60,8 | 3,35 | 61,9 |
| | 1,8 | 63 | 60,7 | 4,10 | 60,3 |
| | 2,1 | 62 | 60,5 | | |
| | 2,4 | 61,1 | 61,9 | | |
| | 2,7 | 62,5 | 61,4 | | |
| | 3 | 60,6 | 62,7 | | |
| | 3,3 | 61,1 | 62,4 | | |
| | 3,6 | 60,1 | 60,7 | | |
| | 3,9 | 62,2 | 60,7 | | |
| | 4,2 | 63,4 | 61,4 | | |

Příloha č. 2 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek NG02

| Vzorek NG02 | | | | | |
|----------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------|
| Měření číslo 1 | Vzdálenost vpichu [mm] | Vnější řada [HV] | Střední řada [HV] | Vzdálenost vpichu [mm] | Závit [HV] |
| | 0 | 60,4 | 63,9 | -0,40 | 61,2 |
| | 0,3 | 58,4 | 60,7 | 0,35 | 62,1 |
| | 0,6 | 61 | 61,1 | 1,10 | 61,8 |
| | 0,9 | 58,9 | 63 | 1,85 | 63,5 |
| | 1,2 | 59,7 | 62,3 | 2,60 | 61,1 |
| | 1,5 | 59,2 | 61,6 | 3,35 | 62 |
| | 1,8 | 63,4 | 60,7 | 4,10 | 64,3 |
| | 2,1 | 64,7 | 61,2 | | |
| | 2,4 | 62,9 | 60,7 | | |
| | 2,7 | 64,3 | 62,4 | | |
| | 3 | 61,8 | 60,9 | | |
| | 3,3 | 64,3 | 62,3 | | |
| | 3,6 | 64,3 | 62 | | |
| | 3,9 | 63,8 | 62,5 | | |
| 4,2 | 63,8 | 61,4 | | | |
| Měření číslo 2 | 0 | 61,4 | 61,1 | -0,40 | 61,7 |
| | 0,3 | 61,3 | 61,6 | 0,35 | 62,4 |
| | 0,6 | 61,7 | 61,6 | 1,10 | 61,5 |
| | 0,9 | 61,7 | 61,8 | 1,85 | 61,5 |
| | 1,2 | 62,4 | 61,4 | 2,60 | 61,9 |
| | 1,5 | 61,1 | 61,4 | 3,35 | 62,9 |
| | 1,8 | 62,8 | 62 | 4,10 | 62,5 |
| | 2,1 | 63,6 | 63,1 | | |
| | 2,4 | 60,7 | 64,5 | | |
| | 2,7 | 61,4 | 61,3 | | |
| | 3 | 62,6 | 60,6 | | |
| | 3,3 | 61,7 | 63,2 | | |
| | 3,6 | 61 | 61,8 | | |
| | 3,9 | 60,8 | 61,4 | | |
| | 4,2 | 61,9 | 62,4 | | |

Příloha č. 3 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek OK01

| Vzorek OK01 | | | | | |
|----------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------|
| Měření číslo 1 | Vzdálenost vpichu [mm] | Vnější řada [HV] | Střední řada [HV] | Vzdálenost vpichu [mm] | Závit [HV] |
| | 0 | 62,4 | 61,4 | -0,40 | 61,4 |
| | 0,3 | 60,7 | 60,9 | 0,35 | 63 |
| | 0,6 | 61,6 | 60,2 | 1,10 | 60,5 |
| | 0,9 | 59,7 | 61,5 | 1,85 | 60,1 |
| | 1,2 | 60,4 | 61,6 | 2,60 | 60,9 |
| | 1,5 | 60,4 | 60,6 | 3,35 | 60,4 |
| | 1,8 | 61 | 60,6 | 4,10 | 60,6 |
| | 2,1 | 61,4 | 63,9 | | |
| | 2,4 | 61,4 | 61,7 | | |
| | 2,7 | 60,9 | 60,5 | | |
| | 3 | 60,3 | 61,3 | | |
| | 3,3 | 61,5 | 64,9 | | |
| | 3,6 | 61,3 | 61,3 | | |
| | 3,9 | 59,7 | 61,9 | | |
| | 4,2 | 60,8 | 60,8 | | |
| Měření číslo 2 | 0 | 61,9 | 61,4 | -0,40 | 60,8 |
| | 0,3 | 60,8 | 62,1 | 0,35 | 61 |
| | 0,6 | 59,8 | 61,6 | 1,10 | 61,7 |
| | 0,9 | 60,7 | 61,4 | 1,85 | 60,8 |
| | 1,2 | 61,8 | 59,8 | 2,60 | 62,5 |
| | 1,5 | 62,3 | 61,2 | 3,35 | 61,9 |
| | 1,8 | 63 | 61,4 | 4,10 | 62,1 |
| | 2,1 | 62 | 60,5 | | |
| | 2,4 | 61,1 | 61,9 | | |
| | 2,7 | 62,5 | 61,4 | | |
| | 3 | 60,9 | 62,7 | | |
| | 3,3 | 61,4 | 60,6 | | |
| | 3,6 | 59,9 | 60,7 | | |
| | 3,9 | 61,7 | 60,7 | | |
| | 4,2 | 60,4 | 60,8 | | |

Příloha č. 4 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek OK02

| Vzorek OK02 | | | | | |
|----------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------|
| | Vzdálenost vpichu [mm] | Vnější řada [HV] | Střední řada [HV] | Vzdálenost vpichu [mm] | Závit [HV] |
| | Měření číslo 1 | 0 | 61,2 | 61,3 | -0,40 |
| 0,3 | | 61,4 | 60,9 | 0,35 | 59,4 |
| 0,6 | | 60,7 | 61,3 | 1,10 | 62,8 |
| 0,9 | | 60,8 | 59,6 | 1,85 | 63,1 |
| 1,2 | | 62,1 | 61,6 | 2,60 | 60,6 |
| 1,5 | | 60,8 | 60,7 | 3,35 | 61,3 |
| 1,8 | | 60,6 | 60,3 | 4,10 | 61,4 |
| 2,1 | | 61,1 | 62,8 | | |
| 2,4 | | 61,7 | 60,3 | | |
| 2,7 | | 61,2 | 60 | | |
| 3 | | 61,6 | 59,3 | | |
| 3,3 | | 60,8 | 60 | | |
| 3,6 | | 61,3 | 61,2 | | |
| 3,9 | | 62 | 60,8 | | |
| 4,2 | | 61,8 | 61,2 | | |
| Měření číslo 2 | 0 | 61,8 | 61,7 | -0,40 | 60,3 |
| | 0,3 | 61,3 | 62,5 | 0,35 | 61,4 |
| | 0,6 | 62,3 | 61,9 | 1,10 | 61,2 |
| | 0,9 | 61,3 | 60,7 | 1,85 | 60,6 |
| | 1,2 | 62,4 | 62,1 | 2,60 | 62,3 |
| | 1,5 | 62,1 | 60,8 | 3,35 | 61,8 |
| | 1,8 | 62,2 | 60,7 | 4,10 | 60,5 |
| | 2,1 | 61,9 | 60,5 | | |
| | 2,4 | 61,3 | 61,9 | | |
| | 2,7 | 62,1 | 61,4 | | |
| | 3 | 60,6 | 62,7 | | |
| | 3,3 | 61,3 | 62,4 | | |
| | 3,6 | 60,7 | 60,7 | | |
| | 3,9 | 62,2 | 60,7 | | |
| | 4,2 | 62,8 | 61,4 | | |

Příloha č. 5 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek Č1

| Vzorek Č1 | | | | | |
|----------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------|
| Měření číslo 1 | Vzdálenost vpichu [mm] | Vnější řada [HV] | Střední řada [HV] | Vzdálenost vpichu [mm] | Závit [HV] |
| | 0 | 71,8 | 71,5 | -0,40 | 71,6 |
| | 0,3 | 72,4 | 73 | 0,35 | 72,8 |
| | 0,6 | 71,1 | 72,2 | 1,10 | 71,3 |
| | 0,9 | 70,9 | 71 | 1,85 | 73,2 |
| | 1,2 | 73 | 70,9 | 2,60 | 71,1 |
| | 1,5 | 71,9 | 73,1 | 3,35 | 72 |
| | 1,8 | 72,7 | 71,8 | 4,10 | 71,4 |
| | 2,1 | 70,8 | 72,5 | | |
| | 2,4 | 73,1 | 73 | | |
| | 2,7 | 72,1 | 70,7 | | |
| | 3 | 71,4 | 72,3 | | |
| | 3,3 | 70,7 | 71,2 | | |
| | 3,6 | 72,9 | 73 | | |
| | 3,9 | 71,7 | 72,1 | | |
| | 4,2 | 73,2 | 71,9 | | |
| Měření číslo 2 | 0 | 72,8 | 72,4 | -0,40 | 73 |
| | 0,3 | 71,3 | 71,1 | 0,35 | 71,9 |
| | 0,6 | 73,2 | 70,9 | 1,10 | 72,7 |
| | 0,9 | 71,1 | 73 | 1,85 | 70,8 |
| | 1,2 | 72 | 71,9 | 2,60 | 73,1 |
| | 1,5 | 73 | 72,7 | 3,35 | 72,1 |
| | 1,8 | 71,7 | 70,8 | 4,10 | 71,4 |
| | 2,1 | 72,4 | 73,1 | | |
| | 2,4 | 71,5 | 72,1 | | |
| | 2,7 | 70,7 | 71,4 | | |
| | 3 | 72,1 | 70,7 | | |
| | 3,3 | 73,1 | 72,9 | | |
| | 3,6 | 71,9 | 71,7 | | |
| | 3,9 | 72,6 | 73,2 | | |
| | 4,2 | 71,6 | 71,3 | | |

Příloha č. 6 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek Č2

| Vzorek Č2 | | | | | |
|----------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------------|------------|
| | Vzdálenost vpichu [mm] | Vnější řada [HV] | Střední řada [HV] | Vzdálenost vpichu [mm] | Závit [HV] |
| | Měření číslo 1 | 0 | 71,5 | 70,4 | -0,40 |
| 0,3 | | 72,9 | 71,2 | 0,35 | 71,7 |
| 0,6 | | 70,7 | 72,8 | 1,10 | 70,6 |
| 0,9 | | 73,2 | 73 | 1,85 | 72,1 |
| 1,2 | | 70,6 | 71,9 | 2,60 | 73,2 |
| 1,5 | | 71,8 | 72,5 | 3,35 | 71,3 |
| 1,8 | | 73 | 70,3 | 4,10 | 70,7 |
| 2,1 | | 71,1 | 73,2 | | |
| 2,4 | | 72,4 | 71,4 | | |
| 2,7 | | 73,1 | 72,7 | | |
| 3 | | 70,9 | 70,8 | | |
| 3,3 | | 71,3 | 72,2 | | |
| 3,6 | | 73,3 | 73,1 | | |
| 3,9 | | 72 | 71,6 | | |
| 4,2 | | 72,3 | 70,5 | | |
| Měření číslo 2 | 0 | 70,7 | 72,3 | -0,40 | 72,3 |
| | 0,3 | 73,2 | 70,3 | 0,35 | 73 |
| | 0,6 | 71,8 | 73,2 | 1,10 | 71,7 |
| | 0,9 | 73 | 71,4 | 1,85 | 72,1 |
| | 1,2 | 71,1 | 72,4 | 2,60 | 73,2 |
| | 1,5 | 72,4 | 70,8 | 3,35 | 70,6 |
| | 1,8 | 73,1 | 72,2 | 4,10 | 71,3 |
| | 2,1 | 70,9 | 73,1 | | |
| | 2,4 | 71,3 | 71,6 | | |
| | 2,7 | 73,3 | 70,8 | | |
| | 3 | 72 | 71,2 | | |
| | 3,3 | 71,5 | 73 | | |
| | 3,6 | 72,9 | 71,9 | | |
| | 3,9 | 70,6 | 72,8 | | |
| | 4,2 | 71,4 | 70,4 | | |

Příloha č. 7 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti pro vzorek V1

| Vzorek V1 | | | |
|----------------|------------------------|-------------|------------|
| Měření číslo 1 | Vzdálenost vpichu [mm] | Průřez [HV] | Okraj [HV] |
| | 0 | 57,1 | 57,1 |
| | 0,3 | 58,3 | 55,1 |
| | 0,6 | 60,7 | 56,9 |
| | 0,9 | 61,5 | 54,3 |
| | 1,2 | 59,8 | 56 |
| | 1,5 | 62 | 59 |
| | 1,8 | 58,9 | 56,8 |
| | 2,1 | 61 | 55,7 |
| | 2,4 | 60,2 | |
| | 2,7 | 58,6 | |
| | 3 | 59,4 | |
| | 3,3 | 62,2 | |
| | 3,6 | 61,7 | |
| | 3,9 | 60 | |
| | 4,2 | 58,2 | |
| | 4,5 | 62,5 | |
| 4,8 | 59,6 | | |
| 5,1 | 55,2 | | |
| 5,4 | 51,1 | | |

Příloha č. 8 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG01 vs OK01 (všechny řady, měření č.2)

| VZORKY OK_01 VS NG_01 PRO MĚŘENÍ Č.2 | | |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK01_vnější řada</i> | <i>NG_01_vnější_řada</i> |
| Stř. hodnota | 61,34666667 | 61,88 |
| Rozptyl | 0,88552381 | 0,758857143 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,822190476 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -1,610805629 | |
| P(T<=t) (1) | 0,059219701 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,118439401 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK1_střední řada</i> | <i>NG01_střední_řada</i> |
| Stř. hodnota | 61,21333333 | 61,47333333 |
| Rozptyl | 0,524095238 | 0,57352381 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,548809524 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -0,961154404 | |
| P(T<=t) (1) | 0,172350941 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,344701882 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závit OK_01</i> | <i>Závit NG_01</i> |
| Stř. hodnota | 61,54285714 | 61,24285714 |
| Rozptyl | 0,462857143 | 0,67952381 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 0,571190476 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | 0,742616848 | |
| P(T<=t) (1) | 0,236000582 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 0,472001163 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 9 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG02 vs OK02 (všechny řady, měření č.1)

| VZORKY OK_02 VS NG_02 PRO MĚŘENÍ Č.1 | | |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK2_vnější řada</i> | <i>NG_02_vnější_řada</i> |
| Stř. hodnota | 61,27333333 | 62,06 |
| Rozptyl | 0,234952381 | 5,118285714 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 2,676619048 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -1,316825105 | |
| P(T<=t) (1) | 0,099286913 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,198573826 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK2_střední řada</i> | <i>NG02_střední_řada</i> |
| Stř. hodnota | 60,75333333 | 61,78 |
| Rozptyl | 0,779809524 | 0,908857143 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,844333333 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -1,059871059 | |
| P(T<=t) (1) | 0,002420723 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,004841445 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závit OK_02</i> | <i>Závit NG_02</i> |
| Stř. hodnota | 61,17142857 | 62,28571429 |
| Rozptyl | 2,062380952 | 1,411428571 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 1,736904762 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | -1,581767259 | |
| P(T<=t) (1) | 0,069843817 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 0,139687633 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 10 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky NG02 vs OK02 (všechny řady, měření č.2)

| VZORKY OK_02 VS NG_02 PRO MĚŘENÍ Č.2 | | |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK2_vnější_řada</i> | <i>NG_02_vnější_řada</i> |
| Stř. hodnota | 61,75333333 | 61,74 |
| Rozptyl | 0,409809524 | 0,652571429 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,531190476 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 0,05010075 | |
| P(T<=t) (1) | 0,480198898 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,960397797 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>OK2_střední_řada</i> | <i>NG02_střední_řada</i> |
| Stř. hodnota | 61,47333333 | 61,94666667 |
| Rozptyl | 0,57352381 | 0,982666667 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,778095238 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -1,469539766 | |
| P(T<=t) (1) | 0,076416978 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,152833955 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závit OK_02</i> | <i>Závit NG_02</i> |
| Stř. hodnota | 61,15714286 | 62,05714286 |
| Rozptyl | 0,542857143 | 0,29952381 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 0,421190476 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | -1,59440194 | |
| P(T<=t) (1) | 0,011733392 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 0,023466784 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 11 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č1 vs Č2 (všechny řady, měření č.1)

| VZORKY Č1 VS Č2 PRO MĚŘENÍ Č.1 | | |
|---|-----------------|-----------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | Č1_vnější_řada | Č2_vnější_řada |
| Stř. hodnota | 71,98 | 72,00666667 |
| Rozptyl | 0,768857143 | 0,917809524 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,843333333 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | -0,079524277 | |
| P(T<=t) (1) | 0,468590637 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,937181274 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | Č1_střední_řada | Č2_střední_řada |
| Stř. hodnota | 72,01333333 | 71,84 |
| Rozptyl | 0,674095238 | 1,071142857 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,872619048 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 0,508159883 | |
| P(T<=t) (1) | 0,307660757 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,615321514 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | Závit Č1 | Závit Č2 |
| Stř. hodnota | 71,91428571 | 71,8 |
| Rozptyl | 0,641428571 | 1,066666667 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 0,854047619 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | 0,231358216 | |
| P(T<=t) (1) | 0,410467221 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 0,820934442 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 12 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č1 vs Č2 (všechny řady, měření č.2)

| VZORKY Č1 VS Č2 PRO MĚŘENÍ Č.2 | | |
|---|------------------------|------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č1_vnější řada</i> | <i>Č2_vnější řada</i> |
| Stř. hodnota | 72,06666667 | 71,94666667 |
| Rozptyl | 0,58952381 | 0,934095238 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,761809524 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 0,376520545 | |
| P(T<=t) (1) | 0,354684088 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,709368176 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č1_střední řada</i> | <i>Č2_střední řada</i> |
| Stř. hodnota | 71,94666667 | 71,82666667 |
| Rozptyl | 0,798380952 | 0,97352381 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,885952381 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 0,349145692 | |
| P(T<=t) (1) | 0,36479603 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 0,729592059 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závit Č1</i> | <i>Závit Č2</i> |
| Stř. hodnota | 72,14285714 | 72,02857143 |
| Rozptyl | 0,72952381 | 0,845714286 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 0,787619048 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | 0,240917232 | |
| P(T<=t) (1) | 0,406843146 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 0,813686292 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 13 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č1 vs NG01 (všechny řady, měření č.2)

| VZORKY Č1 VS NG01 PRO MĚŘENÍ Č.2 | | |
|---|------------------------|---------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č1_vnější_řada</i> | <i>NG_01_vnější_řada</i> |
| Stř. hodnota | 72,06666667 | 61,88 |
| Rozptyl | 0,58952381 | 0,758857143 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,674190476 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 33,97593524 | |
| P(T<=t) (1) | 1,31827E-24 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 2,63653E-24 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č1_střední_řada</i> | <i>NG_01_střední_řada</i> |
| Stř. hodnota | 71,94666667 | 61,47333333 |
| Rozptyl | 0,798380952 | 0,57352381 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,685952381 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 34,63128239 | |
| P(T<=t) (1) | 7,81453E-25 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 1,56291E-24 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závit Č1</i> | <i>Závit NG_01</i> |
| Stř. hodnota | 72,14285714 | 61,24285714 |
| Rozptyl | 0,72952381 | 0,67952381 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 0,70452381 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | 24,29476389 | |
| P(T<=t) (1) | 7,12054E-12 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 1,42411E-11 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 14 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č2 vs NG02 (všechny řady, měření č.1)

| VZORKY Č2 VS NG02 PRO MĚŘENÍ Č.1 | | |
|---|------------------------|--------------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č2_vnější_řada</i> | <i>NG_02_vnější_řada</i> |
| Stř. hodnota | 72,00666667 | 62,06 |
| Rozptyl | 0,917809524 | 5,118285714 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 3,018047619 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 15,67996727 | |
| P(T<=t) (1) | 1,07157E-15 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 2,14314E-15 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Č2_střední_řada</i> | <i>NG02_střední_řada</i> |
| Stř. hodnota | 71,84 | 61,78 |
| Rozptyl | 1,071142857 | 0,908857143 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,99 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 27,68923869 | |
| P(T<=t) (1) | 3,45247E-22 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 6,90494E-22 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | <i>Závit Č2</i> | <i>Závit NG_02</i> |
| Stř. hodnota | 71,8 | 62,28571429 |
| Rozptyl | 1,066666667 | 1,411428571 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 1,239047619 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | 15,9906535 | |
| P(T<=t) (1) | 9,33217E-10 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 1,86643E-09 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 15 Kompletní dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů pro vzorky Č2 vs NG02 (všechny řady, měření č.1)

| VZORKY Č2 VS NG02 PRO MĚŘENÍ Č.2 | | |
|---|-----------------|-------------------|
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | Č2_vnější_řada | NG_02_vnější_řada |
| Stř. hodnota | 71,94666667 | 61,74 |
| Rozptyl | 0,934095238 | 0,652571429 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,793333333 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 31,38244036 | |
| P(T<=t) (1) | 1,15257E-23 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 2,30513E-23 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | Č2_střední_řada | NG02_střední_řada |
| Stř. hodnota | 71,82666667 | 61,94666667 |
| Rozptyl | 0,97352381 | 0,982666667 |
| Pozorování | 15 | 15 |
| Společný rozptyl | 0,978095238 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 28 | |
| t Stat | 27,35879744 | |
| P(T<=t) (1) | 4,7763E-22 | |
| t krit (1) | 1,701130934 | |
| P(T<=t) (2) | 9,55259E-22 | |
| t krit (2) | 2,048407142 | |
| Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů | | |
| | Závit Č2 | Závit NG_02 |
| Stř. hodnota | 72,02857143 | 62,05714286 |
| Rozptyl | 0,845714286 | 0,29952381 |
| Pozorování | 7 | 7 |
| Společný rozptyl | 0,572619048 | |
| Hyp. rozdíl stř. hodnot | 0 | |
| Rozdíl | 12 | |
| t Stat | 24,65236048 | |
| P(T<=t) (1) | 5,99449E-12 | |
| t krit (1) | 1,782287556 | |
| P(T<=t) (2) | 1,1989E-11 | |
| t krit (2) | 2,17881283 | |

Příloha č. 16 Katalogový list pro materiál EN AW-6063



| Data Sheet | | Internal alloy name: 6063 | | | | | | | |
|---|---|---|----------------------------------|---|-----------------------------|---|------|----------------|----------|
| EN AW 6063 - Profiles Alumeco A/S | | International alloy name: EN AW 6063 Chemical Symbol: EN AW – AlMg0,7Si | | | | | | | |
| | | DIN-Werkstoff no.: 3.3208 Alloy type: Heat treatable alloy | | | | | | | |
| Main usage <ul style="list-style-type: none"> • Constructions • Anodizing in general • Automotive • Forgings • Marine and offshore | Main properties <ul style="list-style-type: none"> • Very good atmospheric corrosion resistance • Very good workability • Decoration anodisation • Heat treatable alloys (Soft T4 temper) | Important norms and literature Extrusion: EN 755-1: Technical conditions for inspection and delivery EN 755-2: Mechanical properties Series EN 755-3 to EN 755-9: Tolerances on dimensions and forms for different extrusions Usages: EN 13195: Specifications for wrought products for marine applications EN 602: Usage in the food industry Chemical composition: EN 573-3: Chemical composition | | | | | | | |
| Chemical composition (%) EN 573-3 | | | | | | | | | |
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Other elements | |
| 0.20-0.60 | 0.35 | 0.10 | 0.10 | 0.45-0.90 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | Each | together |
| | | | | | | | | 0.05 | 0.15 |
| Typical mechanical properties EN 755 - 2 | | | | | | | | | |
| Product group Dimension (mm) | Temper | Rm MPa | Rp0,2 MPa | A % min. | Hardness* HB | | | | |
| Rod/Bar ≤ 150 | T4 | Min. 130 | Min. 65 | 14 | 50 | | | | |
| Rod/Bar ≤ 150 | T6 | Min. 215 | Min. 170 | 10 | 75 | | | | |
| Tubes Wall thickness ≤ 25 | T6 | Min. 215 | Min. 170 | 10 | 75 | | | | |
| Profiles Wall thickness ≤ 25 | T4 | Min. 130 | Min. 65 | 14 | 50 | | | | |
| Profiles Wall thickness ≤ 10 | T6 | Min. 215 | Min. 170 | 8 | 75 | | | | |
| * Information values only | | | | | | | | | |
| Physical properties | | | | | | | | | |
| Density g/cm ³ | Solidification range °C | Electrical conductivity %IACS | Thermal conductivity W/m K | Thermal expansion (µm m ⁻¹ K ⁻¹) | Annealing temperature °C | E - modulus (N / mm ²) | | | |
| 2.70 | 615-655 | 52 | 201 | 23.5 | 350-400 | 69,500 | | | |
| Typical Alumeco products with this alloy <ul style="list-style-type: none"> • Bars in various dimensions and form • Angle profiles • Tubes • Profiles • Customized profiles | | | | | | | | | |
| Properties and information (3 high/good; 2 medium; 1 poor/bad) | | | | | | | | | |
| Resistance Corrosion index, general: 3 Marine atm. corr. index: 3 Hot workability Extrusion: 3 Forging: 3 Cold formability Cold formability general: 2 Deep drawing: 1 Bending: 2 – 3 (Depending on the temper) | | Weldability TIG welding: 2 MIG welding: 2 Solderability 2 | | Machinability Machinability index: 1 | | Anodizing Decorative anodizing surface treatment: 3 Protective anodizing index: 3 Hard anodizing: 3 Color anodizing: 3 | | | |