



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV STÁŘÍ HLINÍKU NA SVAŘOVÁNÍ A JINÉ TECHNOLOGICKÉ PROCESY

THE EFFECT OF ALUMINUM AGE ON WELDING AND OTHER TECHNOLOGICAL PROCESSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Anna Hanáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček, IWE

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Bc. Anna Hanáková
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubiček, IWE
Akademický rok:	2022/23

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

Vliv stárí hliníku na svařování a jiné technologické procesy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dopravní systémy využívají hliníkové konstrukce nebo komponenty z důvodů snížení hmotnosti zařízení. Speciálně kolejová vozidla pro osobní dopravu se dnes převážně vyrábějí z protlačovaných hliníkových profilů různých tvarů. Vytvrzené hliníkové slitiny však časem stárnou a mění své vlastnosti. DP je zaměřena na ověření mechanických hodnot a technologické zpracovatelnosti dlouhodobě skladovaných Al profilů. Prioritním pohledem je posouzení svařitelnosti a tvářecích schopností skladovaných materiálů.

Cíle diplomové práce:

- vypracování literární studie zaměřené na řešenou problematiku
- výběr vhodného typu hliníkových profilů pro technologické zkoušky
- provedení experimentu
- technické a ekonomické vyhodnocení zkoušek

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook: Welding, Brazing, and Soldering. Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

MICHNA, Š. a kol. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. 700 s. Adin Prešov, 2005. ISBN 80-89041-88-4.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 1999. 249 s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. 1. vyd. Zeross, Ostrava, 2000. 214 s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním změn vlastností hliníkových slitin s ohledem na stáří materiálu. Jako zkoušený materiál byla zvolena hliníková slitina EN AW 6060 o různém stáří. Jednalo se o tvarové nebo ploché protlačované profily poskytnuté společností Pars Komponenty, s.r.o. Nejprve byla vypracována literární rešerše zabývající se vlastnostmi a rozdělením hliníku a jeho slitin, jejich tepelným zpracováním a možnostmi svařování. Teoretická část týkající se svařování se zaměřuje zejména na problémy svařování hliníkových slitin a vady vzniklých svarových spojů. V návaznosti na tuto problematiku jsou popsány materiálové zkoušky základních materiálů a svarových spojů jako nástroje pro odhalování vad a zjišťování mechanických a technologických vlastností materiálu. V praktické části byly vzorky svařeny metodou TIG a dále byly provedeny zkoušky tvrdosti, zkouška tahem, ohybem a makroskopická zkouška. Výsledky byly technicky a ekonomicky vyhodnoceny.

Klíčová slova

slitiny hliníku, svařování, mechanické vlastnosti, technologické vlastnosti, stáří materiálu

ABSTRACT

This thesis deals with the investigation of changes in the properties of aluminium alloys with respect to the age of the material. Aluminium alloy EN AW 6060 of different ages was chosen as the tested material. The alloy was in form of shaped or flat extruded profiles provided by company Pars Komponenty, s.r.o. First, a theoretical basics about the properties and division of aluminium and its alloys were presented, their heat treatment and welding options were presented as well. The theoretical part concerning welding focuses mainly on the problems of welding aluminium alloys and defects of the welded joints. In connection with this issue, material tests of basic materials and welded joints are described as a tool for detecting defects and determining the mechanical and technological properties of the material. In the experimental part, the profiles were TIG welded. Next, hardness, tensile, bending and macroscopic tests were performed. The results were technically and economically evaluated.

Keywords

aluminium alloys, welding, mechanical properties, technological properties, age of the material

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANÁKOVÁ, Anna. Vliv stáří hliníku na svařování a jiné technologické procesy [online]. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149291>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv stáří hliníku na svařování a jiné technologické procesy vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně, 26.5. 2023

místo, datum

Bc. Anna Hanáková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jaroslavu Kubíčkoví, IWE za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této diplomové práce. Dále děkuji firmě Pars Komponenty s.r.o. za poskytnuté vzorky a informace pro vypracování diplomové práce.

Také děkuji své rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Vlastnosti hliníku a hliníkových slitin.....	11
1.2 Označování hliníkových slitin.....	12
1.3 Tepelné zpracování.....	14
1.4 Výroba hliníkových profilů	18
1.5 Vývoj nových hliníkových slitin	19
2 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN	22
2.1 Svařování metodou MIG	22
2.2 Svařování metodou TIG	23
2.2.1 Netavící se wolframové elektrody a svařovací hořák.....	23
2.2.2 Druhy svařovacích proudů.....	24
2.3 Podmínky obloukového svařování hliníkových slitin	25
2.4 Ostatní způsoby svařování.....	27
2.5 Vady a problémy při svařování hliníkových slitin	28
3 PRAKTICKÁ ČÁST	35
3.1 Měření tvrdosti	40
3.1.1 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti	42
3.2 Zkouška tvrdosti svarového kovu a materiálu v TOO.....	44
3.3 Zkouška tahem	47
3.3.1 Vyhodnocení zkoušky tahem.....	47
3.4 Zkouška ohybem	49
3.4.1 Vyhodnocení zkoušky ohybem	49
3.5 Makroskopická zkouška	51
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	55
4.1 Technické zhodnocení	55
4.2 Ekonomické zhodnocení	56
4.2.1 Výpočet nákladů na svařování.....	57
ZÁVĚR.....	61

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

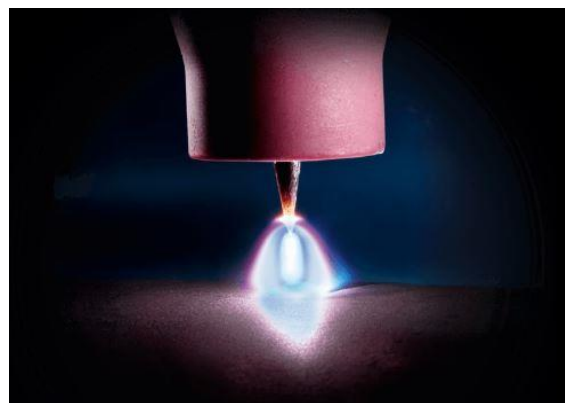
ÚVOD

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem na Zemi, a kromě oceli patří k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Výroba hliníku započala koncem 19. století a první hliníková slitina, známá jako dural ($AlCu_4Mg$), byla vyvinuta v roce 1906. Obecně vývoj hliníkových slitin znamenal velký rozmach ve stavbě letadel. V dnešní době jsou slitiny využívány v široké škále oblastí od potravinářského průmyslu, spotřebního zboží, elektrotechniku až po strojírenství, zejména pak v automobilovém a obecně v dopravním průmyslu. Často jsou hliníkové slitiny zpracovávány ve formě protlačovaných profilů různých tvarů, jak je vidět na obr. 1.

Hliník a jeho slitiny disponují výhodnou kombinací fyzikálních vlastností, jako jsou nízká měrná hmotnost, dobrá tepelná a elektrická vodivost či poměrně vysoká pevnost. Obecně jsou slitiny dobře svařitelné obloukovými metodami v ochranném inertním plynu jako jsou MIG a TIG (obr. 2). Pro zlepšení mechanických vlastností jsou některé hliníkové slitiny vytvrzovány tepelným zpracováním. U těchto vytvrditelných slitin ale nastávají problémy při svařování způsobené ohřevem, při kterém dochází k rozpouštění vytvrzujících precipitátů a s tím spojenému poklesu mechanických vlastností. Podobný problém může nastat při dlouhodobém skladování vytvrditelných hliníkových slitin, u kterých může docházet ke změně mechanických a technologických vlastností materiálu. Právě této problematice je věnována diplomová práce. Změny vlastností s ohledem na zaručení kvality a bezpečnosti hliníkových svařovaných konstrukcí se posuzují pomocí destruktivních a nedestruktivních zkoušek. Nutnou nedestruktivní zkouškou je především vizuální kontrola. Mechanické vlastnosti jsou kontrolovány destruktivními zkouškami, jako jsou zkouška tahem, ohybem či zkoušky tvrdosti.



Obr. 1 Hliníkové profily [1].



Obr. 2 Svařování metodou TIG [2].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Společnost PARS KOMPONENTY, s.r.o. se zabývá vývojem a výrobou komponentů pro hromadné dopravní prostředky, zejména se jedná o autobusy, trolejbusy a kolejová vozidla, jako jsou tramvaje, vlaky nebo metro, viz obr. 3. Komponenty a konstrukční prvky těchto dopravních prostředků jsou vyráběny především z hliníkových profilů. Ty jsou obecně uplatňovány zejména tam, kde je žádoucí nízká hmotnost, odolnost proti korozi, dobrá tvařitelnost a svařitelnost. Dnešní podoba společnosti Pars Komponenty vznikla v roce 1999 oddělením od původní Vagónky Studénka, odkoupením know-how na výrobu vagónových komponentů a zahájením jejich výroby. Hlavními položkami portfolia společnosti jsou vnější a vnitřní dveře dopravních prostředků, pneumatické a elektrické dveřní systémy, okna, zdvihací plošiny nebo interiérové mezistěny. Ve firmě probíhá celý proces výroby od vývoje až po finální montáž. Ve výrobě jsou využívány i starší profily skladované ve firmě z důvodu rekonstrukce částí dopravních prostředků nebo speciálních požadavků zákazníka. [3]



Obr. 3 Příklad realizace vnějších dveří na vlaku ČD [4].

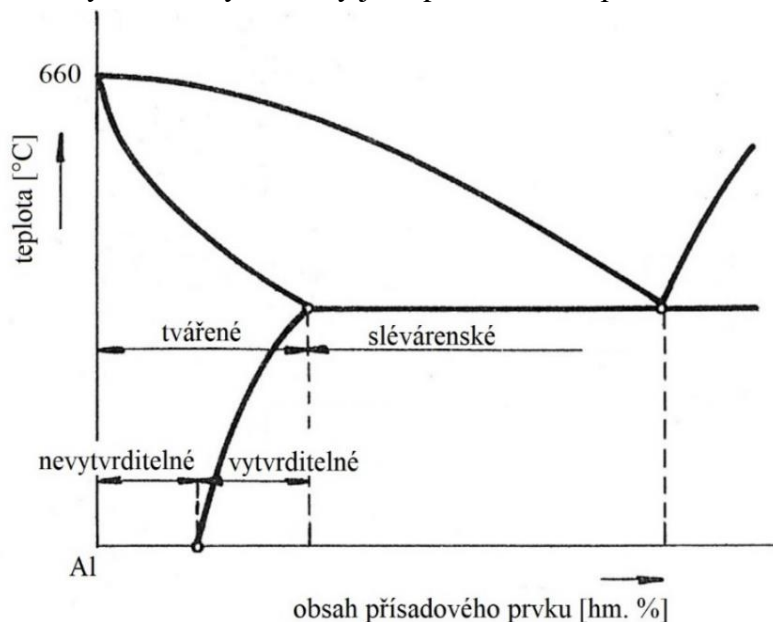
Cílem diplomové práce je ověření mechanických a technologických vlastností dlouho skladovaných hliníkových profilů. Především se jedná o tvářecí schopnosti a svařitelnost, jelikož při svařování dochází k výrazné pórovitosti a praskání svarových spojů. Pro kontrolu je využito destruktivních zkoušek základních materiálů a svarových spojů, jako jsou tahová zkouška, zkouška tvrdosti nebo zkouška ohybem.

Hliník je jedním z nejvyužívanějších a z hlediska roční celosvětové spotřeby jedním z nejdůležitějších neželezných kovů. Základní surovinou pro výrobu hliníku je bauxit, z něhož je hliník získáván elektrolyzou. Díky své nízké hustotě je řazen do skupiny lehkých kovů společně s titanem nebo hořčíkem. V technické praxi je využíván především ve formě slitin s jinými kovy, které vykazují podstatně vyšší mechanické vlastnosti než čistý hliník. Společně s ocelí patří hliníkové slitiny k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Dále jsou hojně využívány pro obalovou techniku, u dopravních prostředků (kostry letounů, karoserie automobilů), v elektrotechnice nebo ve spotřebním průmyslu.

1.1 Vlastnosti hliníku a hliníkových slitin

Čistý hliník disponuje dobrými plastickými vlastnostmi za tepla i za studena. Tyto vlastnosti úzce souvisí s jeho kubickou, plošně centrovanou mřížkou (FCC). Je měkký, tvárný a jeho tažnost se pohybuje kolem 20 %. Za technicky čistý hliník je považován hliník s čistotou minimálně 99 hm. % Al. Nízká pevnost, tvrdost a výše zmíněné plastické vlastnosti výrazně omezují jeho využití jako konstrukční materiál. Z těchto důvodů je nutné hliník legovat vhodnými zpevňujícími prvky, například Cu, Mg, Mn, Si, Zn. Slitiny hliníku pak disponují relativně vysokou pevností (až 500 MPa) a nízkou hmotností, díky malé hustotě hliníku (přibližně $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). [5; 6]

Podle obsahu legujících prvků se dají hliníkové slitiny rozdělit na slitiny pro tváření a slitiny slévárenské, viz obr. 4. Slitiny pro tváření mají obecně nižší obsah legujících prvků, v mikrostruktuře tak převládá plastický tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$ a zlepšuje se tvařitelnost. Slitiny pro tváření lze dále dělit podle možnosti zvýšení mechanických vlastností tepelným zpracováním na nevytvrditelné a vytvrditelné slitiny. Vyšší množství legujících prvků naopak způsobuje vznik křehkých a tvrdých fází. Tyto slitiny jsou proto vhodné pro slévárství. [5]



Obr. 4 Rozdělení slitin Al, podle [7].

Mezi další významné vlastnosti hliníku se řadí výborná tepelná a elektrická vodivost. Elektrická vodivost čistého hliníku dosahuje až 60 % vodivosti mědi, ale přidáváním legujících prvků se výrazně snižuje. Další důležitou technologickou vlastností je korozní odolnost hliníku a jeho slitin, která je dána tvorbou ochranné oxidické vrstvy na povrchu. Vrstva je tvořena teplotně stabilním oxidem Al_2O_3 do tloušťky kolem $5 \mu\text{m}$ a chrání materiál před hloubkovou oxidací a povětrnostními vlivy. [8; 9] Teplota tání Al_2O_3 je $2050 \text{ }^\circ\text{C}$. Přítomnost legujících prvků ovlivňuje korozní odolnost slitin, například měď odolnost zhoršuje, naopak hořčík ji zlepšuje. [8]

Tvařitelnost a obrobitelnost

Technologické vlastnosti určují vhodnost materiálu pro určitý způsob zpracování, souvisí tedy s typem výroby dané součásti. Nejdůležitější technologické vlastnosti jsou obrobitelnost, tvárnost, svařitelnost a slévateľnost. Tvárnost neboli tvařitelnost je především ovlivněna chemickým složením slitiny (legující prvky) a typem mřížky, dále teplotou tváření a případným tepelným zpracováním. Obecně mají hliníkové slitiny výbornou tvařitelnost, což umožňuje výrobu často využívaných protlačovaných profilů. Obrobitelnost není ovlivněna jen mechanickými a fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu, ale i samotnými technickými

parametry procesu a vybavením, jako je například nástroj, řezné síly, chlazení atp. Hliníkové slitiny jsou obecně dobře obrobitelné, řezné síly jsou zpravidla menší než u oceli stejných pevností [9].

Svařitelnost

Svařitelnost je schopnost materiálu vytvářet svarové spoje požadované pevnosti, houževnatosti a čistoty. Je závislá především na chemickém složení spojovaných materiálů. Obecně je svařitelnost technicky čistého hliníku velmi dobrá, a to za předpokladu využití tavného svařování elektrickým obloukem v inertním ochranném plynu [10]. U hliníkových slitin závisí svařitelnost na typu legujícího prvku, tedy jestli je slitina vytvrditelná či nevytvrditelná. Obecně jsou nevytvrditelné slitiny lépe svařitelné, protože obsahují méně legujících prvků, které mají vliv na tvorbu horkých trhlin během svařování. Dalším důležitým faktorem pro svařitelnost je ochranná vrstva Al_2O_3 , která se kvůli své vysoké teplotní odolnosti nerozpouští v tekutém kovu a zhoršuje průběh svařování [10].

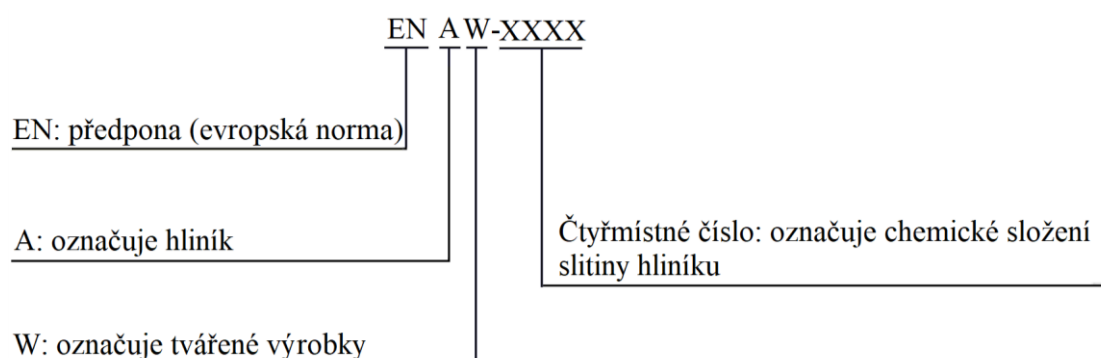
Tab. 1 Shrnutí vybraných vlastností čistého hliníku [5; 6].

Vlastnosti	Hodnoty
mřížka	kubická plošně centrovaná
hustota	2,6989 g·cm ⁻³
teplota tavení	660,4 °C
tepelná vodivost	247 W·m ⁻¹
elektrická vodivost	62 % IACS (Al 99,8)
mez pevnosti v tahu	70 MPa
mez kluzu	20 MPa
tvrdost	20 HB
tažnost	20–30 %

1.2 Označování hliníkových slitin

Označování hliníku a slitin hliníku (obr. 5) podléhá Českým technickým normám. Pro tvářené slitiny se jedná konkrétně o normu ČSN EN 573-1. Evropské označení je tvořeno postupně [11]:

- předponou EN,
- písmenem A identifikujícím hliník,
- písmenem W identifikujícím tvářené výrobky,
- spojovníkem,
- mezinárodním označením obsahujícím čtyři číslice určující chemické složení.



Obr. 5 Grafické znázornění značení hliníkových slitin dle ČSN EN 573-1.

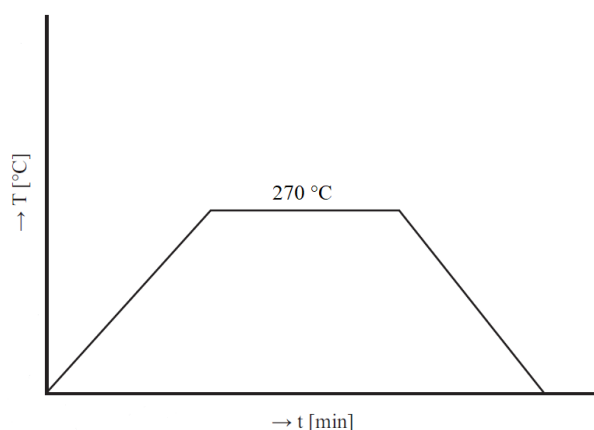
První číslice ve čtyřmístném označení charakterizuje skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků. Zbýlé číslice specifikují chemické složení, či případné modifikace slitiny. Obdobně jsou označovány slitiny na odlitky dle normy ČSN EN 1780-1. Tvářené slitiny jsou podle hlavních slitinových prvků rozděleny do následujících skupin:

- Skupina 1xxx představuje prakticky čistý hliník, minimální obsah hliníku je stanoven na 99,00 %. Druhá číslice označuje mezní obsah doprovodných nebo slitinových prvků. V případě, že je druhá číslice nula, jedná se o nelegovaný hliník. Poslední dvě číslice určují minimální obsah hliníku v procentech (čísllice jsou stejné jako dvě číslice vpravo za desetinnou čárkou minimálního obsahu hliníku v procentech). Tato skupina se vyznačuje výbornou korozní odolností, vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí, nízkými mechanickými vlastnostmi a výbornou obrobiteľností. Mez kluzu se pohybuje do 100 MPa, mez pevnosti maximálně 135 MPa, tažnost až 50 %. Zvýšení pevnosti může být dosaženo mechanickým zpevněním (vytvrzením za studena). Nelegovaný hliník je využíván zejména v elektrotechnickém a chemickém průmyslu nebo jako obalový materiál (fólie). [7; 11]
- Skupina 2xxx představuje slitiny AlCu s obsahem mědi kolem 4,5 %. Hořčík je často druhým legujícím prvkem těchto slitin. Snižující se rozpustnost Cu při ochlazování umožňuje provádět vytvrzování za tepla i za studena. Slitiny AlCu patří mezi tzv. vysokopevné slitiny hliníku, vyznačují se vysokou pevností až 500 MPa. V závislosti na tepelném zpracování mohou být jejich mechanické vlastnosti srovnatelné s nízkouhlíkovou ocelí. Dále se vyznačují nízkou odolností proti korozi a omezenou svařitelností. [7; 8]
- Skupina 3xxx představuje slitiny AlMn, obsah Mn ve slitině obvykle nepřekračuje 2 %. Mangan zvyšuje pevnost (mez pevnosti do 290 MPa), tvárnost za studena a odolnost proti korozi. Slitiny jsou dobře svařitelné a nejsou běžně vytvrditelné. [8]
- Skupina 4xxx představuje slitiny AlSi. Obsah Si kolem 12 % zlepšuje téměř všechny slévárenské technologické vlastnosti, způsobuje lepší tavitelnost nebo zabíhavost a zmenšuje se tepelná roztažnost. Křemík snižuje bod tání bez současného zvýšení křehkosti. Z těchto důvodů jsou slitiny AlSi často využívány jako pájecí slitiny nebo přídavné materiály pro svařování. Mez kluzu se pohybuje kolem 300 MPa, mez pevnosti kolem 330 MPa. [7; 8; 12]
- Skupina 5xxx představuje slitiny AlMg s maximální rozpustností Mg 17,4 % při eutektické teplotě 450 °C, při ochlazování se rozpustnost rychle snižuje. Jako druhý legující prvek je přidáván mangan nebo chrom. Slitiny disponují výbornou tvařitelností, svařitelností, mají dobrou korozní odolnost a vysokou pevnost (mez pevnosti přibližně 415 MPa). Tažnost slitin kolem 15 %. [8; 12]
- Skupina 6xxx představuje slitiny AlMgSi, s obsahem Mg a Si do 1 %. Slitiny je možné tepelně zpracovávat podle T4 (rozpuštěcí žíhání a přirozené stárnutí) nebo T6 (rozpuštěcí žíhání a umělé stárnutí). Ve stavu T4 je materiál dobře tvarovatelný (tažnost kolem 12 %). Slitiny jsou dobře svařitelné, obrobiteľné a mají dobrou korozní odolnost. Jsou často využívány při výrobě konstrukčních částí dopravních prostředků ve formě za tepla tažených profilů. Jejich mez kluzu se pohybuje okolo 275 MPa a mez pevnosti kolem 310 MPa. [7; 8]
- Skupina 7xxx představuje slitiny AlZn, s obsahem Zn obvykle 1 až 8 %. Jako další legující prvky jsou přidávány hořčík, měď nebo chrom. Přidáním hořčíku se zlepšuje vytvrditelnost slitin. Tyto slitiny jsou vysoce pevné s mezí pevnosti až 575 MPa. [7; 12]

- Skupina 8xxx představuje slitiny s jiným hlavním slitinovým prvkem, např. Li do 2,5 % obsahu. [11]
- Skupina 9xxx je neobsazená řada hliníkových slitin. [11]

1.3 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování (dále jen TZ) je dle normy ČSN 42 0056 definováno jako proces, ve kterém je výrobek v tuhém stavu podroben jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadovaných vlastností a struktury [13]. Žíhací cyklus je definován pomocí závislosti teploty na čase, příklad žíhacího cyklu stabilizačního žíhání je zobrazen na obr. 6. V průběhu žíhacího cyklu dochází k ohřevu, výdrži na dané teplotě a následném ochlazení stanovenou rychlostí, přičemž výše teploty během cyklu je vysoce závislá na chemickém složení slitiny.



Obr. 6 Stabilizační žíhací cyklus [9].

Účelem TZ je obecně zejména zvýšení mechanických vlastností slitin, snížení vnitřních pnutí po předchozím zpracování nebo změna rozložení prvků ve struktuře [8]. Slitiny hliníku se dělí na dvě hlavní skupiny, a to slitiny pro odlévání (slévárenské slitiny) a slitiny pro tváření. Tepelné zpracování obou skupin se nijak zásadně neodlišuje a lze je rozdělit do dvou hlavních skupin:

- žíhání,
- vytvrzování.

Žíhání

Při rekrystalizačním žíhání pro za studena tvářený kov dochází ke vzniku nové, nedeformované, rekrystalizované struktury (rekrystalizovaná struktura je tvořena novými zrny). Snižují se pevnostní a zvyšují se plastické vlastnosti původního materiálu. Pro hliníkové slitiny se rekrystalizační teplota pohybuje kolem 250 °C a výše v závislosti na chemickém složení (legující prvky) a na stupni přetvoření. Obecně se dá říct, že pro vyšší stupně deformace je využíváno nižších teplot. Rychlost a velikost změn jsou závislé na teplotě a době ohřevu, resp. výdrži na dané teplotě. [6]

Stabilizační žíhání je TZ za účelem stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a rozměrů výrobku [6]. Nejrozšířenější aplikace stabilizačního žíhání je pro odlitky a pro díly, které jsou provozovány za vyšších teplot. Stabilizace rozměrů má velký význam pro velmi přesné výrobky. Teplota stabilizačního žíhání se pohybuje v rozsahu 240–350 °C, vždy vyšší teplota než maximální předpokládaná provozní teplota materiálu. [9]

Žíhání ke snížení pnutí se využívá za účelem snížení vnitřních pnutí vzniklých deformací nebo nerovnoměrným chladnutím. Obvykle je řazeno po procesu svařování, obrábění nebo tváření

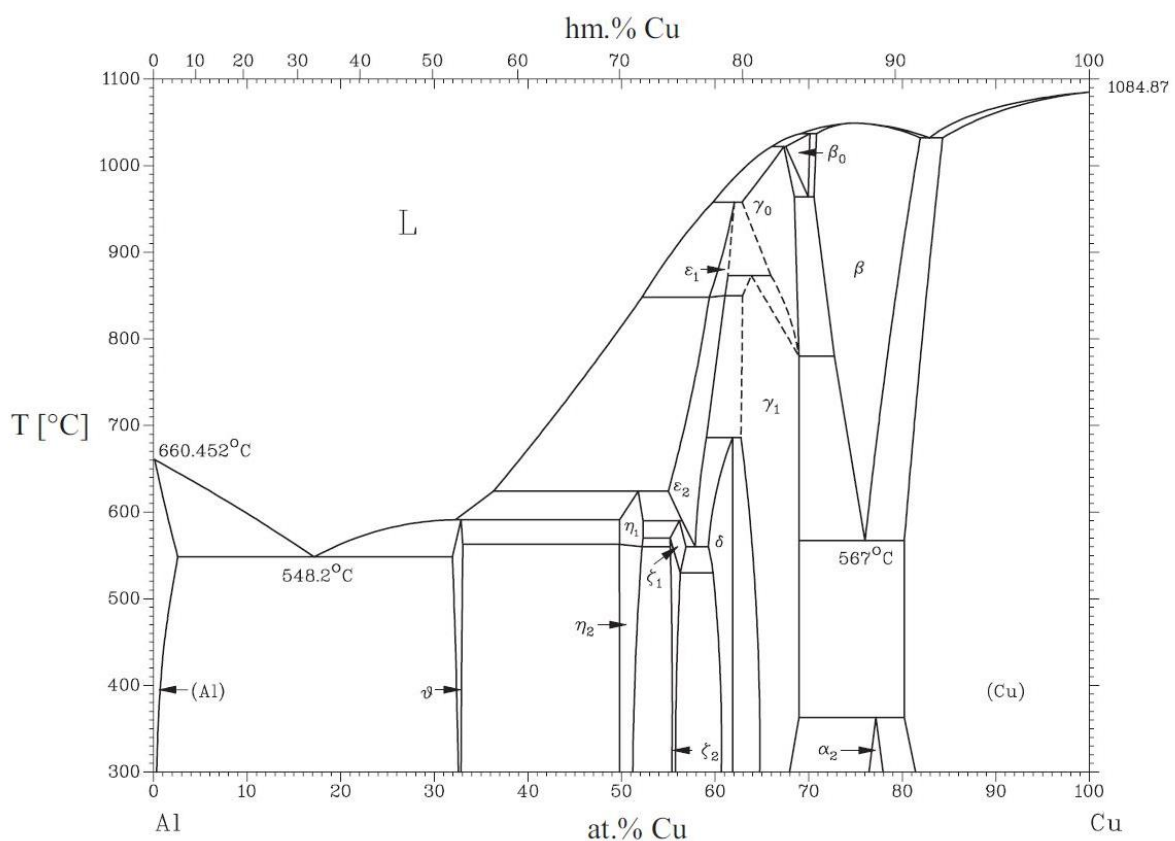
za tepla. Často se také využívá u odlitků nebo jako mezioperační TZ. Žíhání probíhá pod teplotou rekrystalizace, obvykle v rozsahu 300–400 °C. [9]

Homogenizace neboli homogenizační žíhání je TZ, při kterém dochází k vytvoření stejnorodé struktury vlivem difúzních procesů za zvýšené teploty. Homogenizační žíhání probíhá nad teplotou změny rozpustnosti. Výdrž na teplotě přispívá k odstranění nebo snížení chemické heterogenity [13]. Ze všech výše uvedených je homogenizační žíhání časově nejnáročnější z důvodu dlouhé výdrže na homogenizační teplotě. U slitin výrazně ovlivňuje rychlost difúze druh přísadového prvku. [6]

Precipitační vytvrzování

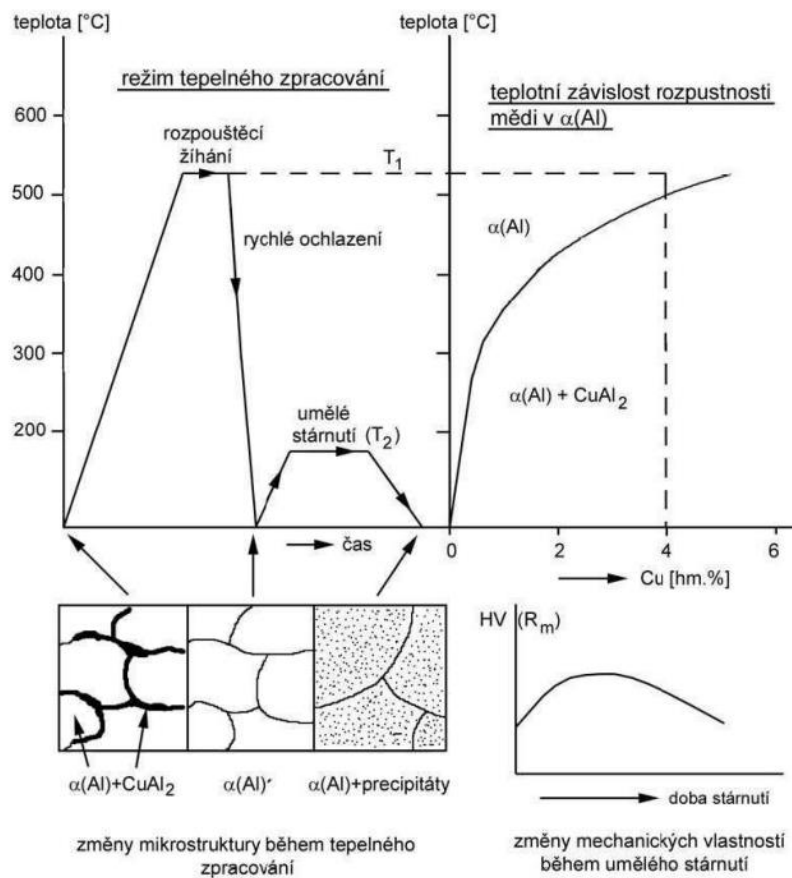
Vytvrzování nebo také precipitační zpevnění je využíváno k dosažení lepších mechanických, fyzikálních a technologických vlastností, především ke zvýšení meze pevnosti R_m , meze kluzu R_e a tvrdosti. S ohledem na toto TZ lze tvářené hliníkové slitiny dále dělit na tepelně vytvrditelné a nevytvrditelné. U nevytvrditelných slitin nedochází při precipitačním vytvrzování k podstatnému zvýšení tvrdosti a jsou tedy zpevňovány legováním různými prvky, například Mg, Mn, Si nebo Fe [10].

Precipitace je vylučování jemných částic z přesyceného tuhého roztoku. Probíhá zpravidla pod příslušnou rovnovážnou teplotou. Výsledkem procesu je vznik přesyceného tuhého roztoku. Podmínkou pro jeho vznik je přítomnost dostatečného množství legujícího prvku, který disponuje výraznou změnou rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ [8]. Lze tedy říct, že proces precipitačního vytvrzování lze provádět pouze u takových slitin, jejichž mez rozpustnosti v tuhém roztoku se snižuje s klesající teplotou. Příklad binárního diagramu takovéto vytvrditelné slitiny, slitiny AlCu, je znázorněn na obr. 7. Princip precipitačního vytvrzování byl zkoumán v roce 1938 Guinierem a Prestonem právě na slitinách AlCu Laueovou metodou [9]. Proces bude dále popsán na těchto slitinách. [14]



Obr. 7 Binární diagram slitiny AlCu [9].

Precipitační vytvrzování probíhá ve třech na sebe navazujících etapách, kterými jsou rozpouštěcí žíhání, ochlazení a stárnutí. Celé schéma průběhu vytvrzování slitiny AlCu znázorňuje obr. 8.

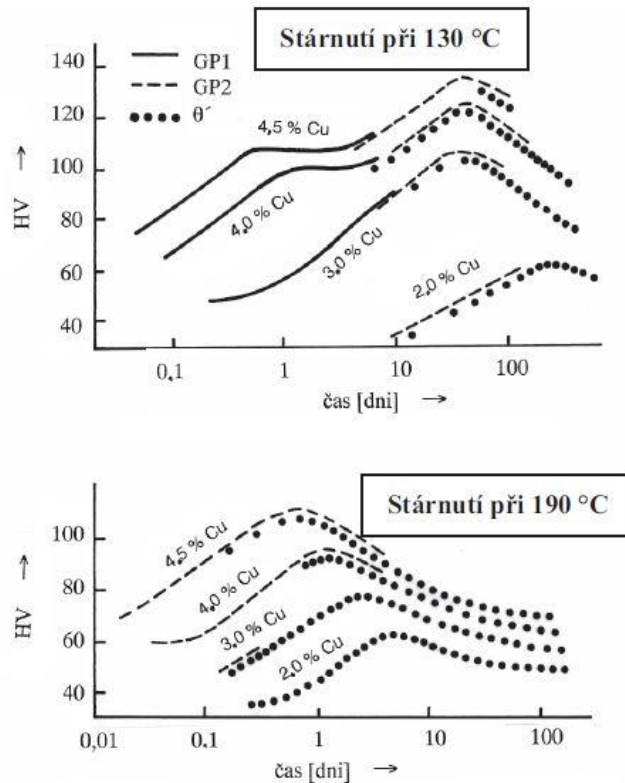


Obr. 8 Schéma precipitačního vytvrzování slitiny AlCu [15].

Při rozpouštěcím žíhání je materiál ohřát a po nutnou dobu udržen na rozpouštěcí teplotě, při které dochází k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující legující prvky a vzniku nasyceného roztoku. Teplota při rozpouštěcím žíhání musí být dodržena v rozmezí $\pm 5^\circ\text{C}$, jelikož při překročení teploty dochází k hrubnutí zrn a zhoršení mechanických vlastností. Následuje ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí s cílem vzniku přesyceného tuhého roztoku (obsah legujícího prvku je vyšší v porovnání s rovnovážnou rozpustností). Vysoká rychlost ochlazení zamezí opětovnému vyloučení intermetalické fáze v mikrostruktuře, dochází k fixaci nasycené struktury za nižší teploty a vzniká tak přesycený tuhý roztok. Slitiny hliníku jsou obvykle ochlazovány ve vodě o teplotě 20°C . [5; 9; 16]

Po ochlazení následuje stárnutí (precipitační vytvrzování) což je proces, při kterém dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. V tuhém roztoku se vylučují jemné částice intermetaliálních fází – precipitátů [5]. V případě slitiny AlCu je rovnovážným precipitátem CuAl_2 . Jedná se o koherentní precipitát, který se vylučuje ve formě monoatomárních vrstev nazývaných Guiner Prestonovy zóny I. Při dalším stárnutí vznikají destičkové útvary tohoto precipitátu nazývané Guiner Prestonovy zóny II. [14] Tyto útvary koherentních precipitátů deformují krystalickou mřížku tuhého roztoku, zabraňují skluzu deformací, vyvolávají vnitřní pnutí a materiál díky tomu zpevňuje. Stárnutí může být přirozené, to znamená ochlazování při pokojové teplotě, kdy celý proces může probíhat až několik dní při dosažení nižších mechanických vlastností, nebo častěji užívané umělé stárnutí při vyšších

teplotách a dosahování vyšších mechanických vlastností. Vliv teploty na výslednou tvrdost při umělém stárnutí je znázorněn na obr. 9. [8; 5]



Obr. 9 Vliv teploty na proces stárnutí [9].

Označování stavu hliníku a jeho slitin je stanoveno normou ČSN EN 515. Vybrané označení stavů dle normy je zobrazeno v tab. 2.

Tab. 2 Značení vybraných stavů [17].

Stav	Definice
F	z výroby, nspecifikované mechanické vlastnosti
O	žíhaný
H	deformačně zpevněný
W	po rozpouštěcím žíhání
T	tepelně zpracovaný
T1	ochlazený ze zvýšené teploty tváření a přirozené stárnutí
T2	žíhání (pouze odlitky)
T3	rozpouštěcí žíhání a přirozené stárnutí, pro výrobky tvářené za studena
T4	rozpouštěcí žíhání a přirozené stárnutí
T5	ochlazený ze zvýšené teploty tváření, umělé stárnutí
T6	rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí
T7	rozpouštěcí žíhání, stabilizace
T8	rozpouštěcí žíhání, deformace za studena a umělé stárnutí
T9	rozpouštěcí žíhání, umělé stárnutí, tváření za studena
T10	ochlazený z teploty tváření za tepla, deformace za studena a umělé stárnutí

1.4 Výroba hliníkových profilů

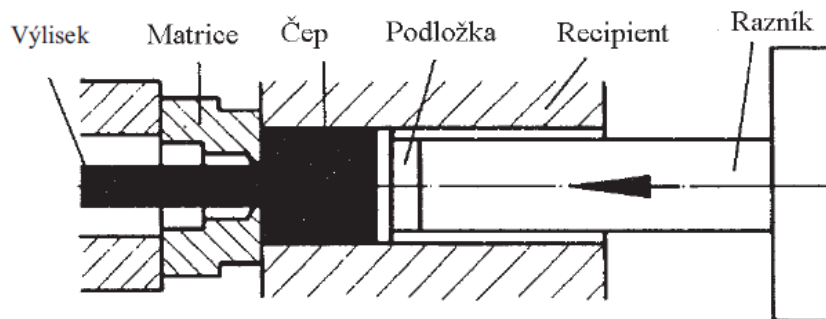
Jednou z nejrozšířenějších metod tváření hliníku a jeho slitin je průtlačné lisování. Velkou výhodou tohoto procesu je možnost dosahovat širokého spektra různých výlisků – profilů jednoduchých nebo složitých průřezů. Příklad složitého hliníkového profilu je uveden na obr. 10. Hliníkové profily jsou převážně protlačovány za tepla z kruhových čepů. Čepy jsou před procesem protlačování nařezány z větších kusů a ohřáty na požadovanou teplotu tak, aby byl přetvárný odpor materiálu co nejnižší. Teplota musí být zároveň volena tak, aby nedocházelo k povrchovým vadám a trhlinám v důsledku příliš vysoké teploty. Následně je materiál razníkem protlačován přes lisovací matrici s konkrétním tvarem otvoru pro daný profil. [9; 18]

Na lisovatelnost konkrétní slitiny má vliv mnoho faktorů, jako je chemické složení, lisovací teplota nebo způsob lisování. Významnou roli hraje především druh a množství legujících prvků ve slitině, které ovlivňují hodnotu přetvárného odporu materiálu. Hodnotu přetvárného odporu lze považovat za měřítko tvařitelnosti a zároveň je využívána pro porovnávání vlivu legujících prvků na lisovatelnost. [9]



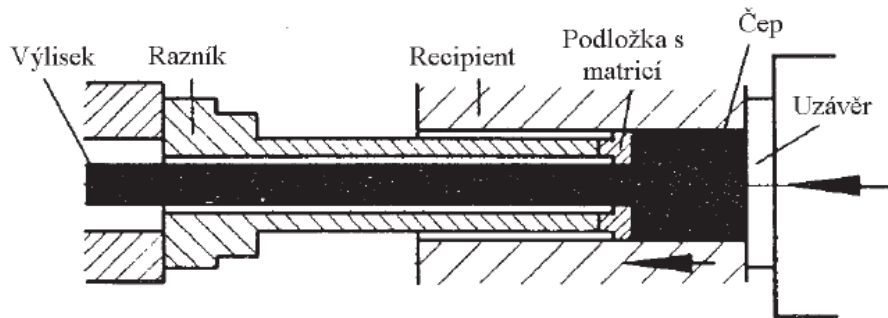
Obr. 10 Příklad hliníkového profilu [19].

Podle uspořádání zařízení a podle vzájemného pohybu razníku a matrice se lisování dělí na přímé a nepřímé. Na obr. 11 je zobrazeno schéma přímého způsobu lisování, při kterém je předehřátý čep protlačován pomocí razníku proti pevně uložené lisovací matrici. Z toho vyplývá, že hotový profil vystupuje ve stejném směru jako je pohyb razníku. Hlavní výhodou je zejména jednoduchost uspořádání zařízení a krátká vzdálenost mezi výstupem materiálu z matrice a místem ochlazování. [9]



Obr. 11 Schéma přímého způsobu lisování [9].

U nepřímého způsobu lisování je vzájemný pohyb razníku a hotového výlisku opačný než u přímého způsobu. Schéma metody je zobrazeno na obr. 12. Výhodou nepřímého způsobu je výrazné snížení tření, díky čemuž je potřeba nižších lisovacích sil. Další výhodou je snížení výskytu povrchových vad, díky lepšímu zpracování (protváření) materiálu. [9]



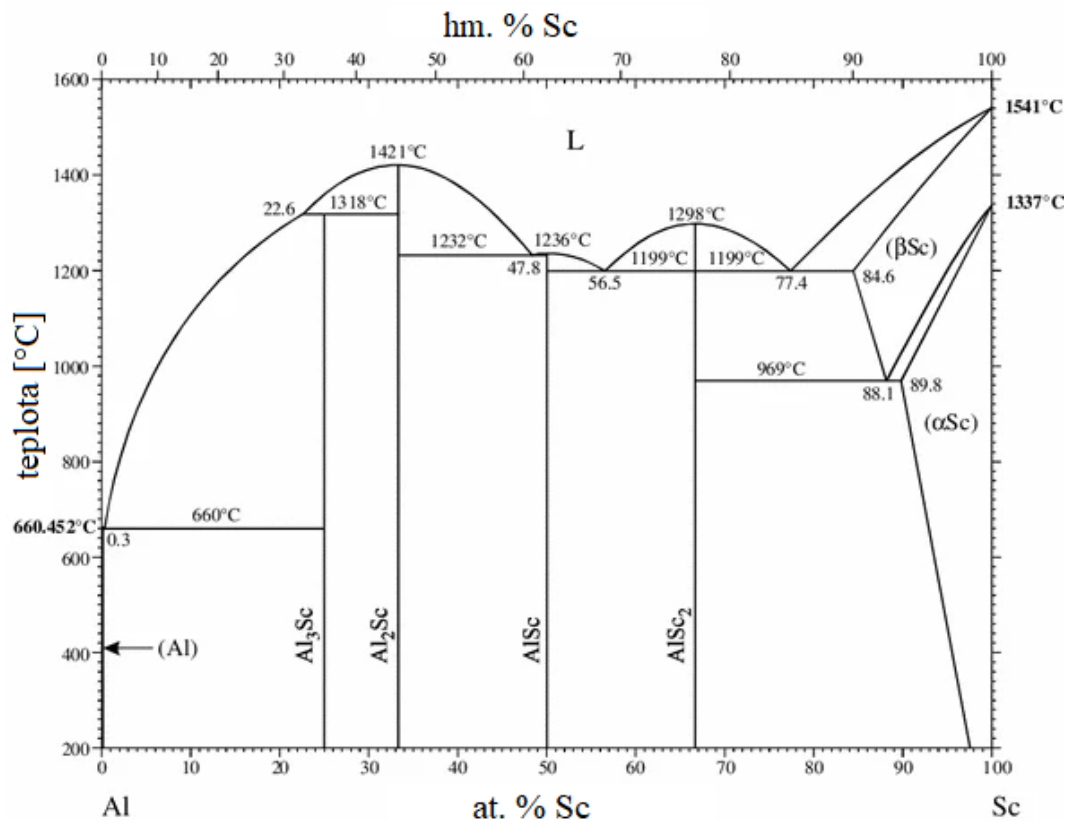
Obr. 12 Schéma nepřímého způsobu lisování [9].

1.5 Vývoj nových hliníkových slitin

Nekonvenční slitiny jsou vyvíjeny z důvodu vylepšování užitečných vlastností materiálů. Může se jednat o tvárné schopnosti (např. slitiny s vysokou tažností) nebo slitiny s přísadami, které zlepšují obrobitelnost materiálu nebo jeho svařitelnost. Ve vývoji nových slitin hraje významnou roli letecký a kosmický průmysl, který klade důraz na vývoj materiálů s nižší hmotností při současném zvýšení mechanických (zejména pevnostních) vlastností.

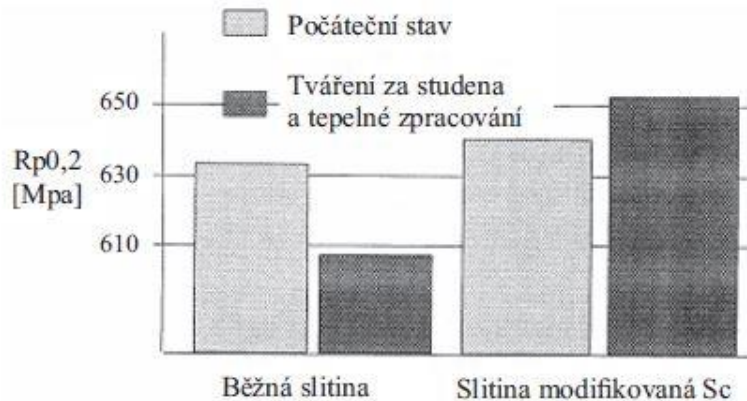
Slitiny na bázi AlSc

Slitiny na bázi AlSc jsou využívány zejména v kosmické technice, a v leteckém průmyslu, kde jsou běžně používány například u letounů MIG 29. Již při malém přidaném množství skandia do slitiny se výrazně zlepšují mechanické i technologické vlastnosti. S pokrokem doby jsou tyto slitiny vyvíjeny především za účelem zlepšení vlastností při svařování, aby mohlo docházet k nahrazení nýtových spojů svařovanými konstrukcemi. Fázový diagram systému AlSc je znázorněn na obr. 13. Maximální koncentrace skandia je při eutektické teplotě 655 °C a dosahuje 0,31 hm. %. [9]



Obr. 13 Fázový diagram systému AlSc [20].

Hlavním přínosem při legování skandiem je jeho schopnost omezit rekrystalizaci při ohřevu na rozpouštěcí teplotu. Tento jev má příznivý vliv na precipitační vytvrzování a po tepelném zpracování jsou tak výsledné vlastnosti podstatně vyšší. Precipitátem je v případě této slitiny koherentní precipitát Al_3Sc ve formě tyčinek. Na obr. 14 je názorně zobrazen vliv skandia na vlastnosti slitiny po tepelném, zpracování. [9]



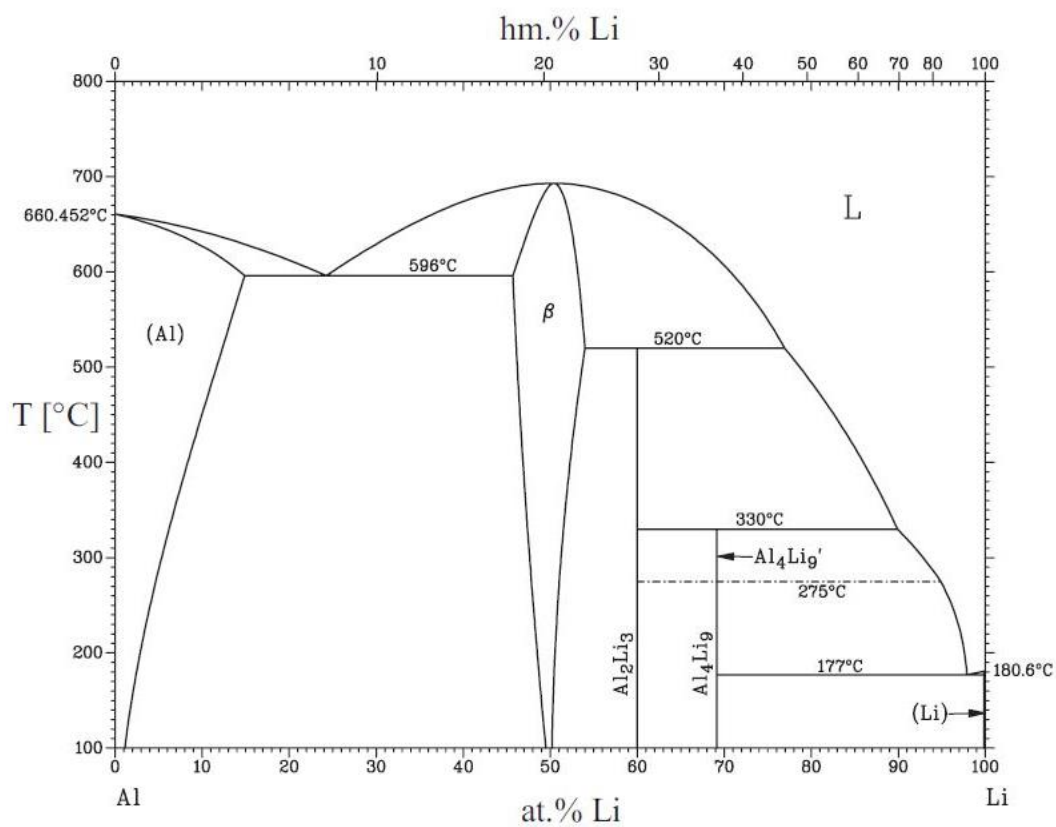
Obr. 14 Vliv Sc na mechanické vlastnosti [9].

Další nespornou výhodou legování slitin skandiem je jeho pozitivní vliv na svařitelnost. Snižuje se náchylnost materiálu na vznik horkých trhlin a současně se zvyšuje pevnost svarových spojů. Optimálních vlastností je dosahováno při současném legování zirkonem. Často jsou skandiem legovány i přídatné materiály. Díky těmto vlastnostem jsou svařitelné i materiály, které se obvykle nesvařují (řada 2xxx). [9]

Slitiny na bázi AlLi

Výhodou hliníkových slitin je především jejich nízká hmotnost, kterou ovšem provází relativně nízké mechanické vlastnosti. Základním impulzem pro využití lithia jako legujícího prvku byla právě jeho nízká hustota. Lithium má hustotu $0,534 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ oproti hustotě hliníku, která je $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (lithium je nejlehčí kov). Maximální rozpustnost lithia v hliníku je při teplotě $596 \text{ }^\circ\text{C}$ a dosahuje 4,2 hm. %, lze vyčíst z binárního diagramu na obr. 15. Čím větší množství lithia jako legujícího prvku slitina obsahuje, tím je slitina lehčí. Jedná se o vytvrditelnou hliníkovou slitinu. Optimálních vlastností se tedy dosahuje až po tepelném zpracování. Problémem u lithia je vysoká reaktivita s kyslíkem, která způsobuje problémy při tavení a lití těchto slitin. Je proto žádoucí, aby byly taveny a odlévány v ochranné atmosféře (například argon) nebo ve vakuu. Další nevýhodou může být anizotropie mechanických vlastností a z toho plynoucí snížená tažnost a houževnatost. [9; 21]

Nejdůležitějším faktorem pro využívání slitin AlLi je ale skutečnost, že jedno hmotnostní procento lithia snižuje o 3 % hustotu slitiny a o 5 % zvyšuje její pevnost. Slitiny jsou tedy lehčí než samotný hliník, ale vykazují lepší mechanické vlastnosti. Pevnost v tahu bývá přirovnávána k pevnosti duralů. Především z těchto důvodů nachází slitiny využití hlavně v letectví a v kosmickém průmyslu, ve značné míře je využíváno při konstrukci součástí letadel. V jiných odvětvích je ekonomicky výhodnější (z hlediska náročnosti zpracování slitin AlLi) využít klasických, konvenčních slitin hliníku. [9; 21]



Obr. 15 Fázový diagram systému AlLi [9].

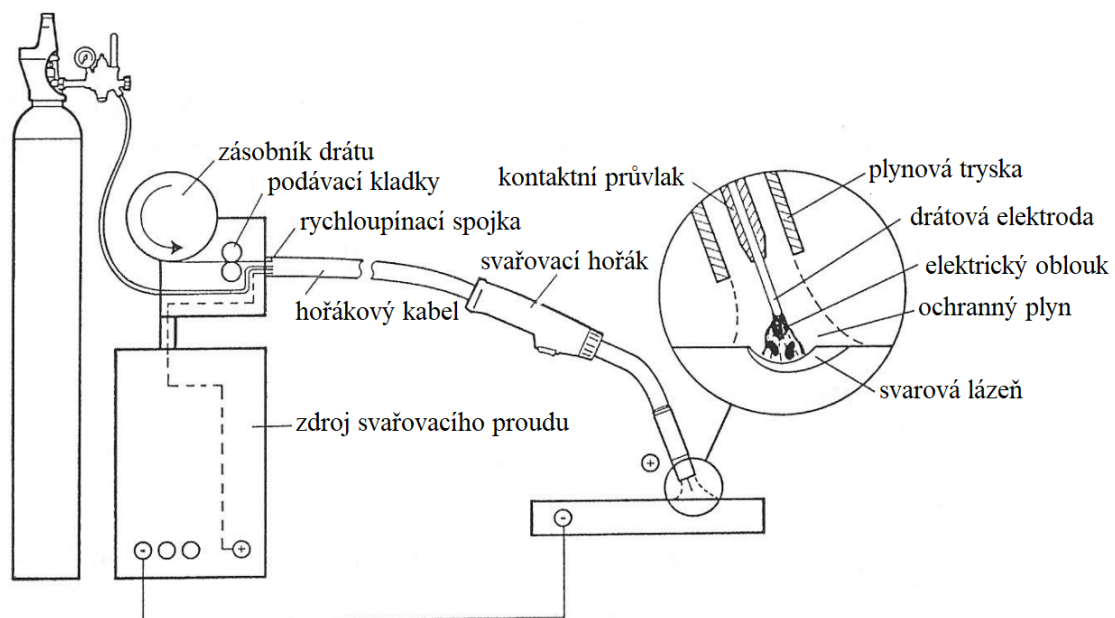
2 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Hliník a jeho slitiny lze svařovat všemi způsoby obloukového svařování, plamenem, elektrickým odporem, elektronovým paprskem nebo laserem a dalšími metodami. Z těchto uvedených metod se v praxi hliníkové slitiny nejčastěji svařují obloukovými metodami TIG a MIG. Vzhledem k dobré tepelné vodivosti hliníku je ve většině případů nutné využít predehřevu. V následujících podkapitolách bude celá problematika svařování hliníkových slitin podrobněji popsána.

2.1 Svařování metodou MIG

Zkratka MIG (Metal Inert Gas) označuje obloukové svařování tavící se elektrodou v atmosféře ochranného inertního plynu. Odtavující se elektroda ve formě drátu zároveň slouží jako přídavný materiál navinutý na cívkách, který je kladkovým podavačem přes svařovací hořák podáván do svarové lázně. Drát nesmí být v průběhu podávání kladkami nijak deformován nebo poškozen, proto jsou kladky opatřeny drážkami dle typu drátu. Upřednostňován je čtyřkladkový mechanismus podávání, aby došlo k co nejmenšímu poškození a rovnoměrnému podávání drátu. Ze stejného důvodu jsou dráty dodávány s povrchovou úpravou, která zvyšuje jejich tvrdost. Dráty pro svařování hliníku se dodávají zpevněné po plastické deformaci za studena. [22; 23]

Svařovací hořák zajišťuje přívod drátu do místa svařování, jeho napájení elektrickým proudem a proudění ochranného plynu kolem přídavného materiálu, oblouku a svarové lázně [23]. Proudění plynu usměřňuje plynová tryska, která ústí na konci hořáku. Svařovací proud je stejnosměrný nebo pulzní [10]. Drátová elektroda je zapojena na kladný pól zdroje a základní materiál plní funkci katody. Rovnoměrné napájení drátové elektrody svařovacím proudem zajišťuje kontaktní proudový průvlak z materiálu s dobrou elektrickou vodivostí. Celé schéma zařízení pro svařování metodou MIG je znázorněno na obr. 16. [23]



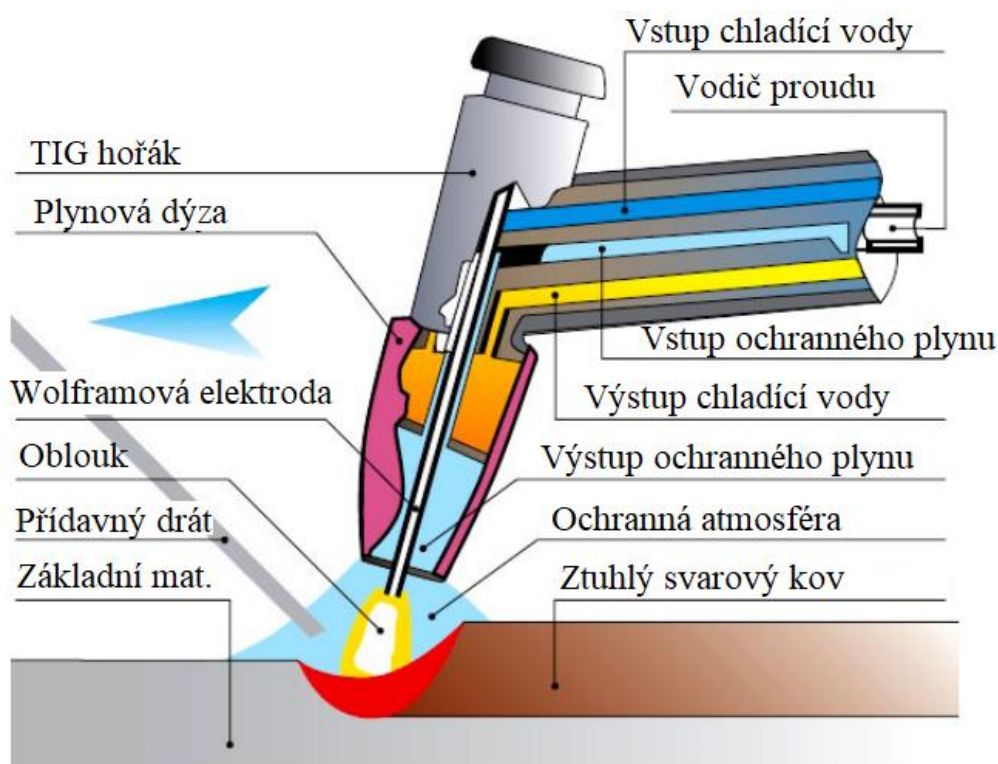
Obr. 16 Schéma zařízení pro svařování metodou MIG [23].

Metoda MIG využívá inertních ochranných plynů, které chrání svarovou lázeň před nepříznivými vlivy okolní atmosféry. Například může vlivem přítomnosti vzduchu docházet k oxidaci vznikajícího svarového spoje, což způsobuje výrazné zhoršení jeho mechanických vlastností. Pro hliníkové slitiny je využíván argon o vysoké čistotě min. 99,9 hm. % Ar, případně směs argonu a helia. Čistého argonu je využíváno pro menší tloušťky materiálu. Pro

větší tloušťky je používána směs Ar + He (50 hm. % Ar + 50 hm. % He) z důvodu větší tepelné vodivosti helia. Zvyšuje se tepelný výkon oblouku, díky čemu je možné u větších tloušťek snížit přehřev nebo ho plně odstranit. Problematika ochranných inertních plynů podrobněji popsána níže. [10; 23]

2.2 Svařování metodou TIG

Metoda TIG (Tungsten Inert Gas, kde tungsten znamená anglicky wolfram) je nejčastěji využívanou a nejvhodnější metodou pro svařování hliníku a jeho slitin. Jedná se o tavný způsob svařování, jehož princip spočívá v hoření oblouku mezi základním materiálem a netavící se elektrodou. Proces svařování probíhá v ochranné atmosféře inertního plynu, který zajišťuje ochranu tavné lázně a elektrody před nepříznivými vlivy okolní atmosféry. Svařování probíhá nejčastěji ručním způsobem s přídavným materiálem ve formě drátu. Metoda TIG je velmi přesná a je dosahováno svarů o vysoké kvalitě. Schéma svařování metodou TIG je znázorněno na obr. 17. [24]



Obr. 17 Schéma svařování metodou TIG [24].

2.2.1 Netavící se wolframové elektrody a svařovací hořák

Jelikož musí elektroda odolávat vysokým teplotám, aby nedocházelo k jejímu odtavování, je vyráběna ze spékaného wolframu, jehož teplota tavení se pohybuje kolem 3400 °C. Wolfram může být také legován oxidy kovů, které zlepšují zapalování oblouku, snižují ohřev elektrody a zvyšují tím její životnost, což má pozitivní vliv na svařovací proces. Mezi kovy, které jsou využívány jako přísada do wolframových elektrod patří thorium, lanthan, zirkon nebo yttrium. Oxidy těchto kovů mají podstatně vyšší teploty tavení než oxid wolframu. Označování wolframových elektrod dle normy ČSN EN ISO 6848 je naznačeno v tab. 3. První písmeno („W“) značí wolfram jako základní prvek elektrod, druhé písmeno značí druh přísadových oxidů, kde Th je oxid thoričitý, Zr je oxid zirkoničitý, La je oxid lantaničitý a P označuje elektrodu z čistého wolframu. Číslo následující za písmenným označením udává desetinásobek koncentrace oxidů. [23; 25]

Tab. 3 Vybrané značení wolframových elektrod dle ČSN EN ISO 6848 [25].

označení	druh oxidu	obsah oxidu [hm. %]	barevné označení
WP	-	-	zelená
WTh 10	ThO ₂	0,8 až 1,2	žlutá
WTh 20	ThO ₂	1,7 až 2,2	červená
WTh 30	ThO ₂	2,8 až 3,2	fialová
WZr 8	ZrO ₂	0,7 až 0,9	bílá
WLa 10	La ₂ O ₃	0,8 až 1,2	černá
WLa 15	La ₂ O ₃	1,3 až 1,7	zlatá
WLa 20	La ₂ O ₃	1,8 až 2,2	modrá

Čistá wolframová elektroda (WP) je vhodná především pro svařování hliníku a jeho slitin střídavým proudem. Vykazuje dobrou stabilitu oblouku. [26]

Elektrody legované thoriem (WTh) vykazují lepší zapalovací schopnosti a lepší životnost. Využívány jsou při svařování vysoce legovaných a korozivzdorných ocelí. Jelikož je thorium radioaktivní prvek, postupně se od užívání těchto elektrod ustupuje. [27]

Elektrody legované zirkonem (WZr) jsou využívány zejména při svařování střídavým proudem. Jsou vhodné i pro svařování hliníku a slouží jako alternativa WP elektrod. Oblouk je vysoce stabilní a obsah zirkonu minimalizuje wolframové vměstky ve svarovém kovu. [26; 27]

Elektrody legované lanthanem (WLa) jsou tzv. univerzální elektrody vhodné pro svařování stejnosměrným i střídavým proudem. Užívané jsou i v oblasti nízkých proudů. Obsah lanthanu usnadňuje opakované zapalování oblouku. [27]

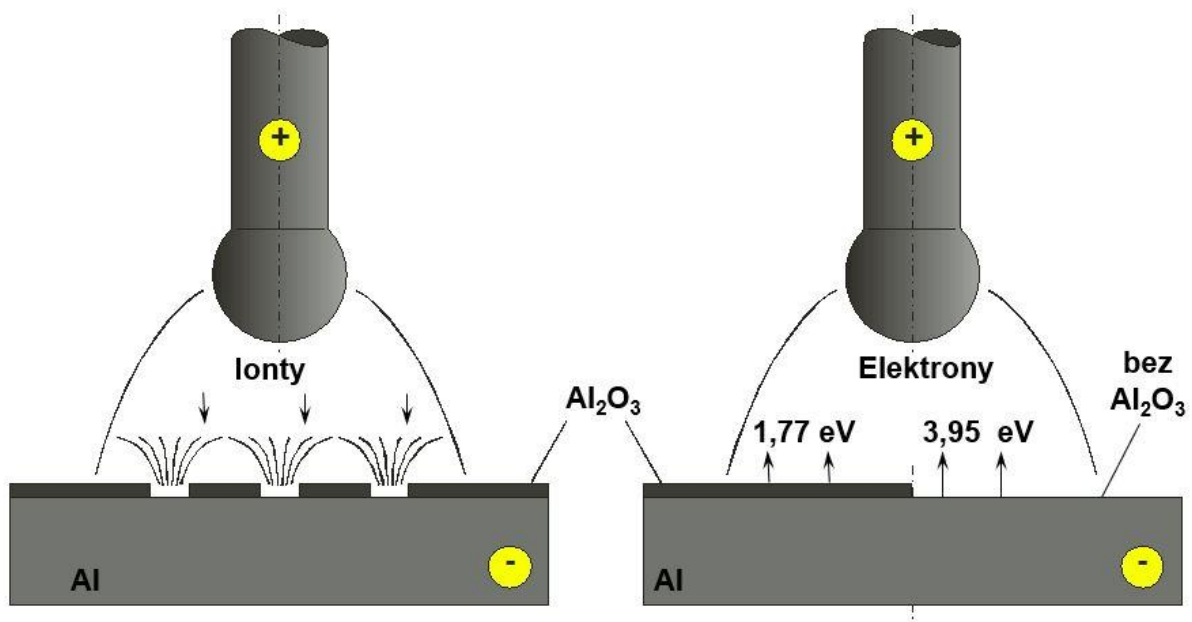
Elektroda je upnuta ve svařovacím hořáku pomocí kleštin, které současně zajišťují napájení elektrody svařovacím proudem. Pevné fixování elektrody je důležité z hlediska snížení odporu mezi kleštinami a elektrodou. Svařovací hořák dále zajišťuje přívod a usměrňování proudění ochranného plynu a chlazení. Ochranný plyn je do místa svařování přiváděn pomocí plynových trysek, které jsou keramické nebo kovové, nejčastěji měděné s chromovou povrchovou úpravou. Doporučený průměr trysek se pohybuje od 6 do 18 mm v závislosti na velikosti plochy, kterou je třeba chránit a také v závislosti na svařovacím proudu. U TIG svařování se využívá funkce předfuku, při které je ochranný plyn přiváděn do místa svařování 2 až 5 sekund před zapálením oblouku z důvodu vytvoření ideálních podmínek pro zapálení a hoření oblouku. Podobnou funkci plní dofuk, který urychluje chlazení elektrody a zajišťuje ochranu tuhacího svarového spoje. [23]

2.2.2 Druhy svařovacích proudů

Podle druhu svařovacího proudu je dosahováno rozdílných výsledků svařovacího procesu. Svařování stejnosměrným proudem je základním způsobem zapojení při svařování metodou TIG [23]. K hoření elektrického oblouku dochází mezi elektrodou, která je zapojena k zápornému pólu zdroje a základním materiálem zapojeným na kladném pólu zdroje (přímá polarita). Rozložení tepla oblouku je nerovnoměrné, až 2/3 z celkového tepla připadají na oblast svarové lázně, což při svařování hliníkových slitin umožňuje roztavení povrchových oxidů. Je však nutné, aby ochranná atmosféra byla tvořena alespoň 75 % helia, které zaručuje dobrou tepelnou vodivost. Nepřímé zapojení, tedy elektroda zapojena na kladném pólu a základní materiál na záporném, je méně využívanou z důvodu tepelného přetěžování elektrody. Je nutné ji intenzivně chladit a využívat proto speciálního zařízení. Svařování stejnosměrným proudem je využíváno především pro svařování ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin [23].

Při TIG svařování střídavým elektrickým proudem dochází k periodickému střídání kladné a záporné polarity. Pro hliníkové slitiny je častěji používán střídavý svařovací proud,

především díky jeho čistícímu účinku při kladné polaritě wolframové elektrody. Čistící efekt umožňuje odstraňování vrstvy oxidu hlinitého během procesu svařování účinkem katodové skvrny, která je tvořena na základním materiálu. Katodová skvrna je oblast, která emituje prvotní elektrony potřebné pro ionizaci plynného prostředí a zapálení oblouku. Je nestabilní a pohybuje se na místa s oxidy, které vykazují nižší emisní energii a po zasažení katodovou skvrnou zde dochází ke snadnějšímu odpaření oxidů. Souběžně dochází k rozložení argonu jako ochranného plynu na kladné ionty a elektrony. Ionty jsou urychlovány směrem k tavné lázni, kde dochází k mechanickému rozrušování vrstvy oxidů díky velké kinetické energii iontů. Čistící efekt má tedy i mechanický – dynamický charakter. Čistící účinky elektrody jsou znázorněny na obr. 18. Záporná polarita se vyznačuje větším přenosem tepla do základního materiálu, čímž se prohlubuje hloubka svaru. Na svařovacích zařízeních lze nastavit tzv. vyvážení, které představuje procentuální rozložení svařovacího procesu při kladné ku záporné polaritě. Tímto lze buď zvýraznit čistící efekt na úkor hloubky závaru při převaze kladné polarity, nebo naopak zvětšit hloubku závaru a omezit čistící efekt při větším procentuálním zastoupení záporné polaritě. [10; 23; 28]



Obr. 18 Čistící účinky elektrody [29].

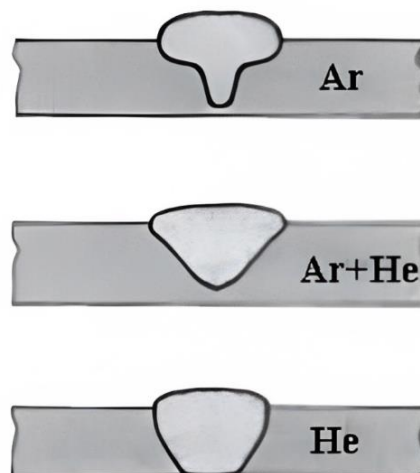
Svařování impulsním proudem se od předchozích dvou metod liší proměnnou velikostí svařovacího proudu v průběhu procesu. Proud se pravidelně mění mezi hladinou základního proudu a hladinou impulsního proudu. Základní proud zajišťuje ionizaci plynu pro vznik a udržení hoření oblouku, ale nedostačuje na natavení materiálu a vytvoření tavné lázně. V čase působení impulsního proudu dochází k natavení přídavného materiálu a vytvoření tavné lázně. Výhodami svařování impulsním proudem je menší tepelně ovlivněná oblast (dále jen TOO), lepší mechanické vlastnosti výsledných svarů nebo dobrý vzhled svarové housenky. [23; 28]

2.3 Podmínky obloukového svařování hliníkových slitin

Pro dosažení kvalitních svarů o vysoké jakosti je nutné vhodně zvolit a zkombinovat metodu svařování, svařovací materiály a svařovací parametry.

- Volba ochranného plynu je důležitým parametrem při svařování, vzhledem k citlivosti hliníku na oxidaci je nutné volit inertní plyny. Inertní plyny zajišťují ochranu tavicí se, či netavicí se elektrody, tavné lázně a jejího okolí před nepříznivými vlivy okolní atmosféry. Především jde o zamezení přístupu vzduchu, který způsobuje oxidaci

materiálů, propal prvků nebo pórovitost. Ochranné plyny dále ovlivňují přenos tepla do svaru, výsledný tvar svarového spoje (např. hloubku závaru, viz obr. 19) a vytvářejí vhodné podmínky pro zapálení a stabilitu elektrického oblouku. Pro svařování hliníkových slitin je nejběžněji používán argon, zejména z cenových důvodů. Obvykle je užíván Argon 4.6, což je označení pro stupeň čistoty plynu, zde konkrétně 99,996 hm. % Ar. Určitých výhod je možné dosáhnout při použití helia nebo směsi argon + helium [30]. Směsi propojují výhodné vlastnosti obou plynů. Nejběžněji 50 hm. % Ar + 50 hm. % He nebo 70 hm. % Ar + 30 hm. % He. Mezi výhody, které přináší helium se může řadit zvýšení rychlosti svařování z důvodu účinnějšího přenosu tepla z oblouku (helium má podstatně vyšší tepelnou vodivost než argon). Zvýšení rychlosti svařování má pak za pozitivní důsledek zmenšení velikosti TOO. S lepší tepelnou vodivostí také souvisí možnost svařování větších tloušťek materiálů a snížení, či plné odstranění přehřevu. Může také docházet ke snížení výskytu vad, jako například pórovitosti. Za nevýhodu použití helia může být považován vyšší ionizační potenciál (24,6 eV u He ku 15,8 eV u Ar), který způsobuje horší zapalování oblouku a jeho menší stabilitu. Další nevýhodou a důvodem, proč je využíván především čistý argon je cenová náročnost helia. Podobných vlastností jako směsi argonu s heliem vykazují i směsi argon s vodíkem. Příměs vodíku výrazně vylepšuje tepelnou vodivost a zlepšuje se energetická bilance oblouku. Směsi s vodíkem se používají hlavně při svařování vysoce legované oceli a niklu a jeho slitin. Pro svařování hliníku nesmí být využit, jelikož je vodík příčinou vzniku póru ve svarovém spoji. [16; 23; 30]



Obr. 19 Vliv ochranného plynu na tvar svaru [22].

- Přídavný materiál je volen podle několika faktorů a zásad. Jedním z faktorů je výběr přídavného materiálu srovnatelného chemického složení jako základní materiál. U svařování čistého hliníku je požadována stejná čistota kovu. Dalším faktorem jsou požadované mechanické vlastnosti výsledného svarového spoje, z tohoto důvodu jsou využívány materiály s přísadou vhodných legujících prvků. Přídavný materiál ovlivňuje metalurgické děje ve svarové lázni, je tedy nutné volit vhodný materiál snižující pravděpodobnost vzniku vad ve svaru. Obecně je pro většinu svařovaných hliníkových slitin používán přídavný materiál AlMg5 nebo AlSi5. Přídavný materiál nesmí být před vstupem do svařovacího procesu žádným způsobem znečištěn nebo poškozen. Zejména se jedná o vlhkost na povrchu přídavného materiálu, která následně způsobuje pórovitost vznikajícího svaru. Tím jsou kladeny určité nároky na skladování přídavných materiálů na suchých místech chráněných před povětrnostními vlivy dle norem. Pro svařování hliníkových slitin ze skupiny 6xxx je volen přídavný materiál

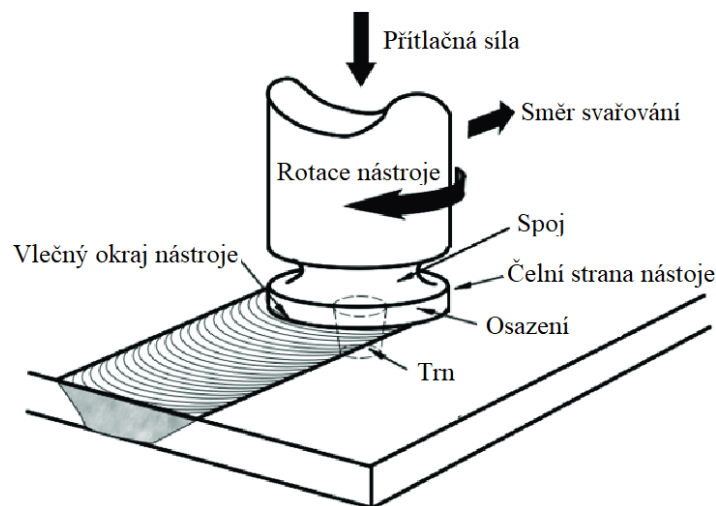
s obsahem hořčíku alespoň 3 %, optimálně kolem 5 %. Obsah hořčíku výrazně snižuje náchylnost ke vzniku trhlin. [10; 16; 23; 30]

- Předehřev je obecně u hliníkových slitin doporučován při teplotách maximálně do 200 °C v závislosti na tloušťce materiálů a složitosti svarového spoje. U vytvrditelných slitiny, zejména u skupiny 6xxx by neměl předehřev překročit teplotu cca 120 °C. Vyšší teploty mohou způsobovat pokles mechanických vlastností, proto je doporučeno volit stejné teploty jako pro umělé stárnutí. Předehřev je využíván z důvodu odstranění vlhkosti před svařováním nebo dosažení tepelné rovnováhy při svařování dílů odlišných tloušťek. Použitím předehřevu se také zmírňuje vliv teplotního rozdílu při chladnutí svaru a tím se minimalizují problémy spojené s deformací a stavem napjatosti (zbytkovým napětím) v oblasti svarového spoje. Doba výdrže na teplotě předehřevu by měla být co nejkratší možná. Také teplotu předehřevu je nutné dodržet s co největší přesností z důvodu ovlivnění mechanických vlastností při příliš vysoké teplotě. U tepelně zpracovaných materiálů, nebo materiálů mechanicky zpevněných by mohlo docházet k procesu žhání, stárnutí nebo ke změnám metalurgické struktury. Při užití helia (nebo směsi argon + helium) jako ochranného plynu je možné odstranit předehřev z důvodu vyšší tepelné vodivosti plynu. [22; 30; 31]

2.4 Ostatní způsoby svařování

Kromě dvou výše zmíněných způsobů svařování je možné hliníkové slitiny svařovat také elektronovým paprskem nebo laserem. Obě metody zaručují menší (užší) TOO, menší šířku svarového spoje nebo jeho lepší vlastnosti. Mezi výrazně rozšířené také patří metody tlakového svařování, zejména metody založené na tření.

Způsob svařování FSW (Friction Stir Welding), ve volném překladu svařování promísením rotujícím nástrojem, je speciální metodou třecího svařování, jehož princip je založen na vtlačování rotujícího nástroje do svarové mezery (viz obr. 20). V místě kontaktu trnu rotujícího nástroje s materiálem vznikají třecí síly, které generují teplo a dochází až k plastifikaci materiálu. Rotace nástroje zároveň zajišťuje proudění a promísení spojovaných materiálů pod bodem solidu. [32]



Obr. 20 Princip metody FSW, podle [33].

Metoda je využívána zejména pro materiály s nižší teplotou tavení, jako jsou slitiny hliníku, hořčíku, titanu, mědi a olova. Velkou výhodou je relativně nízká teplota procesu, odpadají tedy problémy typické pro tavné svařování. Zejména pro vytvrditelné slitiny hliníku to znamená, že nedochází k poklesu mechanických vlastností z důvodu rozpouštění vytvrzujících precipitátů.

Mezi další výhody patří [32]:

- vyloučení propalu prvků a pórovitosti,
- svar bez trhlin za tepla (malá TOO),
- dobré mechanické vlastnosti vlivem zjemnění zrna při deformačním tváření,
- možnost kombinací svařovaných materiálů,
- svařování bez přídavného materiálu a ochranné atmosféry.

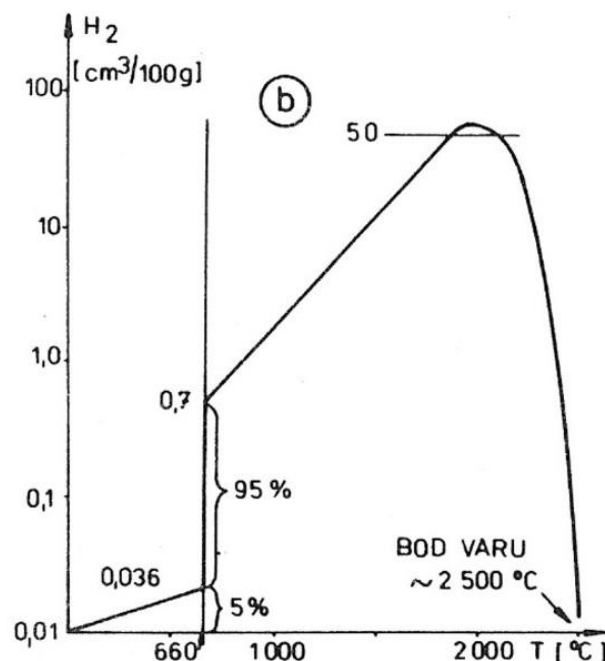
Naopak za nevýhody je považována nutnost použití velkých upínacích sil, nutnost opracování závěrečného otvoru nebo potíže s nelineárními svary. FSW svařování je používáno především pro dlouhé lineární svary, zejména plechů v širokém rozsahu tloušťek od 1,5 až do 30 mm. [9; 16; 32]

2.5 Vady a problémy při svařování hliníkových slitin

Při svařování hliníkových slitin se vyskytuje řada problémů. Charakteristickými vadami při svařování hliníkových slitin jsou pórovitost svarových spojů, nebo vznik trhlin. Zejména u vytvrditelných slitin nastává problém s poklesem mechanických vlastností vlivem ohřevu materiálu.

Pórovitost

Nejčastějším problémem je pórovitost. Hlavní příčinou vzniku pórů a bublin je přítomnost vodíku. Ten se vyznačuje rozdílnou rozpustností v hliníku v závislosti na teplotě, což je hlavním důvodem jeho nepříznivého vlivu. Rozpustnost vodíku v hliníku se s teplotou podstatně zvyšuje, jak je zobrazeno na obr. 22. Současná velmi dobrá tepelná vodivost hliníku způsobuje rychlé chladnutí svarového kovu a vodík tím pádem nestačí ze svarové lázně difundovat. Část vodíku tedy zůstává ve vzniklém svarovém spoji i pod teplotou solidu a jeho následné vylučování způsobuje vznik pórů a bublin [10]. Póry mohou být následně iniciačními místy pro vznik trhlin a únavových lomů.

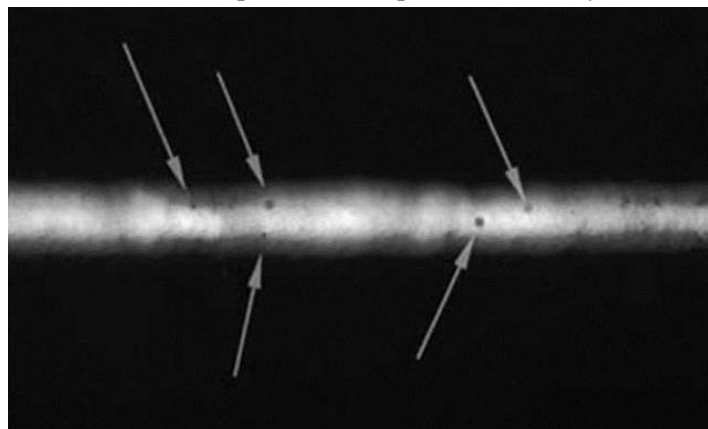


Obr. 22 Rozpustnost vodíku v hliníku [7].

Póry ve svarovém spoji (obr. 22) lze zjišťovat pomocí nedestruktivních zkoušek svarových spojů. Vhodnou zkouškou je zejména zkouška radiologická (prozařovací). Příklad rentgenového snímku z prozařovací zkoušky svarového spoje, na kterém jsou patrné póry je zobrazen na obr. 23.



Obr. 22 Pórovitost svaru po obroušení povrchové vrstvy materiálu [34].



Obr. 23 Pórovitost svaru na rentgenovém snímku [34].

Tento jev lze omezit minimalizováním zdrojů vodíku při svařování, především využití inertních ochranných plynů o velké čistotě. Dále je vhodné omezit přítomnost vodíku v základním i přídavném materiálu, zejména se jedná o oxidickou ochrannou vrstvu na povrchu, která snadno váže vodu a je proto následným zdrojem vodíku. Materiál je před svařováním nutné vysušit, zbavit oxidické vrstvy a odmastit. K tomu je vhodné mimo jiné využít předehřevu, který zároveň zpomaluje odvod tepla z místa svaru. [10; 22]

Povrchová vrstva Al_2O_3

Vrstva Al_2O_3 také zhoršuje svařitelnost hliníkových slitin z důvodu vyšší teploty tání než samotná slitina, čímž brání spojení roztaveného kovu se základním materiálem a zhoršuje podmínky pro místní natavení materiálu. [22; 35] Před procesem svařování je tedy nutné tuto vrstvu odstranit buď mechanicky, nebo chemicky. Mechanickým odstraněním se rozumí třískové obrábění, případně odstranění ocelovým kartáčem nebo drátěným kotoučem. Oxidickou vrstvu je důležité odstranit i v oblastech přiléhajících ke svarovým plochám a po mechanickém odstranění důkladně odmastit. Chemickým způsobem se nejčastěji rozumí moření ve vodním roztoku NaOH. Po moření následuje oplach, neutralizace a důkladné vysušení povrchu. Po odstranění se okamžitě začíná tvořit vrstva nová (při pokojové teplotě se za 1 sekundu vytvoří vrstva Al_2O_3 o tloušťce 0,1 μm [10]). K zajištění dobrého metalurgického spojení svařovaných materiálů je nutné oxidickou vrstvu odstraňovat i v průběhu svařování, a to chemicky nebo čistícím účinkem elektrického proudu v ochranném plynu Ar. [7; 10]

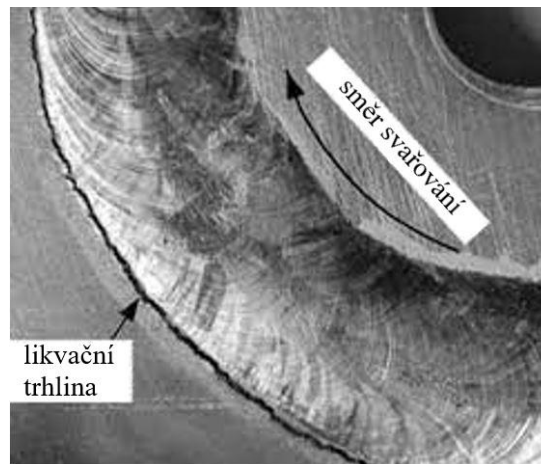
Trhliny

V tepelně ovlivněné oblasti, ale i ve svarovém kovu se mohou vyskytovat horké trhliny, způsobené neoptimálním průběhem chladnutí svarového spoje. Horké trhliny ve svarovém kovu neboli také solidifikační (krystalizační) trhliny vznikají důsledkem velkého napětí na fázovém rozhraní. Jelikož hliník disponuje velkou tepelnou roztažností a velkou tepelnou vodivostí dochází k rychlému tuhnutí a smršťování svarové lázně směrem od základního materiálu ke středu lázně, který tuhne jako poslední. Tím vznikají velká tahová napětí působící na tuhnoucí střed svarové lázně a způsobují tvorbu těchto trhlin, které se dále šíří od osy svaru, viz obr. 24. Solidifikační trhliny typicky vznikají při svařování slitin ze skupiny 6xxx a 7xxx. Pro eliminaci vzniku trhlin je doporučeno svařovat s malým tepelným příkonem, aby nevznikala velká tavná lázeň. [7; 36]



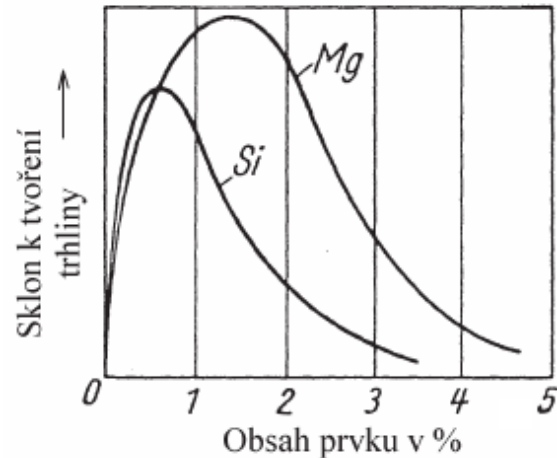
Obr. 24 Ukázka solidifikační trhliny ve svarovém kovu [36].

Dalším typem horkých trhlin jsou trhliny likvační, které vznikají především v TOO svarového spoje (obr. 25) nebo ve svarovém kovu při vícevrstevném svařování. Příčinou vzniku je kombinace elasto-plastického napětí v průběhu tuhnutí svarové lázně. Tvorba likvačních trhlin je umocněna i vlivem nečistot podél hranic zrn. [36]



Obr. 25 Ukázka likvační trhliny v TOO, podle [37].

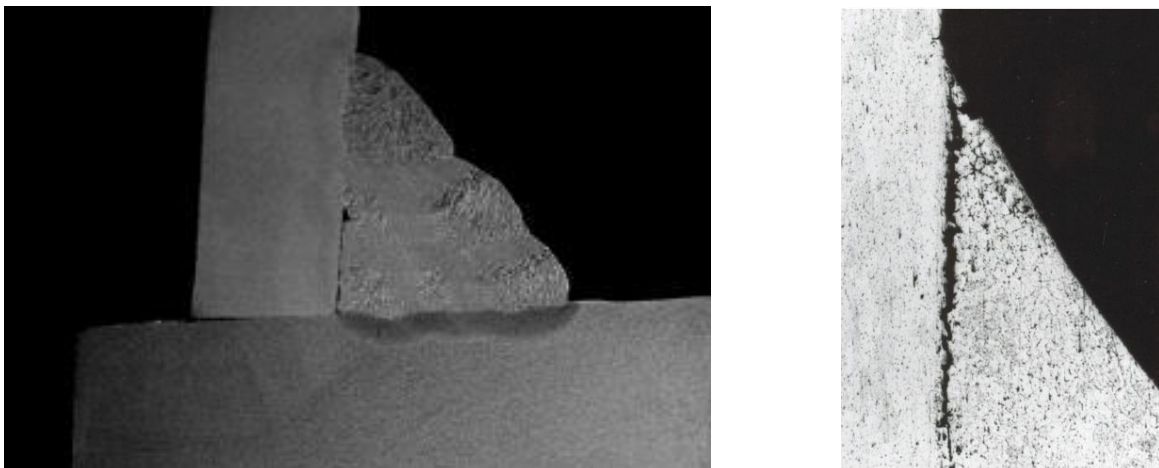
Na vznik horkých trhlin má vliv i chemické složení slitiny, náchylné jsou nízkolegované a zejména vytvrditelné slitiny. Náchylnost se liší dle obsahu a typu legujícího prvku viz obr. 26. Řešením pro eliminaci vzniku trhlin může být volba vhodného přídavného materiálu, vhodná volba technologie svařování a svařovacích parametrů. Zejména předehřev má u tvorby horkých trhlin velký význam, jelikož praskavost je úzce spjata se stavem napjatosti materiálu. V TOO může docházet i ke vzniku studených, tzv. transkrystalických trhlin. Ty vznikají hlavně u vysokolegovaných hliníkových slitin ze skupiny 2xxx nebo 7xxx. [9; 10; 22]



Obr. 26 Náchylnost na vznik trhlin [9].

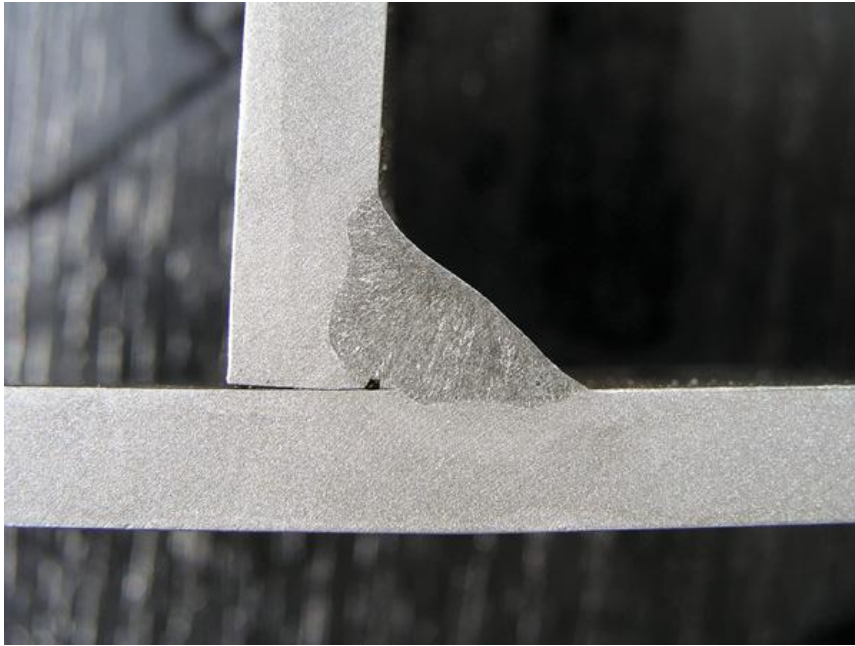
Studené spoje, neprůvar kořene svaru

Studený spoj je nedostatečné spojení mezi svarovým kovem a základním materiálem nebo mezi jednotlivými vrstvami svarového kovu, studený spoj je zobrazen na obr. 27. Vznik studeného spoje může být způsoben nízkým svařovacím proudem, tedy malým tepelným příkonem nebo vysokou rychlostí svařování. U TIG svařování může mít vliv také špatné vedení elektrody a u MIG svařování špatný sklon hubice. [7; 38]



Obr. 27 Studené spoje u koutového svaru [7].

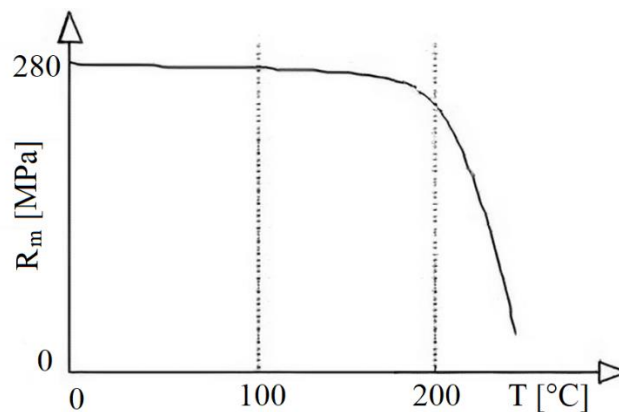
Neprůvar kořene vzniká z obdobných důvodů jako studený spoj. Hlavními příčinami vzniku jsou tedy vysoká svařovací rychlost, nízký proud nebo nevhodná příprava svarových ploch. Nedochozí tak k úplnému natavení základního materiálu a není zaručeno dostatečné metalurgické spojení. Příklad neprůvaru kořene je vidět na obr. 28. [38]



Obr. 28 Neprůvar kořene svarového spoje [34].

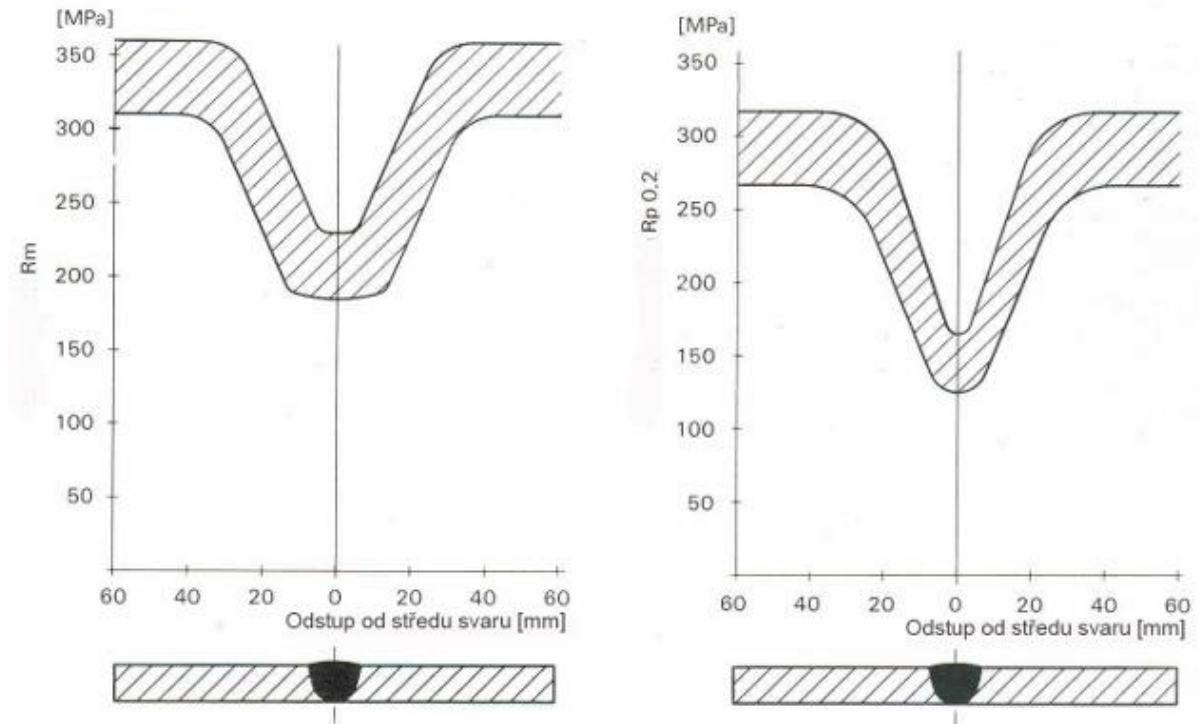
Pokles mechanických vlastností v TOO

U svařování vytvrditelných slitin může nastat problém poklesu mechanických vlastností, především pokles pevnosti a tvrdosti, tzv. odpevnění v TOO a svarovém kovu. Tento pokles je způsoben ohřevem materiálu při svařování (nebo přehřevu) nad teplotu 200 °C (viz obr. 29), při které dochází k rozpouštění vytvrzující fáze. V TOO může dojít k poklesu tvrdosti a pevnosti až na hodnoty v žíhaném stavu materiálu [10]. Současně s poklesem hodnot mechanických vlastností se snižuje i odolnost materiálu proti korozi [7].



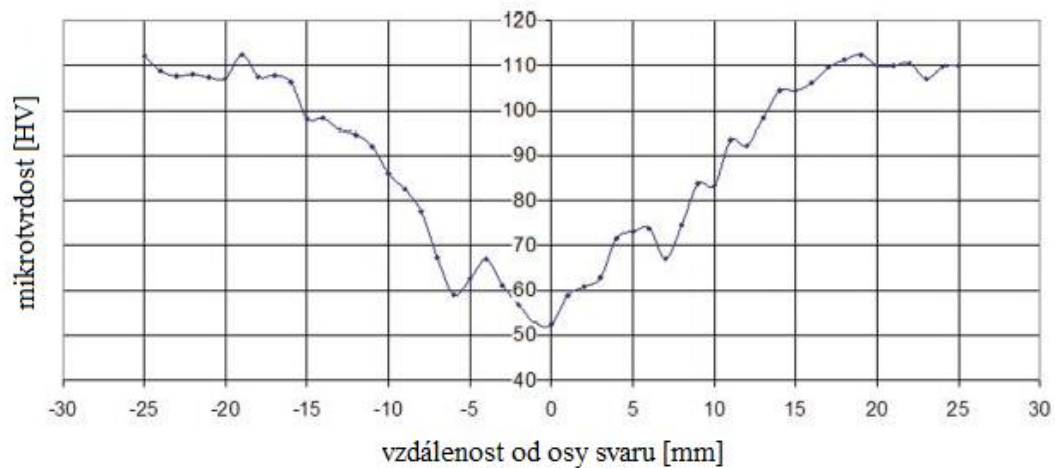
Obr. 29 Pokles pevnosti s rostoucí teplotou [39].

Pokles pevnosti vytvrditelné slitiny AlMgSi (skupina 6xx) je znázorněn na obr. 30. Tato citlivost na ohřev může způsobovat problémy také při opravách svarových spojů, jelikož pokles mechanických vlastností je závislý na době výdrže na teplotě. Následně tedy může docházet k praskání kovu v TOO. Řešením je následné TZ svarového spoje (rozpuštěcí žíhání a vytvrzovací žíhání).

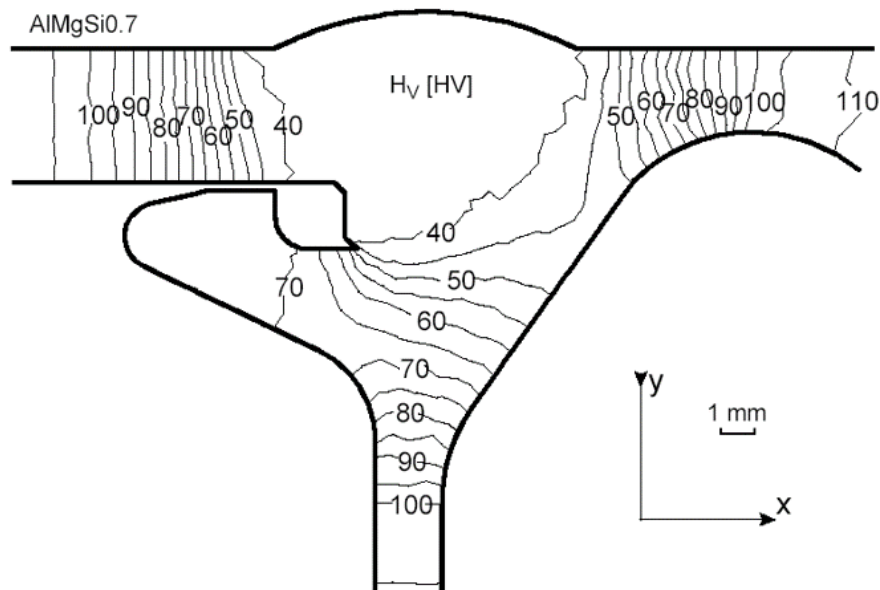


Obr. 30 Ztráta pevnosti v TOO vytvrditelné slitiny AlMgSi [39].

Analogicky dochází v TOO k poklesu tvrdosti materiálu, tak jak je znázorněno na obr. 31 a obr. 32. U svařování nevytvrditelných slitin se problémy s poklesem vlastností nevyskytují, jelikož nedochází k rozpouštění vytvrdzující fáze nebo k jejímu zhrubnutí.



Obr. 31 Pokles mikro-tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od osy svaru, podle [40].

Obr. 32 Pokles tvrdosti slitiny AlMgSi_{0,7} [39].

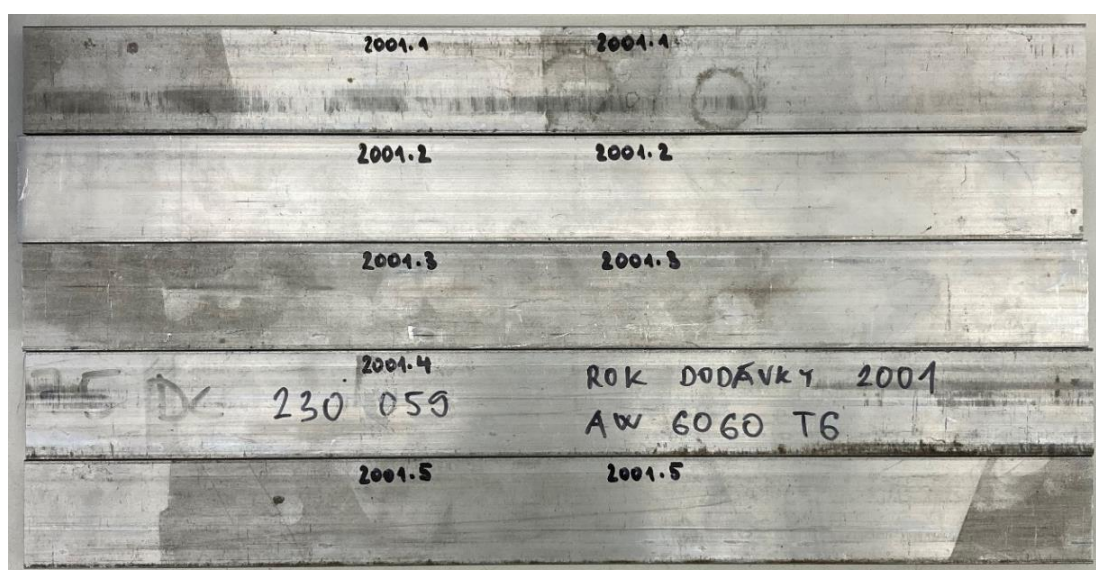
Další problematika

Dalším problémem při tavném svařování hliníkových slitin je neměnnost barvy hliníku při ohřevu. Tento jev způsobuje obtížné vizuální stanovení teploty a natavení a obecně sledování tavné lázně. Tím vzniká problém především u ručního svařování. Z toho důvodu jsou nutné dobré zkušenosti svářeče a kvalifikace pro svařování hliníku a jeho slitin tavným způsobem svařování. [7]

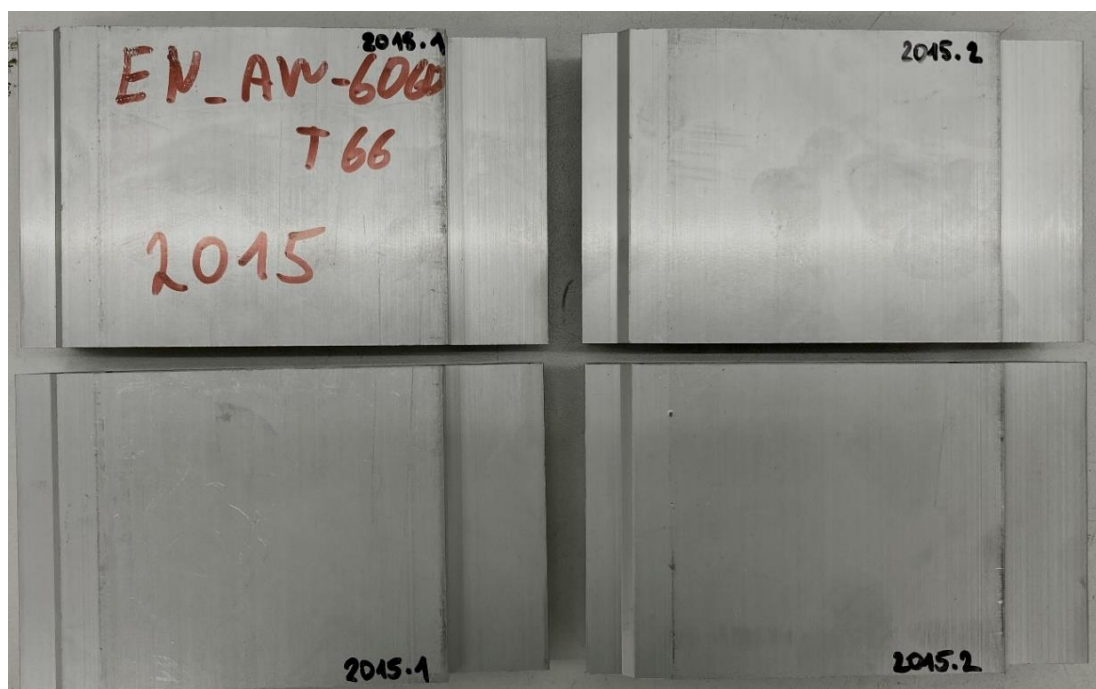
Koeficient tepelné roztažnosti určuje změnu délky v důsledku změny teploty. Hliník má velkou tepelnou (délkovou) roztažnost, což při ochlazení svarové oblasti způsobuje smrštění, které vyvolává vysoké vnitřní pnutí. To pak může následně vést k deformaci materiálu a tvorbě trhlin. Zejména u rozměrných svařovaných konstrukcí, kde je potřeba zajistit tvarovou, rozměrovou přesnost a opakovatelnost, to představuje velký problém. V těchto případech je nutné využívat prvotního nastehování dílů (pro zaručení opakovatelnosti je doporučováno dodržovat stále stejný postup) a upínacích přípravků. [41]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

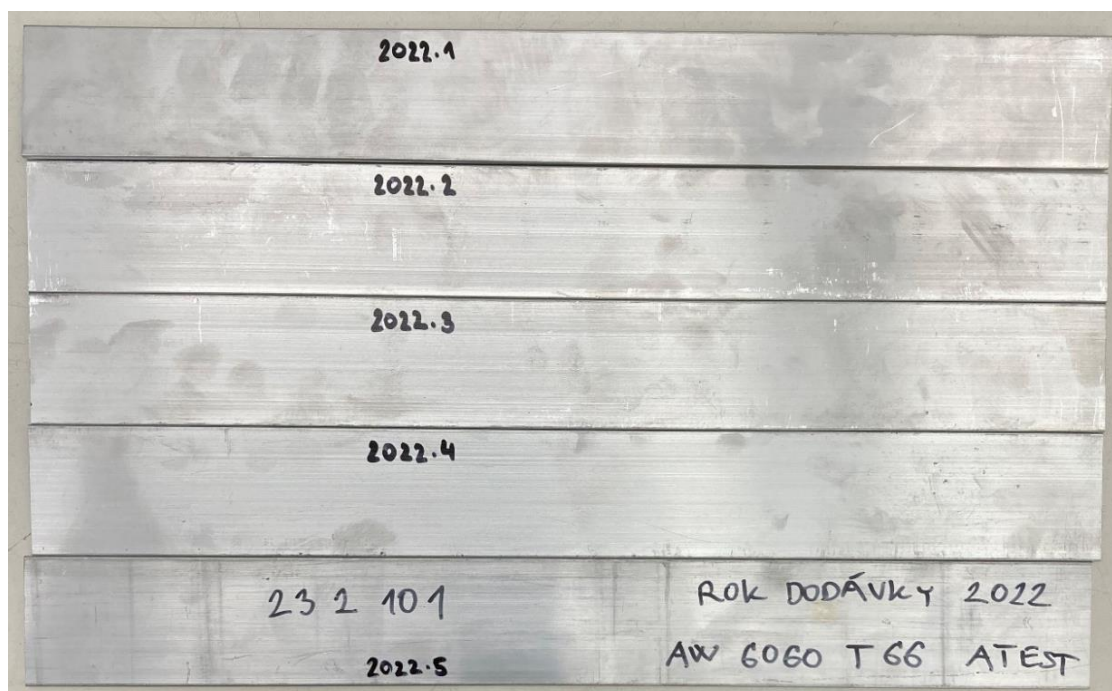
Porovnávání mechanických a technologických vlastností bylo provedeno na třech sadách vzorků, vždy totožné slitiny. První sada vzorků je z roku 2001, druhá sada z roku 2015 a třetí z roku 2022, viz obr. 33 až 35. Jedná se o slitinu EN AW 6060 s tepelným zpracováním T6 případně T66. Tepelné zpracování T66 se oproti T6 liší úrovní mechanických vlastností materiálu, přičemž u T66 je vyšších vlastností dosaženo speciálně řízeným zpracováním [17]. Atesty ke slitinám z roku 2015 a 2022 jsou přiloženy na konci diplomové práce, viz příloha 1 a příloha 3. Výkresová dokumentace profilu z roku 2015 je přiložena v příloze 2. Atest z roku 2001 není k dispozici, jelikož ve firmě nebyly atesty v té době archivovány přes systém a nebylo tedy možné jej dohledat. Vzorky z roku 2001 mají tloušťku 2 mm a šířku 34 mm, rozměry profilu z roku 2015 viz výkresová dokumentace v příloze 2, vzorky z roku 2022 mají tloušťku 3 mm a šířku 40 mm. U vzorků 2001 a 2022 pak šířka odpovídá délce zhotovené svarové housenky.



Obr. 33 Sada vzorků rok 2001.



Obr. 34 Sada vzorků rok 2015.



Obr. 35 Sada vzorků rok 2022.

Popis slitiny EN AW 6060

Slitina EN AW 6060 je slitinou $AlMgSi_{0,5}$. Jedná se o precipitačně vytvrditelnou slitinu s obecně dobrou tvařitelností za studena i za tepla a ve vytvrzeném stavu s dobrou pevností. Možnost precipitačního vytvrzování umožňuje intermetalická fáze Mg_2Si , standardně používané stavy tepelného zpracování jsou T4, T5, T6, T64, T66. Slitina je dobře svařitelná běžnými postupy, jako je svařování elektrickým obloukem v ochranném plynu TIG a MIG. Jelikož se jedná o vytvrditelnou slitinu, předpokládá se až 50% pokles pevnosti v TOO svarového spoje. Dále se slitina vyznačuje velmi dobrou odolností proti korozi a je vhodná k povrchové úpravě anodickou oxidací. Díky svým vlastnostem je používána na výrobu protlačovaných profilových konstrukcí, užití nachází zejména v dopravním a automobilovém průmyslu a v architektuře. Je možné ji využít i při styku s potravinami pro užití v potravinářském průmyslu. Chemické složení slitiny je uvedeno v tab. 4. Pevnost v tahu slitiny při TZ T6 se pohybuje kolem 200 MPa a více, mez kluzu $R_{p0,2}$ kolem 150 MPa a tažnost je minimálně 8 %. [42; 43]

Tab. 4 Typické chemické složení slitiny EN AW 6060 [12].

	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti
obsah [%]	0,35-0,6	0,3-0,6	0,1-0,3	≤0,10	≤0,10	≤0,05	≤0,15	≤0,10

Pro provedení experimentální části diplomové práce byly výše zmíněné vzorky příslušně upraveny a svařeny kvalifikovaným svářečem metodou TIG. Vzorky (sada 2001 a 2022) byly nejprve nařezány a svarové plochy byly těsně před samotným procesem svařování mechanicky očištěny pomocí brusného papíru. Následně byly sražené hrany u všech svarových ploch a základní i přídatný materiál byl odmaštěn. Sražení hran je podstatné, aby se u kořene svaru netvořila vrstva oxidů, která následně způsobuje vady kořene a zvyšuje nebezpečí vzniku trhlin v oblasti kořene (obr. 36).

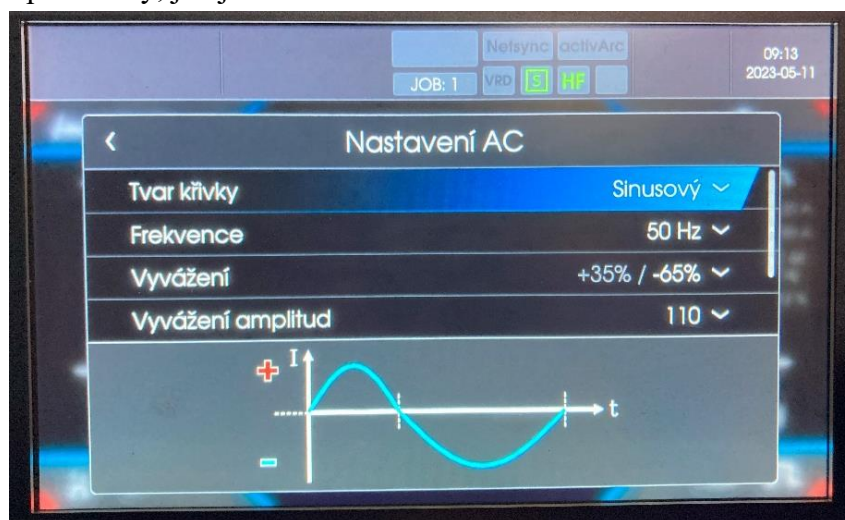


a) špatně: bez sražení

b) správně: sražené hrany

Obr. 36 Vliv svarové mezery na kvalitu svaru [29].

Svařování vzorků proběhlo na fakultě FSI VUT v Brně ruční svářečkou EWM Tetrix XQ 230 puls (obr. 38). Svářečka umožňuje vysoké zatížení u svařovacích proudů od 3 do 230 A. Díky přehlednému grafickému panelu lze jednoduše nastavit AC, DC nebo pulsní režim a upravit další svařovací parametry, jak je znázorněno na obr. 37.



Obr. 37 Grafický panel svářečky.



Obr. 38 Svářečka EWM Tetrix XQ 230 puls [2].

Vzorky ze sady 2001 a 2022 byly svařeny vždy jednou svarovou housenkou z jedné strany. U sady 2015, jelikož se jedná o uzavřený profil, proběhlo svařování z obou stran. Druhá strana

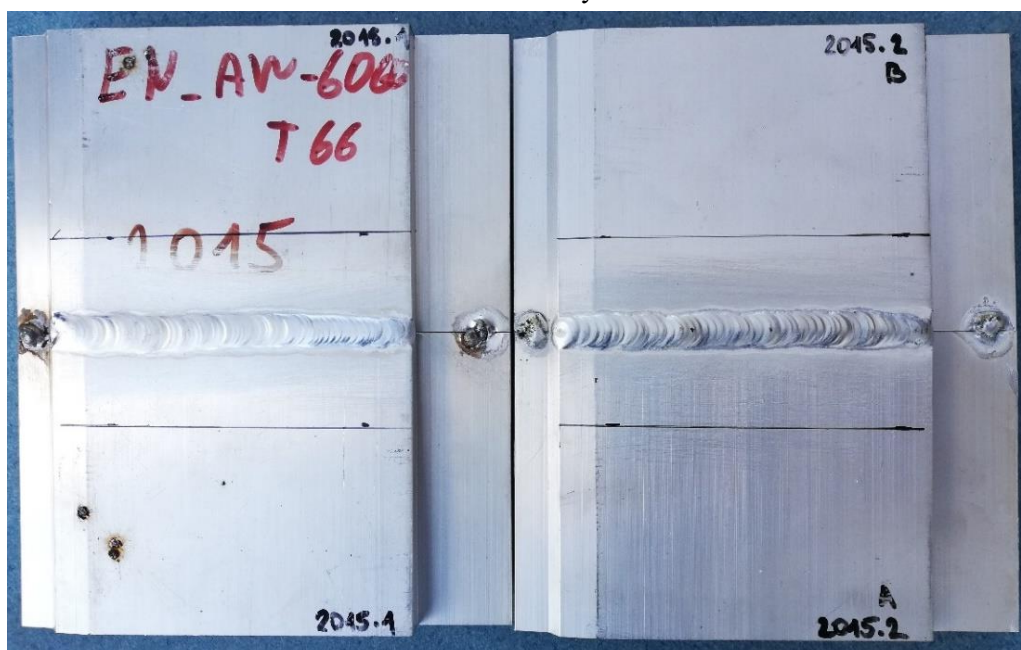
profilu byla svařována nižším proudem, jelikož už do základního materiálu bylo vneseno teplo při tvorbě první svarové housenky a materiál byl tedy již přehřát. Svařovací proudy a napětí jsou uvedeny v tab. 5. U sady 2015 byl zvolen vyšší svařovací proud, jelikož se jedná o vzorky větších rozměrů a kvůli vysoké tepelné vodivosti materiálu (odvod tepla z místa svaru) je nutné zvolit vyšší teplený příkon pro stejné natavení materiálu. Svařené vzorky viz obr. 39 až 41.

Tab. 5 Hodnoty svařovacího proudu a napětí.

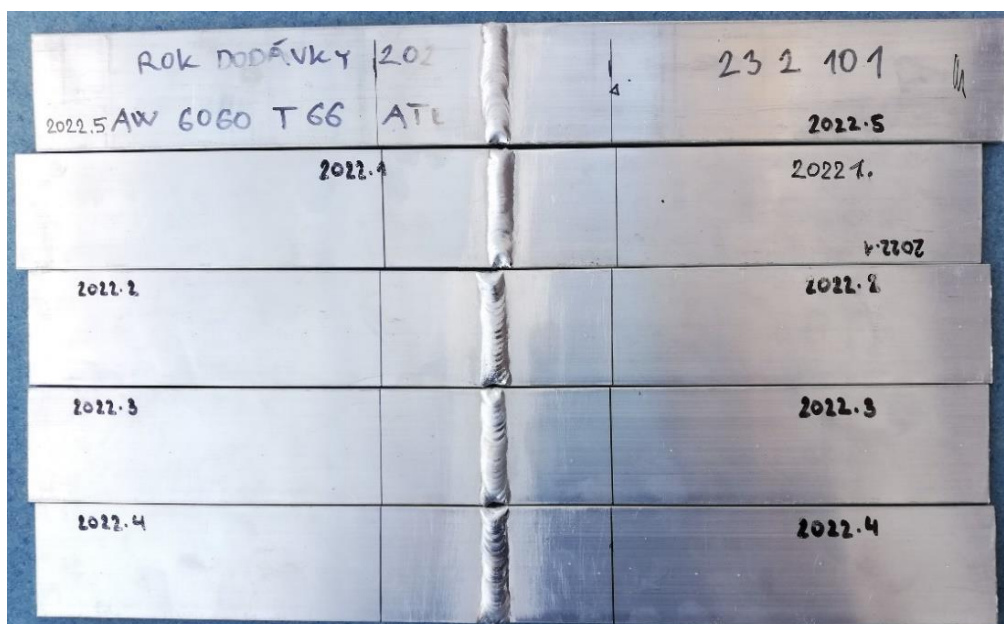
	I [A]	U [V]
sada 2001	90	14
sada 2015 (1.strana)	120	14,7
sada 2015 (2. strana)	110	14,5
sada 2022	90	14



Obr. 39 Svařené vzorky sada 2001.



Obr. 40 Svařené vzorky sada 2015.



Obr. 41 Svařené vzorky sada 2022.

Jako přídavný materiál (dále jen PM) byl využit přídavný drát Union AlMg4,5MnZr o průměru 2,4 mm, stejný jako je využíván ve firmě Pars Komponenty. Popis zobrazen na obr. 42, tabulka chemického složení viz tab. 6. Díky přítomnosti zirkonu v přídavném materiálu dochází ke zjemnění zrna, zlepšují se mechanické vlastnosti a svar je tak odolnější vůči vzniku trhlin. Mez pevnosti PM je rovna 275 MPa, $R_{p0,2}$ 125 MPa a tažnost materiálu je 17 % [44]. Kompletní materiálový list je přiložen v příloze 4. Jako ochranný plyn byl použit argon o čistotě 5,0.



Obr. 42 Popis přídavného materiálu.

Tab. 6 Chemické složení PM Union AlMg4,5MnZr [44].

	Mn	Cr	Mg	Zr	Ti	Fe	Si	Zn
obsah [%]	0,7-0,11	0,05-0,25	4,5-5,2	0,1-0,2	≤0,15	≤0,4	≤0,25	≤0,25

Vyvážení AC amplitudy určuje podíl mezi kladnou a zápornou složkou proudu a umožňuje tak nastavit optimální rozdělení mezi vnosem tepla do tavné lázně a čistícím účinkem střídavého proudu. Při svařování vzorků bylo vyvážení 65 % ku 35 %, kde 65 % připadalo na zápornou polaritu a převažoval tak vnos tepla nad čistícím účinkem. Předfuk pro vytvoření vhodných

podmínek pro zapálení a hoření oblouku byl nastaven na 3 s. Dofuk pro ochranu tuhnoucího svaru a urychlení chlazení elektrody představoval 5,2 s. Nastavené svařovací parametry na grafickém panelu svářečky jsou zobrazeny na obr. 43.



Obr. 43 Nastavení svařovacích parametrů na svářečce.

Destruktivní zkoušky

Destruktivní metody zkoušení slouží k určování mechanických vlastností základních materiálů a svarových spojů tak, aby dosahovaly na ně kladených požadavků. Dále jsou určeny pro posuzování bezpečnosti svařovaných konstrukcí a k odhalování vad ve svarových spojkách. Zkoušky jsou zaměřeny na kontrolu pevnostních a plastických vlastností, houževnatosti, tvrdosti atp. [45]

K ověření stanovených cílů diplomové práce, tedy k posouzení vlivu stáří materiálu na mechanické a technologické vlastnosti byly využity následující zkoušky:

- zkoušky tvrdosti,
- zkouška tahem,
- zkouška ohybem,
- makroskopická zkouška.

Podrobně jsou popsány i s příslušnými výsledky a závěry v následujících podkapitolách.

3.1 Měření tvrdosti

Statické zkoušky tvrdosti patří mezi základní destruktivní zkoušky. Tvrdost je obecně definována jako odpor kladený materiálem proti vnikání cizího tělesa. Jedná se v podstatě o odpor kladený vůči plastickému deformování. Podstatou zkoušek je vtlačování indentoru (zkušební tělesa) do povrchu materiálu a následné vyhodnocení na základě vzniklé trvalé deformace. Podle tvaru, materiálu indentoru a způsobu zatěžování se liší základní zkoušky tvrdosti materiálu, kterými jsou Brinellova zkouška, zkouška podle Vickerse a zkouška podle Rockwella. Zkoušky tvrdosti svarových spojů jsou zpravidla prováděny metodami podle Brinella nebo Vickerse dle normy ČSN EN ISO 9015-1. [45; 46]

Zkouška dle Brinella

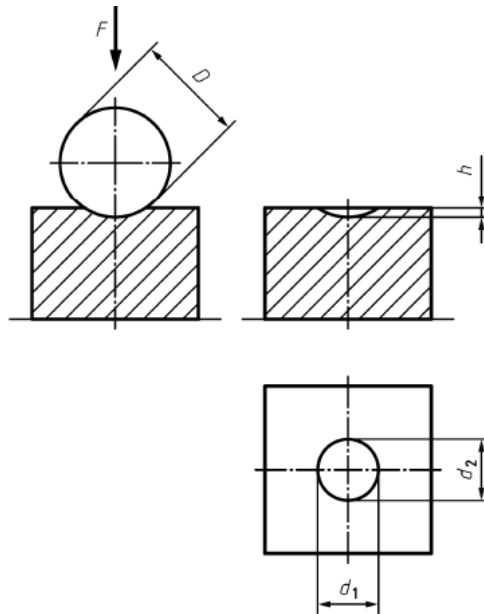
Zkouška dle Brinella je zpracována v evropské normě ČSN EN ISO 6506-1. Podstata zkoušky spočívá v zatlačování kuličky z karbidu wolframu o průměru „D“ do povrchu tělesa

předepsaným zatížením „F“. Po odlehčení je opticky měřen průměr „d“ vzniklého trvalého vtisku. U novějších tvrdoměrů je vyhodnocení prováděno automaticky. Tvrdost dle Brinella je označována písmeny HBW. Průměr vnikací kuličky a velikost zatížení jsou voleny v závislosti na tloušťce a druhu zkoušeného materiálu. Schéma principu zkoušky dle Brinella je zobrazeno na obr. 44. [45; 46; 47]

Tvrdost podle Brinella HBW se dle normy vypočítá [47]:

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D^2 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{D^2}}\right)} \quad (3.1)$$

kde: D – průměr kuličky [mm],
 F – zkušební zatížení [N],
 d₁ – střední průměr vtisku [mm].



Obr. 44 Princip zkoušky dle Brinella [47].

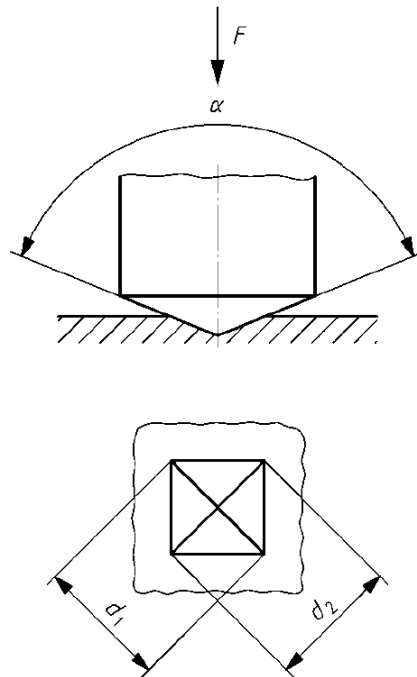
Zkouška dle Vickerse

Zkouška dle Vickerse je popsána evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1. Podstatou zkoušky je vtlačování diamantového indentoru ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou s předepsaným vrcholovým úhlem do povrchu zkoušeného materiálu předepsanou silou „F“. Po odlehčení v materiálu zůstane vtisk, jehož uhlopříčky jsou změřeny a následně určena tvrdost dle Vickerse podle vztahu 3.2. Jednotka tvrdosti dle Vickerse je označována písmeny HV. Princip a geometrie indentoru jsou zobrazeny na obr. 45. [45; 46; 48]

Tvrdost podle Vickerse se dle normy vypočítá [48]:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d_2^2} \quad (3.2)$$

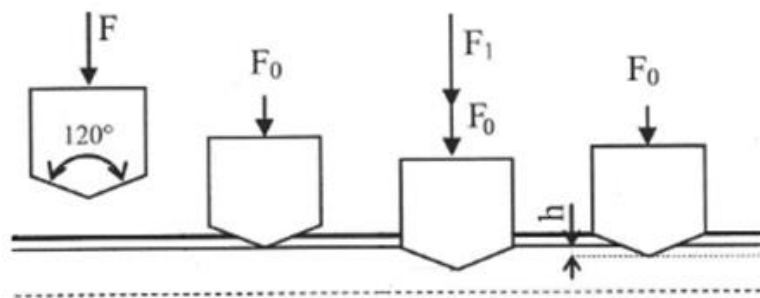
kde: d₂ – aritmetický průměr délek dvou uhlopříček [mm],
 F – zkušební zatížení [N].



Obr. 45 Princip zkoušky dle Vickerse [48].

Zkouška dle Rockwella

Zkouška dle Rockwella je stanovena normou ČSN EN ISO 6508-1. Podstatou zkoušky je zatlačování vnikacího tělesa specifikovaného rozměru, tvaru a materiálu do povrchu zkoušeného vzorku ve dvou krocích za předepsaných podmínek. V prvním kroku je zkušební vzorek zatížen předběžným zatížením a je měřena počáteční hloubka vtisku. Následně je vzorek zatížen přidavným zatížením, dále je odlehčeno na počáteční předběžné zatížení a je měřena trvalá hloubka vtisku. Postup zkoušky dle Rockwella je znázorněn na obr. 46. Hodnota tvrdosti je určena z rozdílu počáteční a trvalé (konečné) hloubky vtisku a příslušných konstant. Jednotka tvrdosti dle Rockwella je označována písmeny HR a dalším písmenem z rozmezí A až K, které určují použitou stupnici tvrdosti. [45; 46; 49]



Obr. 46 Princip zkoušky dle Rockwella [50].

3.1.1 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

Pro měření tvrdosti byly z každé sady vzorků vybrány 3 vzorky a na každém z nich bylo provedeno 10 měření pomocí ručního tvrdoměru Mitutoyo Hardmatic HH-140. Naměřená data jsou zobrazena v tab. 7, tvrdost je udávána v jednotkách Vickerse HV.

Tab. 7 Naměřené hodnoty tvrdosti.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2001.1	63	58	63	62	63	59	63	61	59	61
2001.3	61	60	61	66	61	64	59	64	63	62
2001.5	63	60	63	62	63	60	61	64	64	61
2015.1	72	74	76	72	73	72	71	74	72	73
2015.2A	75	71	74	73	76	69	62	73	74	75
2015.2B	70	72	71	69	70	74	70	65	73	75
2022.2	71	77	77	76	83	72	75	75	76	77
2022.3	73	76	77	81	70	79	83	79	75	78
2022.4	75	73	77	80	74	75	81	75	78	77

Z naměřených hodnot byl vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka vždy pro každou sadu vzorků dle následujících vztahů. Výsledné hodnoty jsou zapsány v tab. 8.

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.3)$$

a směrodatná odchylka:

$$s = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (3.4)$$

kde: N – počet měření [-],

x_i – jednotlivá měření ($i=1,2,3, \dots$) [-].

Tab. 8 Vyhodnocení měření tvrdosti.

	$\bar{x} \pm s$
sada 2001	61,8 ± 1,83 HV
sada 2015	72,0 ± 2,98 HV
sada 2022	76,5 ± 3,12 HV

Z výsledných hodnot v tab. 8 je patrné, že s rostoucím stářím materiálu dochází k mírnému poklesu tvrdosti základního materiálu.

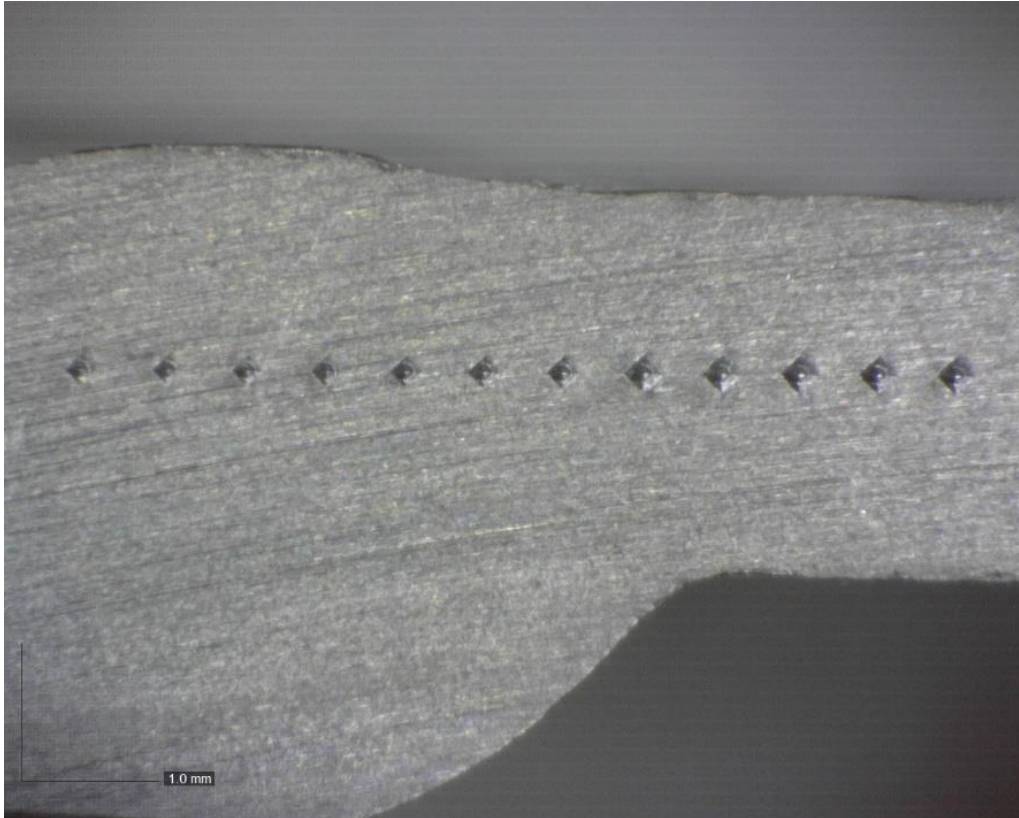
Pro ověření tvrdosti základního materiálu bylo provedeno doplňující měření bez vlivu povrchové oxidické vrstvy a povrchových napětí po nařezání vzorků. Měření bylo provedeno metodou dle Vickerse HV2, tedy s nominálním zatížením 19,61 N (2 kg) po dobu 10 s. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 9. Průměrná hodnota (dle vztahu 3.3) tvrdosti vzorku 2001 je 69,1 HV2, pro vzorek 2015 vyšla hodnota 71,4 HV2 a pro vzorek 2022 hodnota 72 HV2. Z hodnot je zřejmé, že nedochází k poklesu tvrdosti vlivem stáří materiálu.

Tab. 9 Doplňující hodnoty tvrdosti HV2.

	1	2	3	4	5	6	7
2001	69	67	69	70	73	67	69
2015	72	70	75	70	72	70	71
2022	71	71	73	74	72	70	73

3.2 Zkouška tvrdosti svarového kovu a materiálu v TOO

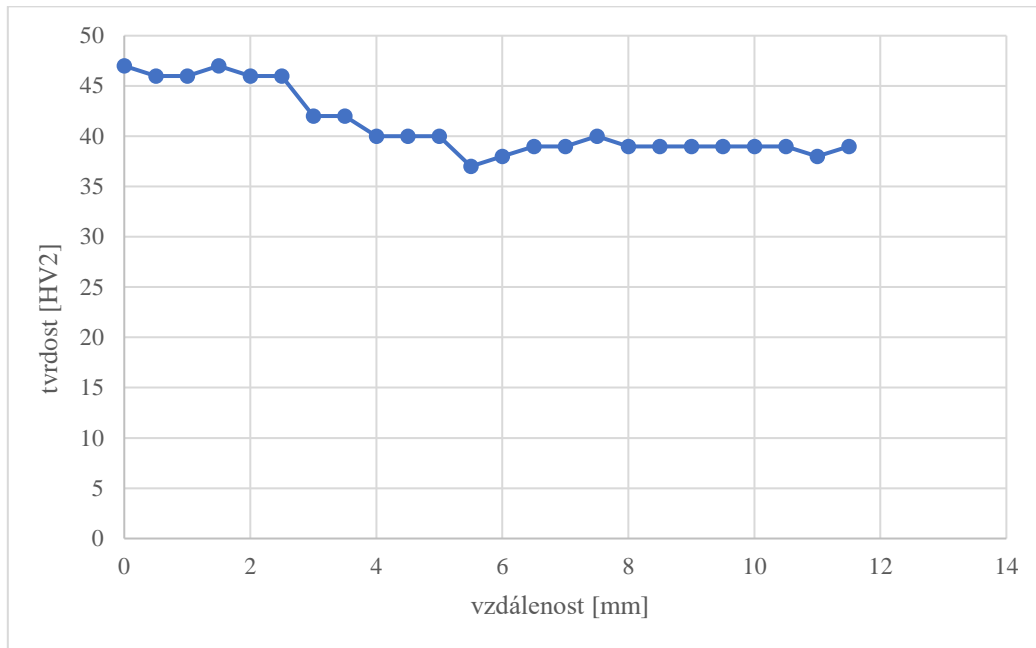
Tvrlost byla hodnocena vždy na jednom vzorku z každé sady. Měření proběhlo dle Vickerse HV2 (vysvětleno výše) v jedné linii vtisků vždy od středu svarového kovu do tepelně ovlivněné oblasti a dále do základního materiálu. Naměřené hodnoty jsou zapsány v následujících tabulkách (tab. 10 až tab. 12). Grafy naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od středu svarového kovu jsou vyobrazeny na obr. 48 až obr. 50. Detail měření vzorku 2015 je vidět na obr. 47.



Obr. 47 Detail vtisků při měření tvrdosti.

Tab. 10 Naměřené hodnoty vzorek 2001.

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
tvrdost [HV2]	47	46	46	47	46	46	42	42	40	40	40	37	38
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
	39	39	40	39	39	39	39	39	39	38	39		



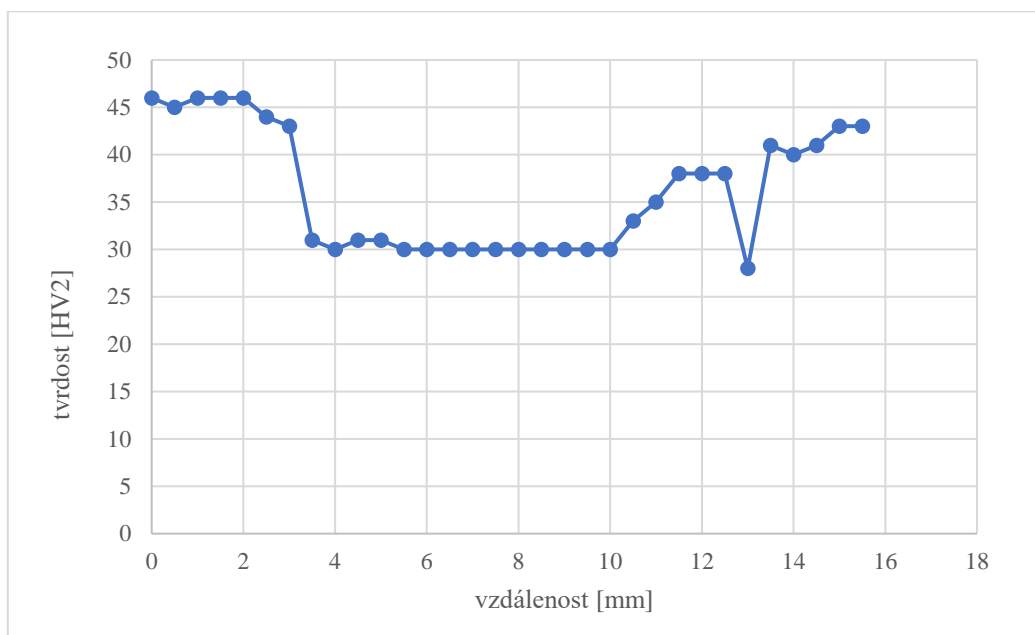
Obr. 48 Graf poklesu tvrdosti vzorek 2001.

Minimální naměřená hodnota byla 37 HV2, maximální hodnota 47 HV2. Dle hodnot znázorněných v grafu na obr. 48 je patrné, že v TOO dochází k mírnému poklesu tvrdosti oproti svarovému kovu. Naopak tvrdost svarového kovu je podpořena přísadou zirkonu v přídavném drátu použitým při svařování.

Oproti základnímu materiálu došlo u všech vzorků k výraznému poklesu tvrdosti, což je způsobeno ohřevem a tím způsobené koagulace (shlukování) a rozpouštění precipitátů. Tento jev je typický pro všechny vytvrditelné slitiny.

Tab. 11 Naměřené hodnoty vzorek 2015.

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
tvrdost [HV2]	46	45	46	46	46	44	43	31	30	31	31	30	30
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	30	30	30	30	30	30	30	30	33	35	38	38	38
	27	28	29	30	31	32							
	28	41	40	41	43	43							

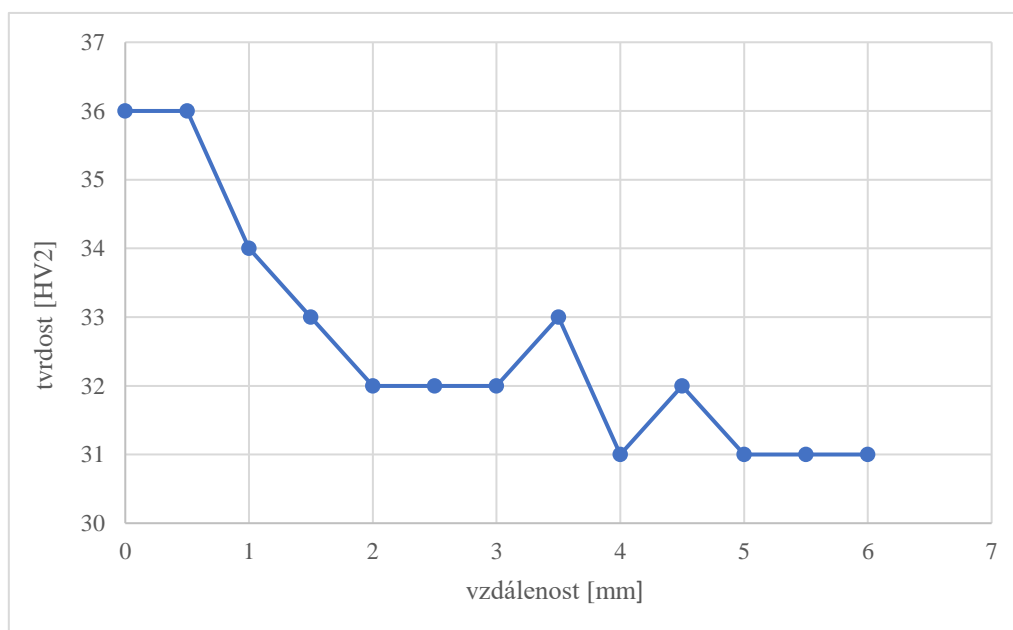


Obr. 49 Graf poklesu tvrdosti vzorek 2015.

Minimální naměřená hodnota byla 30 HV2, maximální hodnota 46 HV2. TOO vykazuje značný pokles tvrdosti oproti svarovému kovu (příčina viz výše). Opětný nárůst tvrdosti poukazuje na konec TOO, tedy měření v základním materiálu bez tepelného ovlivnění. Výkyv hodnoty tvrdosti na 28 HV2 při čísle měření 27, patrný i z grafu na obr. 49, nejspíše vznikl vpichem na hranici zrn, nebo vpichem do póru či jiné vady materiálu.

Tab. 12 Naměřené hodnoty vzorek 2022.

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
tvrdost [HV2]	36	36	34	33	32	32	32	33	31	32	31	31	31

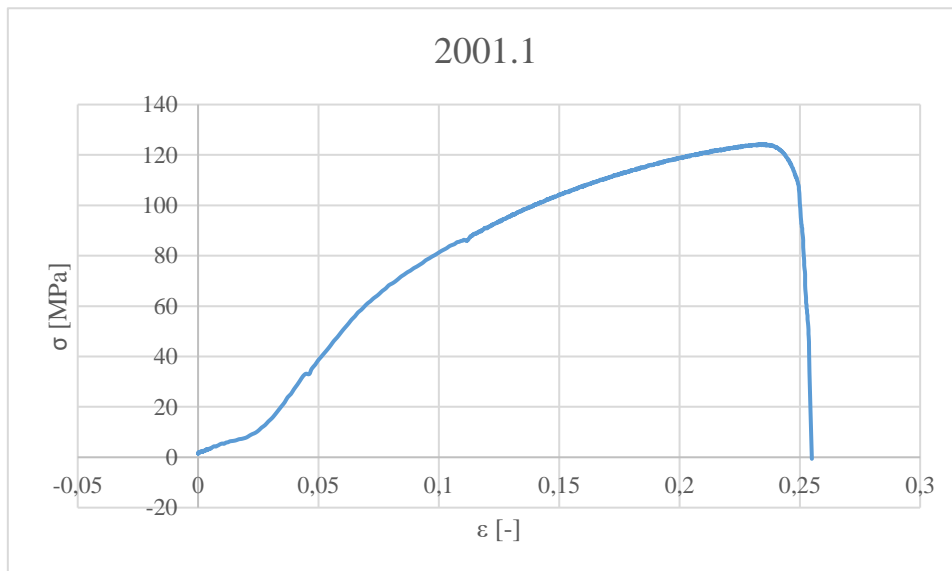


Obr. 50 Graf poklesu tvrdosti vzorek 2022.

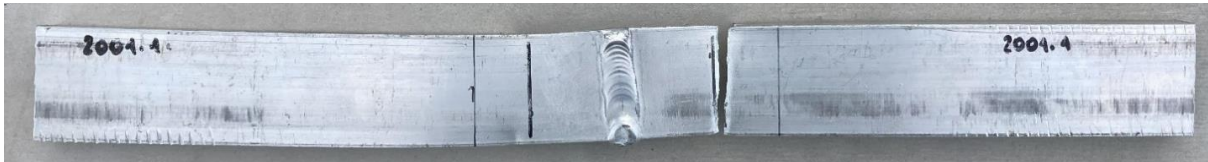
Minimální naměřená hodnota byla 31 HV2, maximální hodnota 36 HV2. Z grafu na obr. 50 je opět patrný mírný pokles tvrdosti v TOO.

Průměrná hodnota meze pevnosti R_m pro vzorek 2001 je 128 MPa, průměrná mez kluzu $R_{p0,2}$ je 56,6 MPa a tažnost 13 %. Při hodnocení sady 2015 byly vynechány zkušební vzorky přetržené v čelistech. Průměrná hodnota R_m potom vyšla 118 MPa, $R_{p0,2}$ 54,67 MPa a tažnost 9,67 %. Jelikož u třech zkušebních vzorků 2022 došlo k přetržení ve svařovém kovu kvůli nespojitosti u kořene svaru, nelze tyto hodnoty porovnávat s průměrnými hodnotami vzorků 2001 a 2015. Průměrné hodnoty budou porovnávány s hodnotami vzorku 2022.1 jehož mez pevnosti R_m je 130 MPa, $R_{p0,2}$ je 74 MPa a tažnost 12 %.

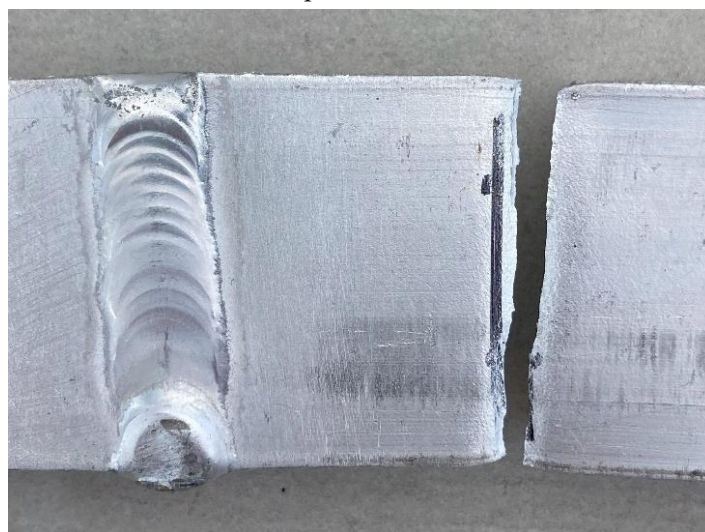
Graf tahové zkoušky vzorku 2001.1 je znázorněn na obr. 52. Na obr. 53 je vidět místo přetržení vzorku 2001.1 a detail lomu na obr. 54. Jedná se o tvárný lom v TOO svařeného vzorku. Zbylé grafy tahové zkoušky a fotodokumentace vzorků jsou přiloženy v příloze 6 na konci diplomové práce.



Obr. 52 Graf tahové zkoušky vzorku 2001.1.



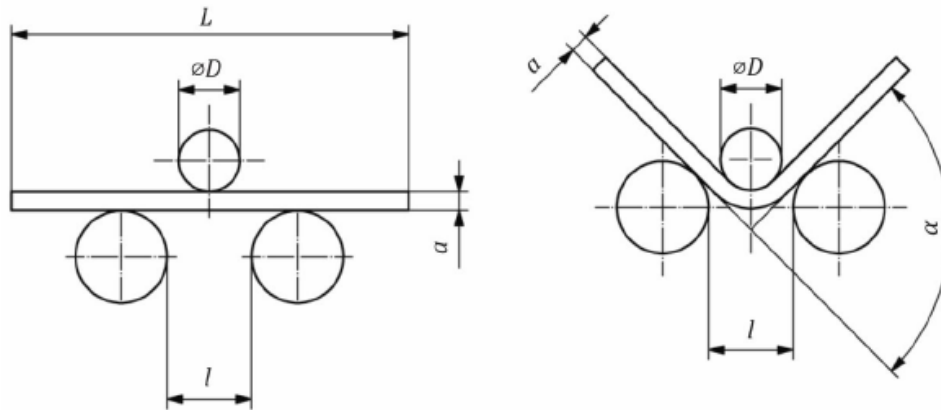
Obr. 53 Místo přetržení vzorku 2001.1.



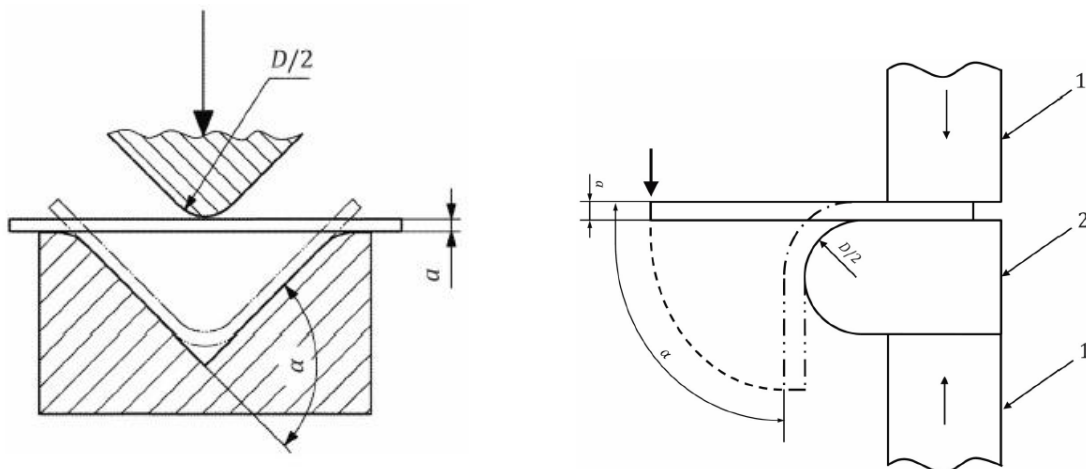
Obr. 54 Detail přetržení vzorku 2001.1.

3.4 Zkouška ohybem

Mezi další destruktivní zkoušku základních materiálů patří zkouška ohybem, která slouží pro stanovení schopnosti materiálu plasticky se deformovat ohybem. Jedná se o zkoušku tvařitelnosti za studena. Obvykle je zkouška prováděna tříbodovým ohybem na zařízení s dvěma podporami a trnem (obr. 55). Dále je využíváno ohýbání do matrice tvaru „V“ (obr. 56 vlevo) nebo v ohýbacím přípravku s upínacími čelistmi (obr. 56 vpravo). Aby zkouška ohybem proběhla úspěšně, je nutné, aby zkušební vzorek dosáhl požadovaného úhlu ohybu bez vzniku viditelných trhlin na povrchu. [46; 51]



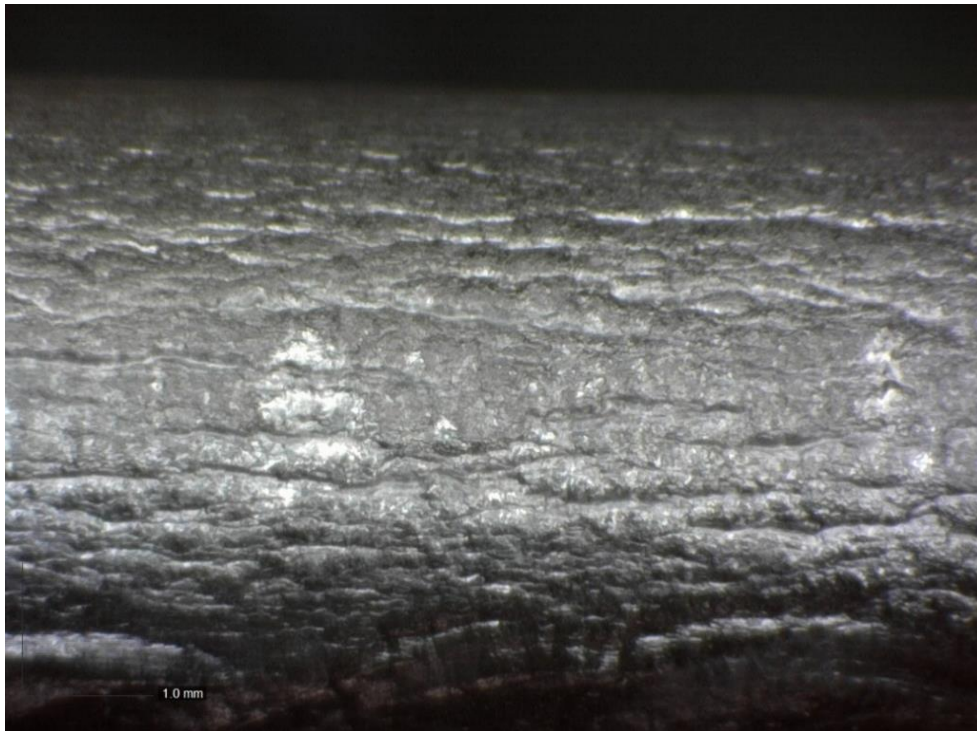
Obr. 55 Tříbodový ohyb [51].



Obr. 56 Matrice tvaru „V“ (vlevo), přípravek s upínacími čelistmi (vpravo) [51].

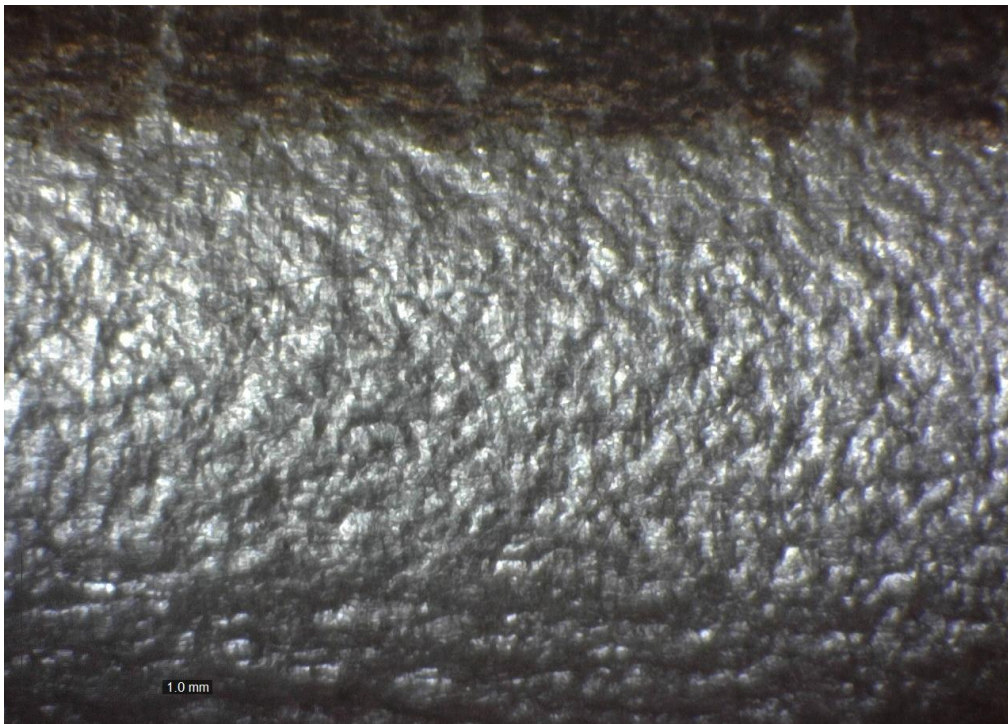
3.4.1 Vyhodnocení zkoušky ohybem

Pro zkoušku ohybem byly použity celkem tři vzorky, vždy jeden vzorek z každé sady. Zkušební vzorky byly odebrány ze svařených kusů tak, aby zahrnovaly svarový kov a TOO. Samotný ohyb byl proveden v TOO v těsné blízkosti svarového spoje pro zjištění změny (poklesu) vlastností způsobené ohřevem při svařování. Ohyb byl prováděn do úhlu ohybu 180° na ruční dílenské ohýbače.



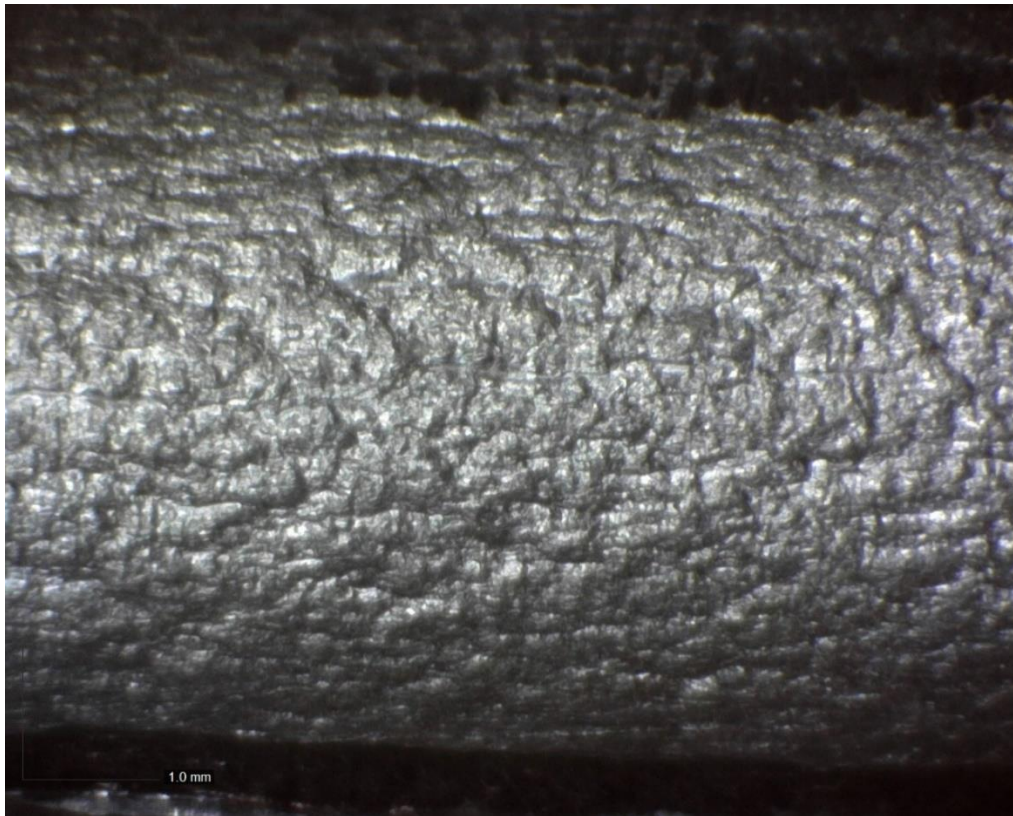
Obr. 57 Ohyb vzorek 2001.

Na obr. 57 je vidět makroskopický snímek ohybové plochy u vzorku ze sady 2001. Z fotografie je patrné zvrásnění materiálu na vnější straně. Žádné povrchové trhliny nebyly zaznamenány.



Obr. 58 Ohyb vzorek 2015.

Na obr. 58 je vidět ohybová plocha vzorku 2015. Obdobně jako u vzorku z roku 2001 je materiál zvrásněn bez zjevných povrchových trhlin.



Obr. 59 Ohyb vzorek 2022.

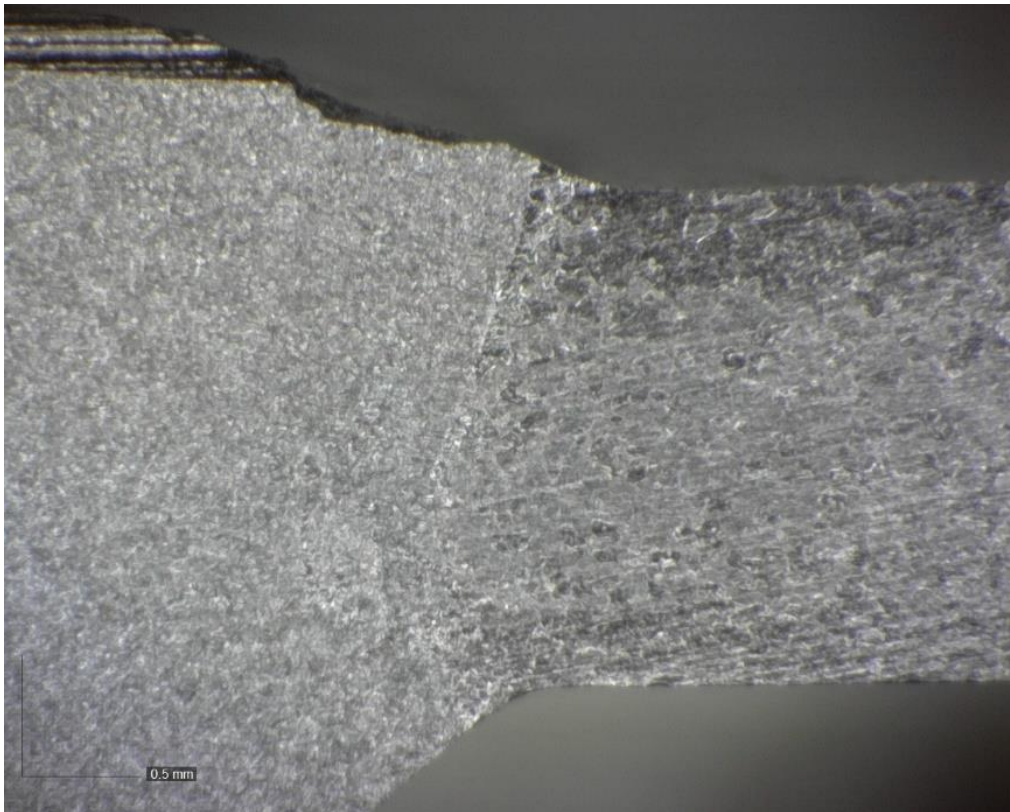
Na obr. 59 je zobrazena ohybová plocha vzorku 2022. Nedošlo ke vzniku trhlin, plocha je zvrásněná. Na vzorcích 2015 a 2022 je ze struktury ohybové plochy patrná velikost a tvar zrn materiálu. Nerovnosti jsou způsobeny skluzem na hranici zrn. Všechny zkoušené vzorky vyhovely požadavkům zkoušky ohybem.

3.5 Makroskopická zkouška

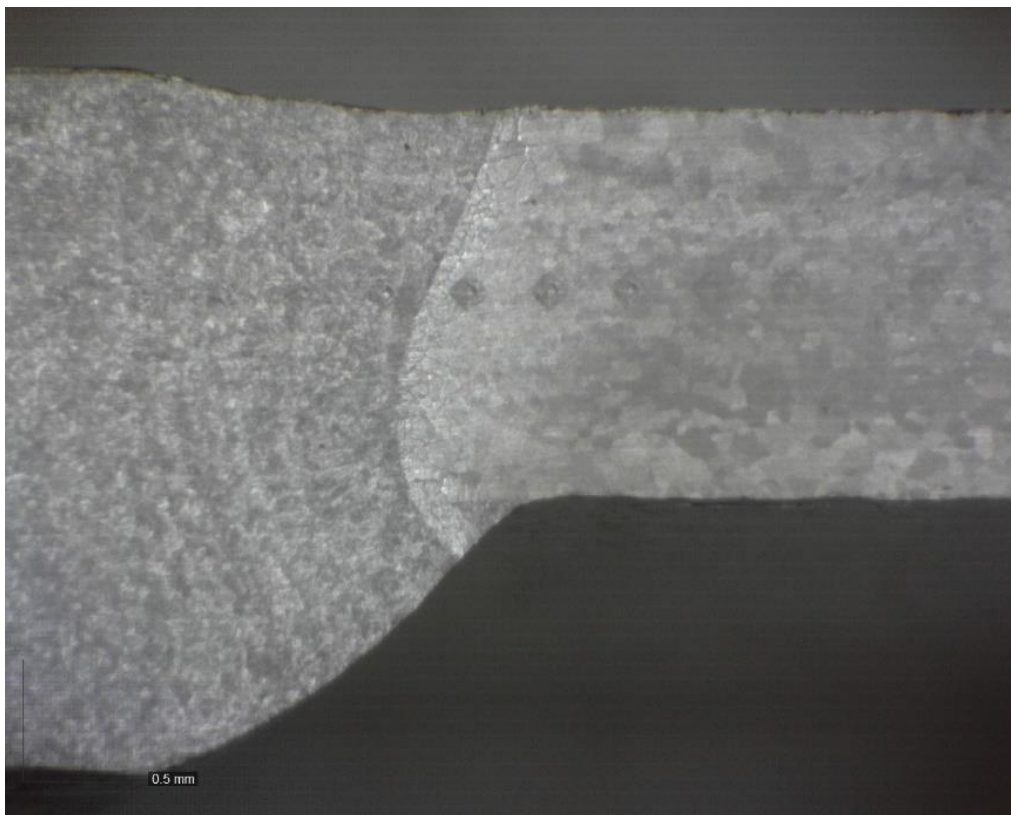
Makroskopická zkouška je metalografická zkouška, kterou se rozumí kontrola pouhým okem nebo pod mikroskopem při zvětšení méně než 50×. Kontrola je využívána ke zjištění vad ve svarovém spoji nebo ve struktuře materiálu, k posouzení charakteristik svaru, jeho tvaru nebo velikosti TOO. Zkoumán je příčný řez v nenaleptaném nebo naleptaném stavu. Zkušební vzorky jsou nařezány kolmo k ose svaru tak, aby byl zahrnut svarový kov i tepelně ovlivněná oblast a základní materiál. Příprava vzorků probíhá v několika krocích. Nejprve jsou vzorky nařezány, dále jsou broušeny (případně i leštěny) a podle požadavků mohou být naleptány. Leptání může probíhat ponořením vzorků do leptacího média, potíráním povrchu leptadlem nebo elektrolytickým leptáním. [52]

Vyhodnocení makroskopické zkoušky

Z každé sady vzorků byl připraven jeden zkušební vzorek. Vzorky byly nejprve nařezány na ručním řezacím stroji Struers Labotom-5, který je určený pro metalografickou přípravu. Jedná se o mokré abrazivní řezání. Stroj je vybaven cirkulačním systémem chladicí kapaliny a bezpečnostním krytem. Po nařezání byly vzorky vybroušeny na ruční dvoukotoučové brusce Saphir 330 při současném chlazení vodou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění materiálu. Po vybroušení byly vzorky naleptány ponořením do leptadla za současného zvýšení teploty pro zvýšení leptacího účinku. Jako leptadlo byl zvolen přípravek Keller roztok od společnosti Penta Chemicals Unlimited. Obsahuje kyselinu chlorovodíkovou, dusičnou a fluorovodíkovou. Po naleptání byly vzorky očištěny vodou a osušeny.

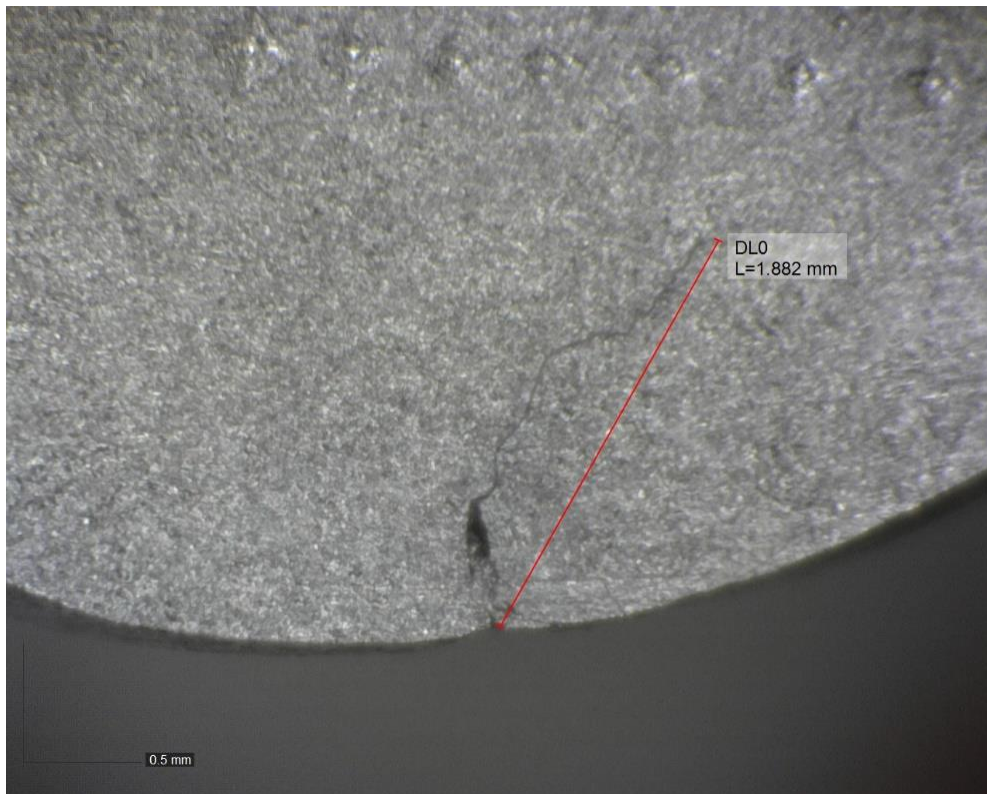


Obr. 60 Vzorek rok 2001.



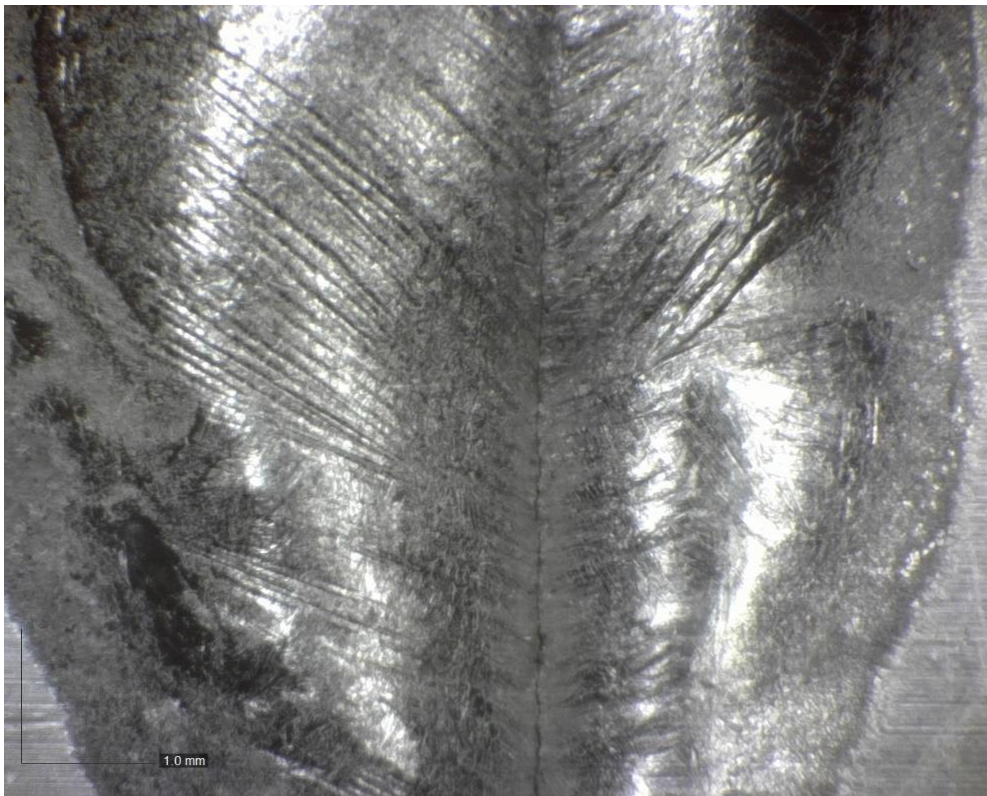
Obr. 61 Vzorek rok 2015.

Na obr. 60 a obr. 61 jsou vidět vzorky z roku 2001 a 2015. Na vzorcích je patrný přechod svarového kovu a základního materiálu po naleptání. Ve svarovém kovu ani v TOO nebyly nalezeny žádné vady.

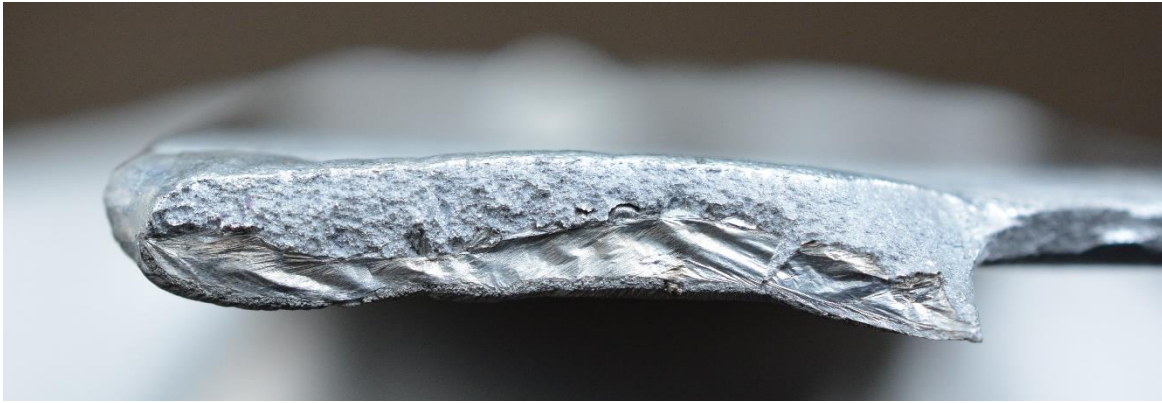


Obr. 62 Trhlina ve svarovém kovu vzorku 2022.

Na obr. 62 je patrná trhlina ve svarovém kovu u kořene svaru. Jedná se o trhlinu za horka u vzorku z roku 2022. Vada byla způsobena nespojitostí u kořene svaru, která je zobrazena na obr. 63.



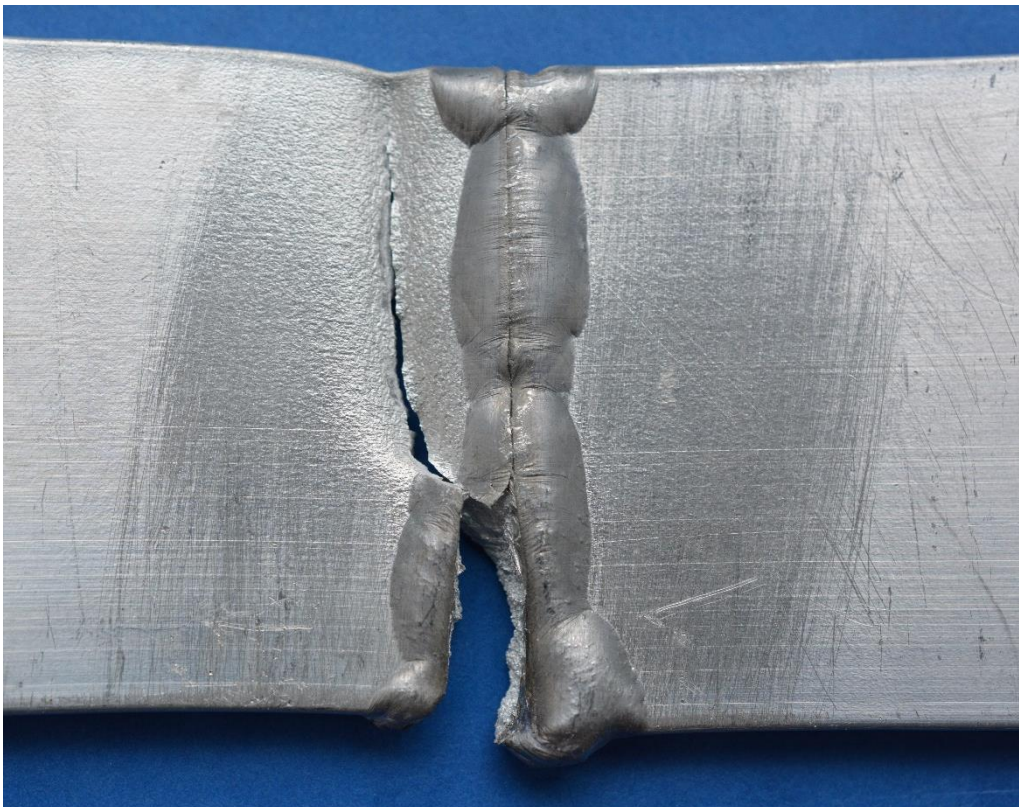
Obr. 63 Nespojitost v kořeni svaru.



Obr. 64 Detail lomové plochy.

Na obr. 64 je vidět lomová plocha ve svarovém kovu vzorku z roku 2022. Lom byl způsobený nahromaděním oxidů u kořene svaru (lze vidět na spodní straně lomové plochy). Pro zamezení vzniku této vady je doporučena důkladnější příprava svarových ploch, zejména větší sražení hran. Provedené sražení hran je zobrazeno v příloze 7 na makroskopickém snímku. Dalším doporučením je zvýšení svařovacího proudu, jelikož se jedná o vzorek s větší tloušťkou a zvolená hodnota proudu se jeví jako nedostatečná.

Na obr. 65 je patrná nespojitost svaru s následným lomem po tahové zkoušce vzorku 2022. K iniciaci lomu došlo v nespojitosti. Následně došlo k vybočení lomu z původního směru šíření do TOO, která vykazuje pokles pevnostních charakteristik. Více detailních snímků dalších vzorků je přiloženo na konci diplomové práce v příloze 8.



Obr. 65 Detail lomu způsobeného nespojitostí.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V následujících podkapitolách jsou v rámci technického zhodnocení shrnuty výsledky provedených zkoušek v experimentální části. Problematika je dále zhodnocena i z ekonomické stránky.

4.1 Technické zhodnocení

V tab. 14 jsou zobrazeny svařovací parametry na základě kterých je vypočítán tepelný příkon Q [$\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$]. Tepelný příkon je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících vlastnosti svarů a šířku TOO. Velikost tepelného příkonu výrazně ovlivňuje teplotní cyklus svařování. Na jeho tvar má vliv především přehřev a případná tepelná izolace svarového spoje. Tepelný příkon je také uváděn ve specifikaci postupu svařování, tzv. WPS (Welding Procedure Specification). Svařovací postupy jsou zhotovovány pro svarové spoje, které musí bezpečně odolávat statickému, dynamickému nebo termodynamickému zatížení. WPS slouží také jako podklady pro plánování svářečských operací a pro zaručení kvality výrobku. Zpracovaný WPS je uveden v příloze 9 na konci diplomové práce.

Tab. 14 Svařovací parametry.

I [A]	U [V]	v_s [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	η [-]
120	14,7	62	0,65

Tepelný příkon Q je dle EN 1011-1 vyjádřen rovnicí 4.1 [53]:

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s \cdot 1000} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4.1)$$

$$Q = 0,65 \cdot \frac{14,7 \cdot 120}{1,03 \cdot 1000} = 1,1132 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde:

- η – tepelná účinnost, dle druhu svařování [-],
- U – svařovací napětí [V],
- I – svařovací proud [A],
- v_s – postupová svařovací rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$].

Dále technické zhodnocení shrnuje výsledky provedených zkoušek základního materiálu a svarových spojů. Jedná se o zkoušky tvrdosti, zkoušku tahem, ohybem a makroskopickou zkoušku.

Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti základního materiálu byla provedena na třech vzorcích z každé sady vzorků. Na každém ze vzorků bylo provedeno 10 měření. Pro vzorky 2001 vyšla průměrná hodnota tvrdosti 61,8 HV, pro vzorky 2015 tvrdost 72,0 HV a pro vzorky 2022 tvrdost 76,5 HV. Z výsledků je patrný mírný pokles tvrdosti se zvyšujícím se stářím materiálu. Pro ověření tvrdosti bez vlivu povrchové napjatosti a vrstvy Al_2O_3 bylo provedeno doplňující měření dle HV2. Průměrná hodnota pro vzorek 2001 vyšla 69,1 HV2, pro vzorek 2015 71,4 HV2 a pro vzorek 2022 72 HV2.

Zkouška tvrdosti svarového kovu a materiálu v tepelně ovlivněné oblasti

Tvrdost byla měřena celkově na třech vzorcích, z každé sady na jednom vzorku. Měřena byla tvrdost svarového kovu a základního materiálu v TOO. U vzorku 2001 byla nejnižší naměřená

hodnota 37 HV2, nejvyšší 47 HV2. Nejnižší hodnota u vzorku 2015 byla 30 HV2 a nejvyšší 46 HV2. U vzorku 2022 nejnižší hodnota 31 HV2, nejvyšší 36 HV2. Z výsledků je patrný mírný pokles tvrdosti v TOO způsobený ohřevem materiálu při svařování. Tvrdost svarového kovu je příznivě ovlivněna přísadou zirkonu v PM. V základním materiálu mimo TOO dochází k opětovnému růstu hodnot tvrdosti.

Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena celkem na 12 vzorcích za pokojové teploty. U vzorků ze sady 2001 a 2015 došlo k přetržení v základním materiálu (v TOO). Průměrná hodnota meze pevnosti u vzorků 2001 byla 128 MPa, u vzorků 2015 průměrná mez pevnosti 118 MPa. U vzorků ze sady 2022 se tři vzorky ze čtyř přetrhly ve svarovém spoji. Důvodem přetržení ve svarovém kovu byla nespojitost v kořeni svaru, které vedla k iniciaci trhliny a následnému porušení materiálu. Z toho důvodu nejsou hodnoty relevantní k porovnání. Hodnota meze pevnosti vzorku 2022.1 přetrženého v TOO je 130 MPa.

Zkouška ohybem

Ohybová zkouška byla provedena na třech vzorcích (z každé sady na jednom zkušebním vzorku). Ohyb byl proveden v TOO. Všechny vzorky vyhovely požadavkům zkoušky, tedy nedošlo ke vzniku povrchových trhlin. Ohybové plochy jsou zvrásknené.

Makroskopická zkouška

Při makroskopické zkoušce byla u vzorku z roku 2022 zjištěna trhlina za horka způsobená nespojitostí kořene svaru. Trhlina dále představuje nebezpečné místo, ve kterém dochází k porušení materiálu při zatížení (viz tahová zkouška). U vzorků 2001 a 2015 nebyly zjištěny žádné vady.

4.2 Ekonomické zhodnocení

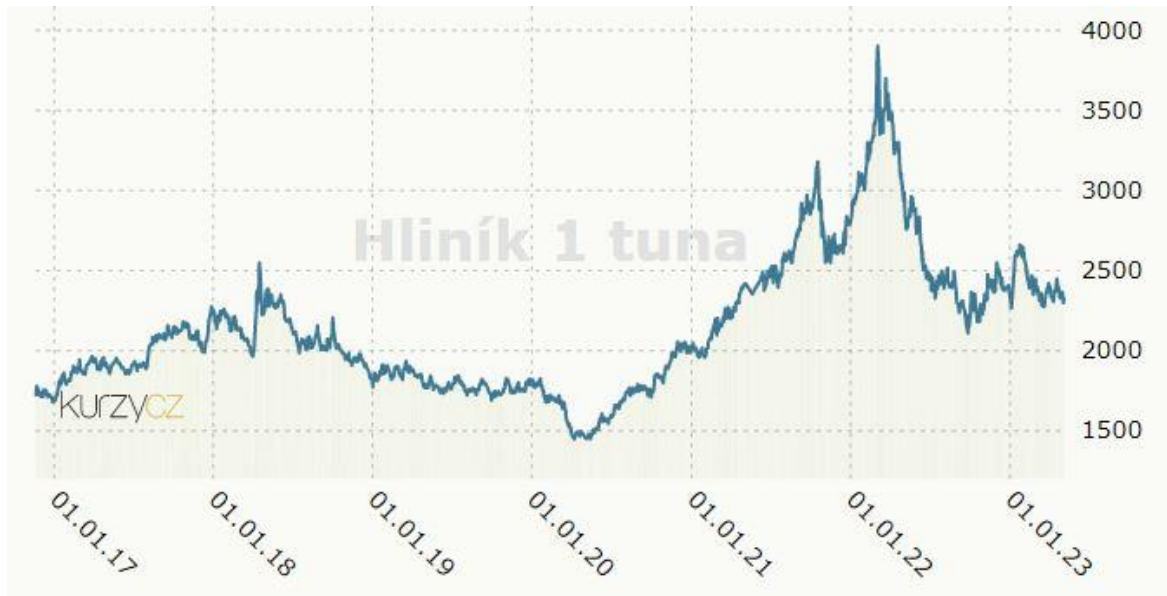
V rámci ekonomického zhodnocení je probrána finanční a časová náročnost výroby výkresových (zakázkových) hliníkových profilů. Respektive se jedná o posouzení vhodnosti použití skladových profilů s ohledem na jejich vlastnosti.

Pro posouzení časové náročnosti výroby výkresových profilů je vhodné si proces rozdělit do třech na sebe navazujících kroků. V prvním kroku je odběratelem zaslán požadavek na výrobu profilu. Ze strany dodavatele je dodána výkresová dokumentace k odsouhlasení. První krok trvá v průměru 2 týdny. V druhém kroku dochází k výrobě průtlačné matrice a zaslání prvních vzorků na další odsouhlasení. Dle složitosti výroby trvá tento proces kolem 4 týdnů. Poslední krok je již samotná výroba hliníkových profilů. Při zakázkové výrobě požadují dodavatelé určité minimální množství odebíraného materiálu, které se pohybuje od 500 kg do 5 tun. Výroba s dodáním pak trvá 4 až 6 týdnů, dle složitosti výroby, požadovaného množství a vytížení firmy. [54]

Nejnákladnější položkou při výrobě profilů je průtlačná matrice. Její cena závisí na tvarové složitosti požadovaného profilu, cenu zvyšují zejména dutiny v průřezu, na jejichž výrobu je třeba speciálních přípravků. Dalším aspektem ceny jsou služby spojené s výrobou a údržbou matrice. Samotná výroba se pohybuje od 400 do 1000 €. Při současném poskytování přidružených služeb, jako je pravidelné promazávání matrice, přeměňování přesnosti a při nalezení nedostatku výroba nové matrice bez zvýšení nákladů, se cena pohybuje až k 20 000 €. Dalším faktorem, který ovlivňuje cenu matrice je množství odebíraného materiálu, kdy se při vyšším odběru cena matrice snižuje. [54]

S ohledem na uvažování stáří materiálu je nutné zmínit vývoj ceny hliníku. Historicky docházelo k propadům ceny v souvislosti s finančními krizemi, po kterých vždy následoval růst ceny této komodity. Vývoj ceny v posledních šesti letech je zobrazen na obr. 66. Jedním

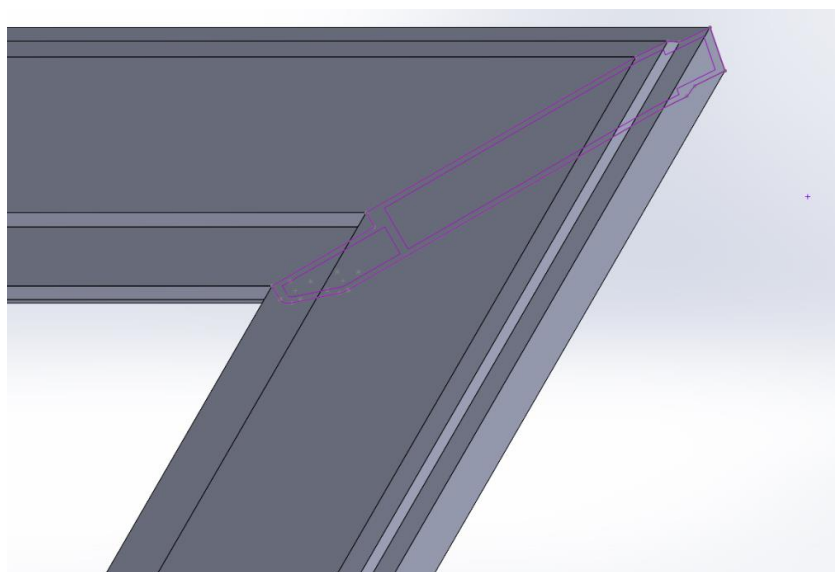
z posledních výrazných výkyvů byl počátek koronavirové krize v roce 2020, při které klesla cena 1 tuny hliníku z 1800 USD na 1400 USD. Naopak na začátku roku 2022 se cena vyšplhala až na 3800 USD vlivem krize v souvislosti s počátkem války na Ukrajině. V současné době je cena relativně ustálená a pohybuje se okolo 2300 USD za 1 tunu materiálu. Do budoucna se dá předpokládat další zvyšování ceny, především s ohledem na zvyšující se inflaci. Při předpokladu nákupu jedné tuny hliníku v lednu roku 2023 oproti lednu 2017 by došlo k nárůstu nákladů o více než 30 %.



Obr. 66 Časový vývoj ceny za 1 tunu hliníku [55].

4.2.1 Výpočet nákladů na svařování

Výpočet nákladů na svařování je ilustrován na příkladu svařování rámu z profilu ze sady 2015. Schéma svařovaného rámu s naznačenými svary je zobrazen na obr. 67 a obr. 68. Výkresová dokumentace profilu je v příloze 2. Jedná se o oboustranný svar daného profilu. Svařovací parametry jsou uvedeny v tab. 14. Celková svařovaná délka byla vypočítána na 1770,4 mm.



Obr. 67 Detail předpokládaného svaru.



Obr. 68 Svařovaný rám.

Výpočet doby svařování

Celková doba svařování t_C je dána součtem času samotného procesu svařování a manipulačního času, viz vzorec 4.3. Manipulační čas představuje potřebný čas pro ustavení svařované konstrukce, upnutí do přípravků a další pomocné operace. Je stanoven na $0,7 \cdot t_S$, kde t_S je samotný čas svařování vypočítaný dle:

$$t_S = \frac{L}{v_S} \text{ [s]} \quad (4.2)$$

$$t_S = \frac{1770,4}{1,03} = 1718,835 \text{ s} = 28,647 \text{ min}$$

kde: L – celková svařovaná délka [mm].

Potom:

$$t_C = t_S + 0,7 \cdot t_S \text{ [s]} \quad (4.3)$$

$$t_C = 1718,835 + 0,7 \cdot 1718,835 = 2904,85 \text{ s} = 48,4 \text{ min}$$

Výpočet nákladů na operátora

Čistá hodinová sazba operátora byla stanovena na $420 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$. Odvody zahrnují platbu sociálního a zdravotního pojištění, přičemž část nákladů je strhávána ze mzdy zaměstnance. Celkově se jedná o 45 % z vyměřovacího základu. Na zdravotní pojištění připadá 13,5 % (z toho 4,5 % je strženo zaměstnanci ze mzdy) a na sociální pojištění připadá 31,3 % (z toho

6,5 % je strženo zaměstnanci ze mzdy). Celkové hodinové náklady na zaměstnance tedy činí 760,9 Kč·hod⁻¹. [56] Náklady na operátora N_{OP} po dobu svařování jsou vypočítány dle vztahu:

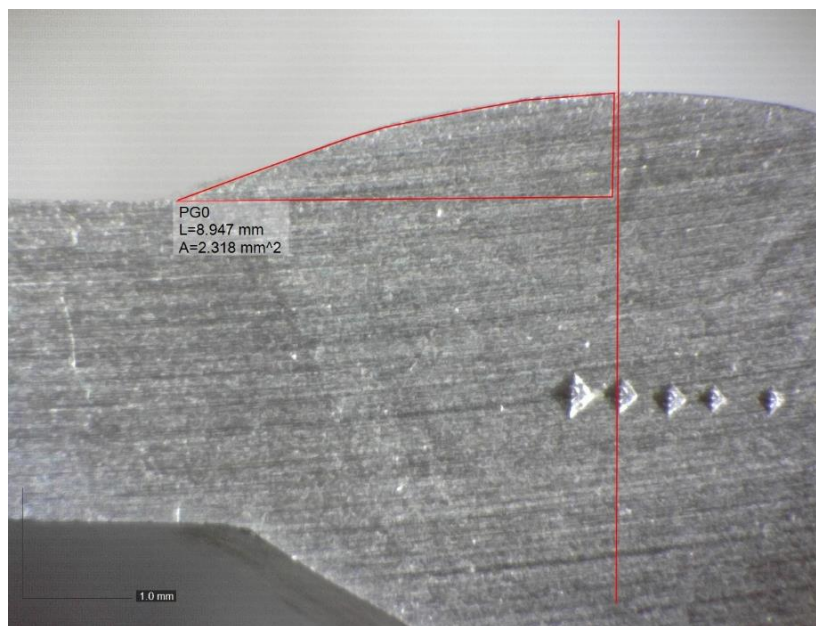
$$N_{OP} = H \cdot t_c \text{ [Kč]} \quad (4.4)$$

$$N_{OP} = 760,9 \cdot 0,81 = 616,34 \text{ Kč}$$

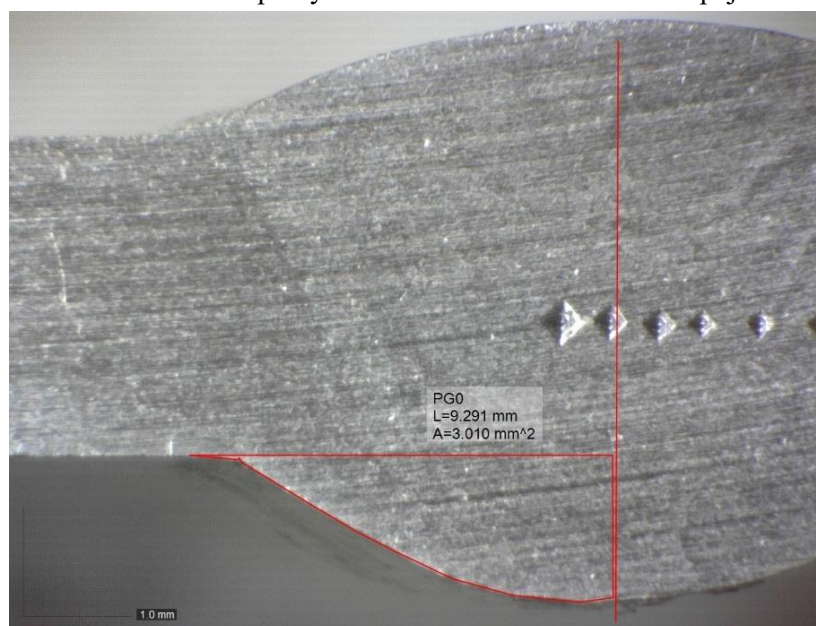
kde: H – hodinová sazba operátora [Kč·hod⁻¹].

Výpočet nákladů na přídavný materiál

Spotřeba přídavného materiálu byla vypočítána na základě makroskopických snímků z převýšení svarového kovu viz obr. 69 a obr. 70. Předpokládá se svar bez mezery, a tak spotřeba PM je rovna součtu převýšení na horní a spodní straně svarového spoje. Hmotnost m_{PM} spotřebovaného přídavného materiálu se vypočítá na základě vztahu 4.5.



Obr. 69 Obsah převýšení na horní straně svarového spoje.



Obr. 70 Obsah převýšení na spodní straně svarového spoje.

$$m_{PM} = \rho_{PM} \cdot V_{PM} = \rho_{PM} \cdot S_{PM} \cdot L \quad [\text{kg}] \quad (4.5)$$

$$m_{PM} = 2700 \cdot 10,656 \cdot 10^{-6} \cdot 1,7704 = 0,05094 \text{ kg}$$

Kde: ρ_{PM} – hustota přídavného materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 S_{PM} – obsah PM v průřezu svarového kovu [m^2].

Náklady na odtavený přídavný materiál N_{PM} se následně vypočítají dle vztahu:

$$N_{PM} = m_{PM} \cdot C_{PM} \quad [\text{Kč}] \quad (4.6)$$

$$N_{PM} = 0,05094 \cdot 390 = 19,867 \text{ Kč}$$

kde: C_{PM} – cena přídavného materiálu za 1 kg [$\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Výpočet nákladů na ochranný plyn

Při užití čistého argonu 5.0 se cena za láhev plynu o objemu 50 l pohybuje kolem 2900 Kč. V láhvi o objemu 50 l je 10 700 l plynu. Z toho vyplývá, že 1 litr plynu stojí 0,271 Kč. Náklady na spotřebovaný ochranný plyn N_P se vypočítají dle vztahu 4.7. Do spotřeby plynu je započítán i předfuk a dofuk.

$$N_P = Q_P \cdot (t_S + t_p + t_d) \cdot C_P \quad [\text{Kč}] \quad (4.7)$$

$$N_P = 6 \cdot (28,647 + 0,4 + 0,693) \cdot 0,271 = 48,357 \text{ Kč}$$

Kde: Q_P – průtok ochranného plynu [$\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$],
 t_p – předfuk [min],
 t_d – dofuk [min],
 C_P – cena ochranného plynu [$\text{Kč} \cdot \text{l}^{-1}$].

Výpočet celkových nákladů

$$N = N_{OP} + N_{PM} + N_P \quad [\text{Kč}] \quad (4.8)$$

$$N = 616,34 + 19,867 + 48,357 = 684,553 \text{ Kč}$$

Celkové náklady N se dle vztahu 4.8 vypočítají jako součet všech dílčích nákladů. Celková cena pro svaření rámu při daných svařovacích parametrech je 684,553 Kč.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá vlivem stáří hliníkové slitiny EN AW 6060 na její mechanické a technologické vlastnosti. Vypracování této práce proběhlo ve spolupráci s firmou Pars Komponenty s.r.o., kde je slitina využívána ve formě svařovaných profilových konstrukcí pro hromadné dopravní prostředky. Pro posouzení požadovaných vlastností byly poskytnuty vzorky ze skladových zásob slitiny EN AW 6060 různého stáří. Na těchto vzorcích byly provedeny materiálové zkoušky základního materiálu a svarových spojů zhotovených metodou TIG.

Teoretickým předpokladem byl pokles mechanických a technologických vlastností materiálu, který však na základě provedených zkoušek nebyl potvrzen. Zkouška tvrdosti základního materiálu vykazuje stálost hodnot. Vzorky z roku 2001 měly průměrnou hodnotu tvrdosti 61,8 HV, vzorky z roku 2015 72 HV a z roku 2022 76,5 HV. Doplnující měření potvrdilo tento trend, kdy pro vzorky 2001 byla průměrná hodnota 69,1 HV₂, pro vzorky 2015 71,4 HV₂ a pro vzorky 2022 72 HV₂. Při zkoušce tvrdosti svarového kovu a materiálu v tepelně ovlivněné oblasti se projevil předpokládaný pokles tvrdosti v TOO svarového spoje, který je charakteristický u vytvrditelných slitin, a je způsoben hrubnutím a rozpouštěním vytvrzujících precipitátů, což je vyvoláno ohřevem materiálu nad 200 °C. Tahová zkouška byla prováděna při pokojové teplotě a průměrné hodnoty meze pevnosti a tažnosti vykazují ustálené hodnoty bez výrazného poklesu či nárůstu. Vzorky 2001 vykazují $R_m=128$ MPa a $A=13$ %, vzorky 2015 $R_m=118$ MPa a $A=9,7$ % a vzorek 2022 $R_m=130$ MPa a $A=12$ %. Při ohybové zkoušce byl proveden ohyb v tepelně ovlivněné oblasti do úhlu ohybu 180°. Ohybové plochy byly zvrátněné bez zřetelných povrchových trhlin u všech vzorků. Makroskopická zkouška odhalila trhlinu za horka ve svarovém kovu u vzorku z roku 2022. Pro eliminaci takové vady je doporučena důkladnější příprava svarových ploch, zejména se jedná o sražení hran tak, aby nedocházelo k hromadění oxidů u kořene svaru a následným nespojitostem vedoucím k trhlinám. U vzorků 2001 a 2015 nebyly zjištěny žádné vady svarového spoje.

V rámci ekonomického zhodnocení dané problematiky byly uvedeny vstupní náklady na výrobu výkresových protlačovaných profilů. Samotná cena průtlačné matrice se odvíjí od její tvarové složitosti a pohybuje se v rozmezí 400–1000 €. Celková výrobní cena je následně závislá na ceně hliníku, která se za posledních šest let zvedla o přibližně 30 %. Na vývoj ceny hliníku mají vliv ekonomické krize a další aspekty, jako je například zvyšující se inflace.

S ohledem na zjištěné parametry lze konstatovat, že profily ze slitiny EN AW 6060 nevykazují výraznou změnu vlastností při dlouhodobém skladování a je bezpečné je dále zpracovávat bez předpokladu poruchovosti a náchylnosti ke vzniku vad. Z ekonomického hlediska je výhodné tyto slitiny využívat oproti jejich nahrazení novými profily z důvodu nákladnosti výroby protlačovaných profilů a tendence růstu ceny hliníku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Aluminium Extrusion. In: *LB Aluminium Berhad* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.lbalum.com/product/aluminium-extrusion>
 2. Tetrix XQ. In: *EWM We are welding* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://tetrixqxq.ewm-group.com/cs>
 3. O nás: Historie a současnost. In: *Pars Komponenty* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.parskomponenty.cz/o-nas/historie-a-soucasnost/>
 4. Produkty: Vlak: Dveře vstupní. In: *Pars Komponenty* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.parskomponenty.cz/produkty/vlaky/prostor-pro-cestujici/dvere-vstupni/>
 5. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Dotisk 1. vydání. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 978-80-7080-600-5.
 6. MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. 1. vydání. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 978-80-260-7132-7.
 7. ZMYDLENÝ, Tomáš a Jaroslav KUBÍČEK. *Hliník a slitiny hliníku: úvod do svařování*. Brno. Výukový materiál-prezentace. VUT Brno.
 8. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
 9. MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4.
 10. *Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, Český svářečský ústav s.r.o., 2016. ISBN 115406.
 11. ČSN EN 573-1. *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků: Část 1: Číselné označování*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
 12. *AluCad Bohemia: Všeobecný popis různých skupin* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/vseobecny-popis-ruznych-skupin>
 13. ČSN 42 0056. *Tepelné zpracování neželezných kovů a jejich slitin: Rozdělení, názvosloví a definice*. Praha: Centrum služeb pro normalizaci, 1992.
 14. Precipitace. In: *Katedra materiálů a strojírenské metalurgie* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2009 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download_sma.html
 15. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
 16. TOTTEN, George a D. MACKENZIE. *Handbook of aluminum*. Basel: M. Dekker, 2003. ISBN 08-247-0494-0.
 17. ČSN EN 515. *Hliník a slitiny hliníku Výrobky tvářené - Označování stavů: Výrobky tvářené - Označování stavů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
 18. *Ehlinik.cz: Hliníkové profily* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/hlinikove-profilu>
 19. Hliníkové profily. In: *Alucom.cz* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://alucom.cz/>
 20. OKAMOTO, H. *Supplemental Literature Review of Binary Phase Diagrams: Ag-Ni, Al-Cu, Al-Sc, C-Cr, Cr-Ir, Cu-Sc, Eu-Pb, H-V, Hf-Sn, Lu-Pb, Sb-Yb, and Sn-Y*. 2013. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11669-013-0256-8>
 21. JÍLEK, Ladislav. *Slitina hliník - lithium. Kovárenství*. Ostrava: Svaz kováren ČR, 2017, (59). ISSN 1213-9289.
-

22. *Svět svaru: Časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů*. Ostrava, 2007, .
23. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
24. HLA VATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné také z: <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/indexs.htm>
25. ČSN EN ISO 6848. *Obloukové svařování a řezání: Netavící se wolframové elektrody - Klasifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
26. *Svářečky-elektrody.cz: Druhy a použití wolframových elektrod* [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/radce-svarece/druhy-a-pouziti-wolframovych-elektrod/>
27. KUBÍČEK, Jaroslav. Svařování metodou TIG. In: *Příručka pro IWE*. s. 70-86.
28. TIG svařování II - AC nebo DC?. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2009 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008122801>
29. *Linde Gas Division: Ochranné plyny pro svařování hliníku - nástroj optimalizace*. Brno, 2003.
30. ČSN EN 1011-4. *Svařování - doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
31. *ESAB University: Předehřev a tepelné zpracování po svaření* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/esab-university/articles/preheating-and-post-weld-heat-treatments/
32. MRŇA, Libor. *Metoda FSW* [online]. In: . [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_metoda_fsw_mrna.pdf
33. *MedCrave: Step into the world of research* [online]. 2018 [cit. 2023-03-15]. ISSN 2574-9927. Dostupné z: <https://medcraveonline.com/MSEIJ/a-review-on-friction-stir-welding-parameters-microstructure-mechanical-properties-post-weld-heat-treatment-and-defects.html>
34. Vady při svařování a tepelném dělení. In: *Konstrukce: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/vady-pri-svarovani-a-teplnem-deleni-265>
35. MAJER, Lubomír. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-857-7170-5.
36. KOLAŘÍK, Ladislav a Karel KOVANDA. Svařitelnost hliníkových slitin. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin>
37. KOU, Sindo. Solidification and Liquation Cracking Issues in Welding. *Welding Journal*.
38. BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
39. KOLÁŘ, Vladislav. Svařitelnost hliníkových slitin. In: *Česká svářečská společnost ANB* [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>
40. STATHERS, P.A., A.K. HELLIER, R.P. HARRISON, M.I. RIPLEY a John NORRISH. *Hardness-tensile property relationships for HAZ in 6061-T651 aluminum*. 2014. Dostupné také z: <http://ro.uow.edu.au/eispapers/2846>. University of Wollongong.
41. *AluCad Bohemia: Technické údaje: Svařování* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/svarovani>

-
42. EN AW-6060 (AlMgSi). In: *Proal: Hliníkové profily* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-6060/>
 43. Hliníkové slitiny. In: *Primapol* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.primapol.cz/produkty/hlinik/>
 44. Union AlMg 4.5 Mn Zr. In: *Alruqee* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/18042016000000T_Union%20AlMg%204%205%20Mn%20Zr_tig%20rod.pdf
 45. PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů. 2. aktualizované vydání*. Brno: TESYDO, s.r.o., 2015. ISBN 80-903-3864-X.
 46. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
 47. ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály-Zkouška tvrdosti podle Brinella: Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
 48. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse: Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
 49. ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella: Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
 50. ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jakub HORNÍK, Zdeňka JENÍKOVÁ a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II*. Praha: České Vysoké Učení Technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2. Dostupné také z: <https://kramerius-vs.techlib.cz/view/uuid:3afc80-7e30-11e5-a837-0800200c9a66?page=uuid:c2c37ade-82f4-11e5-a9b3-001b63bd97ba>
 51. ČSN EN ISO 7438. *Kovové materiály - Zkouška ohybem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
 52. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušení svarů kovových materiálů: Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
 53. ČSN EN 1011-1. *Svařování - doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
 54. Obchodní zástupce, AluCAD Bohemia [ústní sdělení]. Brno, 28.4. 2023.
 55. Hliník - ceny a grafy hliníku, vývoj ceny hliníku 1 tuna - 7 let - měna USD. In: *Kurzy.cz* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/hlinik-graf-vyvoje-ceny/1tuna-usd-30-let>
 56. Sociální pojištění v roce 2023. *Ministerstvo práce a sociálních věcí* [online]. 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.mpsv.cz/socialni-pojisteni>
 57. *Interní firemní dokumenty Pars Komponenty s.r.o.*
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
b	funkční šířka	[mm]
C _P	cena za litr ochranného plynu	[Kč]
C _{PM}	cena za kilogram přídavného materiálu	[Kč]
D	průměr kuličky	[mm]
d ₁	střední průměr vtisku	[mm]
d ₂	aritmetický průměr délky dvou uhlopříček	[mm]
F	zkušební zatížení	[N]
H	hodinová sazba operátora	[Kč·hod ⁻¹]
I	svařovací proud	[A]
L	celková svařovaná délka	[mm]
L _C	funkční délka zkušební tyče	[mm]
L _t	celková délka zkušební tyče	[mm]
m _{PM}	hmotnost přídavného materiálu	[kg]
N	počet měření	[-]
N _C	celkové náklady	[Kč]
N _{OP}	náklady na operátora	[Kč]
N _P	náklady na ochranný plyn	[Kč]
N _{PM}	náklady na přídavný materiál	[Kč]
Q	tepelný příkon	[kJ·mm ⁻¹]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
r	poloměr podpěr	[mm]
S _{PM}	plocha přídavného materiálu v řezu svarovým kovem	[m ²]
s	směrodatná odchylka	[-]
t _C	celkový čas	[min]
t _d	čas dofuku	[min]
t _p	čas předfuku	[min]
t _s	čas svařování	[min]
U	svařovací napětí	[V]
v _S	svařovací rychlost	[mm·min ⁻¹]
\bar{x}	aritmetický průměr	[-]
ε	poměrné přetvoření	[-]
η	účinnost	[-]
ρ_{PM}	hustota přídavného materiálu	[kg·m ⁻³]
σ	napětí	[MPa]

Zkratky

Označení	Legenda
AC	střídavý elektrický proud
DC	stejnoseměrný elektrický proud
FCC	kubická plošně centrovaná mřížka
FSW	Friction Stir Welding
HBW	tvrdost dle Brinella
HR	tvrdost dle Rockwella
HV	tvrdost dle Vickerse
MIG	Metal Inert Gas
PM	přídavný materiál
TIG	Tungsten Inert Gas
TOO	tepelně ovlivněná oblast
TZ	tepelné zpracování
WPS	Welding Procedure Specification

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Inspekční certifikát, vzorky rok 2015
 - Příloha 2 Výkresová dokumentace typu profilu rok 2015
 - Příloha 3 Inspekční certifikát, vzorky rok 2022
 - Příloha 4 Materiálový list přídatného materiálu UNION AlMg4,5MnZr
 - Příloha 5 Hydraulický zkušební stroj ZD40 (400 kN)
 - Příloha 6 Výsledky tahové zkoušky, vzorky 2001.2 až 2022.4
 - Příloha 7 Makroskopický snímek sražení hran
 - Příloha 8 Detailní snímky lomů po tahové zkoušce
 - Příloha 9 WPS-VP 1/2023
-



Inšpekčný certifikát 3.1 - EN 10204

Dodací list číslo: **189753**

Odoslané dňa: 27.09.2016

Vytlačené: 27. 9. 2016

Č. objednávky	1491601181	
Položka	000010	
Názov produktu	OTVORENÝ PROFIL 107750	
Kód produktu	107750/0/66/D4650	
Zákaznícke označenie		Pars Komponenty s.r.o.
Obj.zákazníka	21/2016/198	Malá Strana 451
Zak.Kód produktu		742 13 Studénka
Šarža	16194382	
Dĺžka	4 650,0 [mm]	
Hmotnosť	323 [kg]	
Počet kusov	310 [ks]	
Zlätina	EN AW-6060	

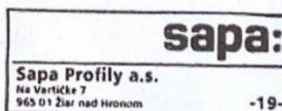
Chemické zloženie - obsah v % - EN 573 - 1,3

Materiál	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
EN AW-6060	0,30-0,60	0,10-0,30	max. 0,10	max. 0,10	0,35-0,60	max. 0,05	max. 0,15	max. 0,10
Číslo tavby	EN AW-6060 / EN AW-Al MgSi		Zistené hodnoty					
16194382	0,44	0,20	0,00	0,05	0,37	0,00	0,00	0,01

Mechanické vlastnosti - EN 755-2

Stav	T66	Pevnosť v ťahu Medza kizu Ťažnosť Tvrdosť			
		Rm - min	Rp0,2 - min	A - min	HB
		[MPa]	[MPa]	[%]	
		215	160	8	75
		231,93	201,89	12,40	N/A

v Žiari nad Hronom 27.09.2016



[Signature]
 Ing. Teodor Kvapil
 Manažér pre kvalitu

Sapa Profily a.s.

Strana č. 1

Na Vartičke 7, 965 01 Žiar nad Hronom, Slovenská republika

Tel +421-45-601 5001, Fax +421-45-601 5003, E-mail: info.profiles.sk@sapagroup.com, Web site: www.sapagroup.com



COSMOS ALUMINIUM A.E. — 8th km National Road Larissa - Athens
 41110 Larissa, P.O. Box 1379 — Greece — T: +30 2410 567567
 www.cosmosaluminium.com
EXPERTS IN ALUMINIUM™



Inspection certificate 3.1

Cert No:	868754	According to:	EN 10204:2004	Date of issue:	23/09/2022
----------	--------	---------------	---------------	----------------	------------

Customer:	ALUPA s. r. o.	Order No:	1000008939/340	OrderDate:	15/09/2022
Alloy/Temper:	EN AW-6060 / T66	Cust. Order No:	OV-1942/22		
Profile Code:	020017	Description:	FLAT BAR 40x3		

The extruded products are in compliance with the requirements of the order. The stated values are representative for the profiles extruded and comply with the following European Standards:

i. Chemical composition and form of products according to:	EN 573-3:2019
ii. Technical conditions for inspection and delivery according to:	EN 755-1:2016
iii. Mechanical properties according to:	EN 755-2:2016
iv. Tolerances on dimensions and form according to:	EN 755-5:2008
v. Temper designation according to:	EN 515:2017

1. Chemical Composition

EN AW-6060	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other		Al
									Each	Total	
Should be within:	0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,60	0,05	0,15	0,10	0,05	0,15	Rest
Charge No: 56432	0,41	0,17	0,0008	0,03	0,49	0,0011	0,0129	0,0123	0,05	0,15	Rest

The chemical composition test results are obtained by the aluminium billet supplier. Traceability procedures are being operated and the corresponding inspection documents can be provided.

2. Mechanical Properties

Inspection Date	Charge No	Bundle Nr	Profile	Alloy	Temper	Webster Hardness	Tensile Strength Rm (N/mm ²)	Yield Strength Rp 0,2 (N/mm ²)	Elongation A%
04/09/2022	56432	868754	020017	6060	T66	13	221	185	13,12

The material hardness is tested after the heat treatment procedures. Traceability procedures are being operated and the corresponding inspection documents can be provided.

Mechanical properties as 755-2 indicated, are derived from tensile tests as per EN 6892-1:2019 and the number of specimens comply with the regulations described in EN 755-1.

COSMOS Aluminium

Yannis Mamekas
 Production Manager



Union AlMg 4.5 Mn Zr

TIG-rod, Aluminium

Classifications									
EN ISO 18273-A	AWS A5.10								
S Al 5087 (AlMg4.5MnZr)	ER5087								
Characteristics and typical fields of application									
Zirconium micro alloyed welding rods and bare wire electrodes. The weld metal is not susceptible to hot cracking. Particularly advantageous for complicated weldments involving damp conditions. Thorough cleaning of the workpiece bevels is necessary. Thicker plate materials require preheating to 150 °C (302 °F)									
Base materials									
AlMg 4.5 Mn	3.3547	EN AW-5083 [AlMg 4.5 Mn 0.7]							
AlMg 4 Mn	3.3545	EN AW-5086 [AlMg 4]							
AlMg 5	3.3555	EN AW-5019 [AlMg 5]							
AlMgSi 0.5	3.3206	EN AW-6060 [AlMgSi]							
AlMgSi 0.7	3.3210	EN AW-6005A [AlSiMg(A)]							
AlMgSi 1	3.2315	EN AW-6082 [AlSi 1 MgMn]							
AlMg 1 SiCu	3.3211	EN AW-6061 [AlMg 1 SiCu]							
AlZn 4.5 Mg 1	3.4335	EN AW-7020 [AlZn 4.5 Mg 1]							
G-AlMg 5	3.3561	EN AC-51300							
G-AlMg 5 Si	3.3261	EN AC-51400							
Typical analysis of welding rod (wt.-%)									
	Al	Mn	Cr	Mg	Zr	Ti	Fe	Si	Zn
wt.-%	bal.	0.7 – 1.1	0.05 – 0.25	4.5 – 5.2	0.1 – 0.2	< 0.15	< 0.4	< 0.25	< 0.25
Mechanical properties of all-weld metal									
Yield strength R _{p0.2}		Tensile strength R _m				Elongation A (L ₀ =5d ₀)			
MPa		MPa				%			
125		275				17			
Operating data									
		Polarity: DC (+)		Shielding gas: (EN ISO 14175) I1 Base material should be cleaned near the seam. Pre-heating 150 °C for plates > 15 mm				ø (mm) 1.6 2.0 2.4 3.2	
Approvals									
DB (61.132.04), WWEB									

Hydraulický zkušební stroj ZD40 (400 kN)

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

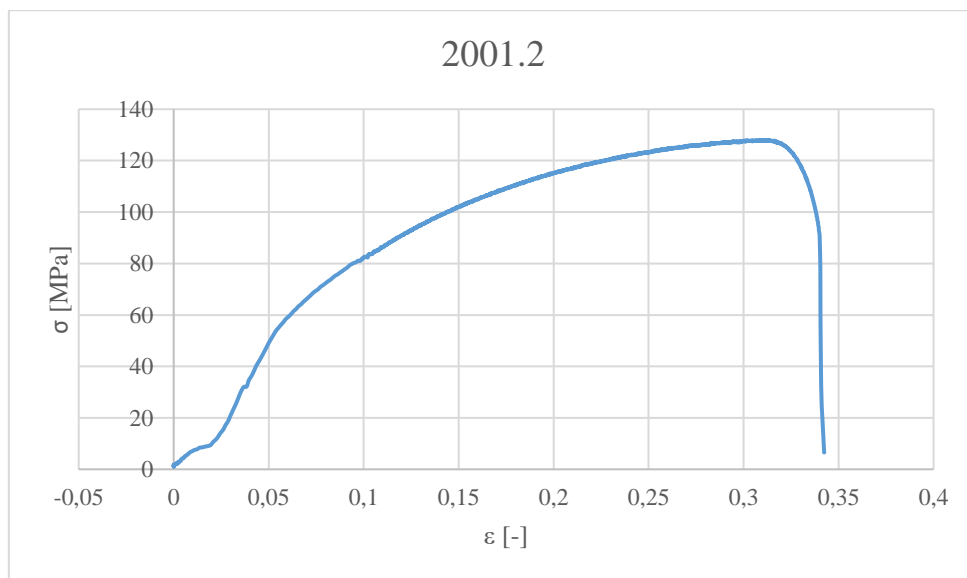
Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

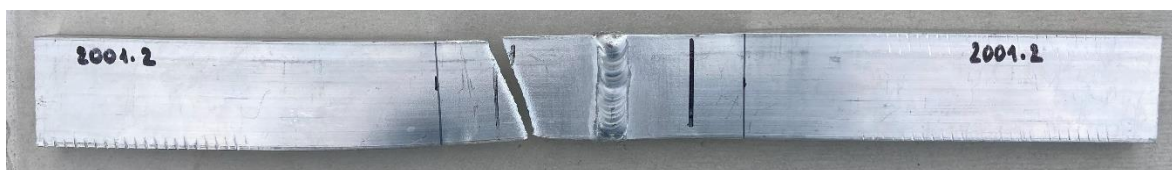
Počítač je vybaven programem TIRAtest v.2.1 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10 002 a EN ISO 6892 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



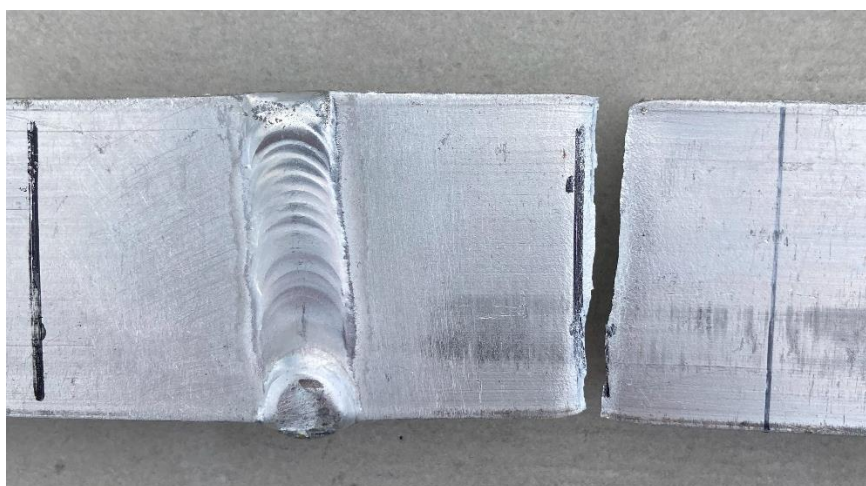
Řídicí jednotka EDC 60



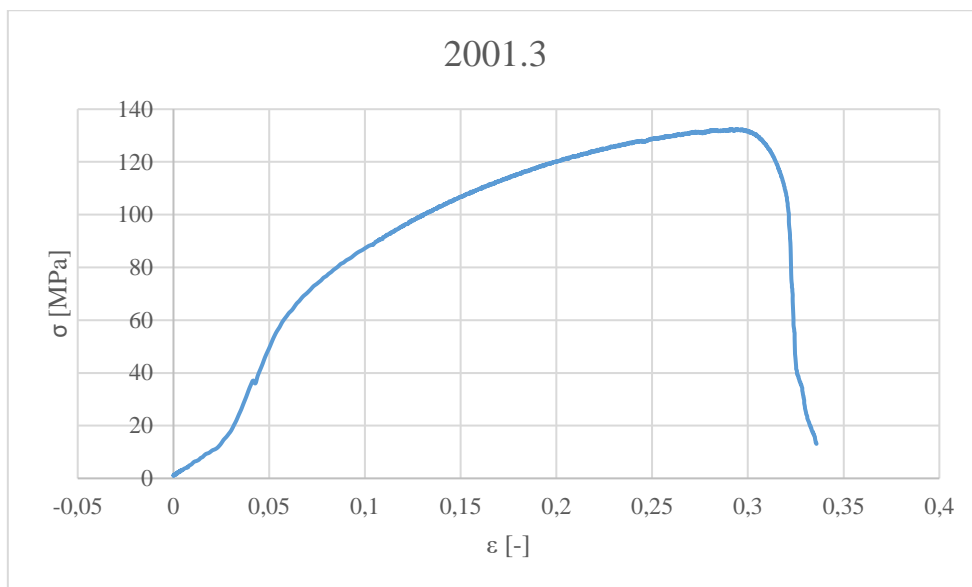
Graf tahové zkoušky vzorku 2001.2.



Vzorek 2001.2 po přetržení.



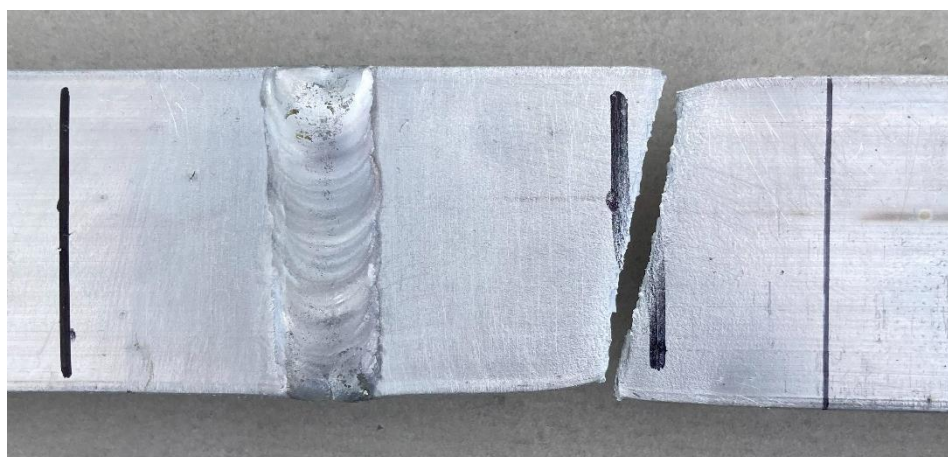
Detail lomu.



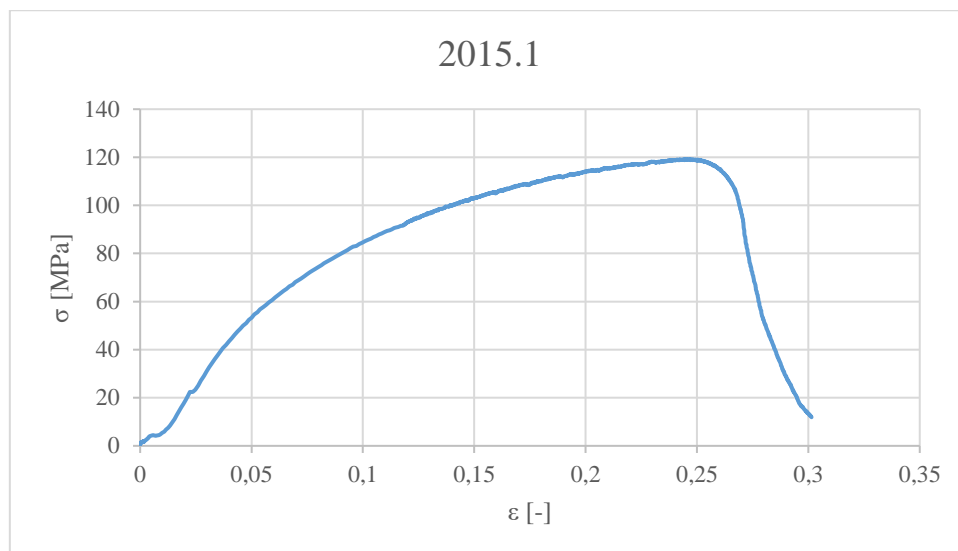
Graf tahové zkoušky vzorku 2001.3.



Vzorek 2001.3 po přetržení.



Detail lomu.



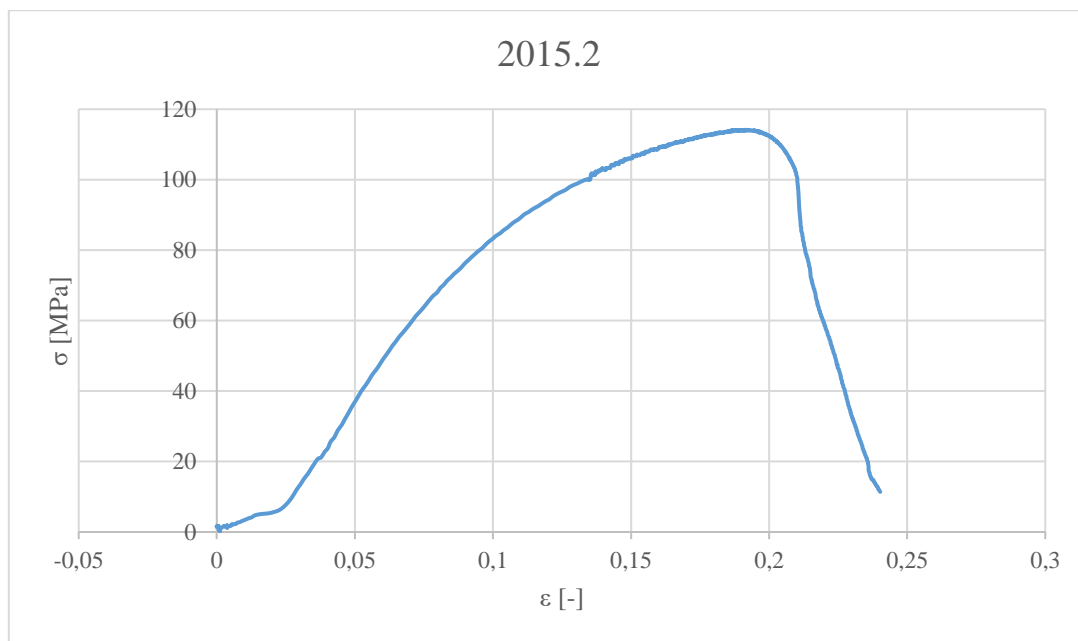
Graf tahové zkoušky vzorku 2015.1.



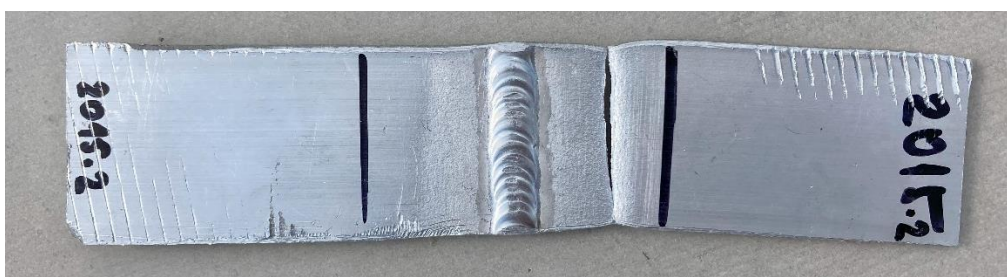
Vzorek 2015.1 po přetržení.



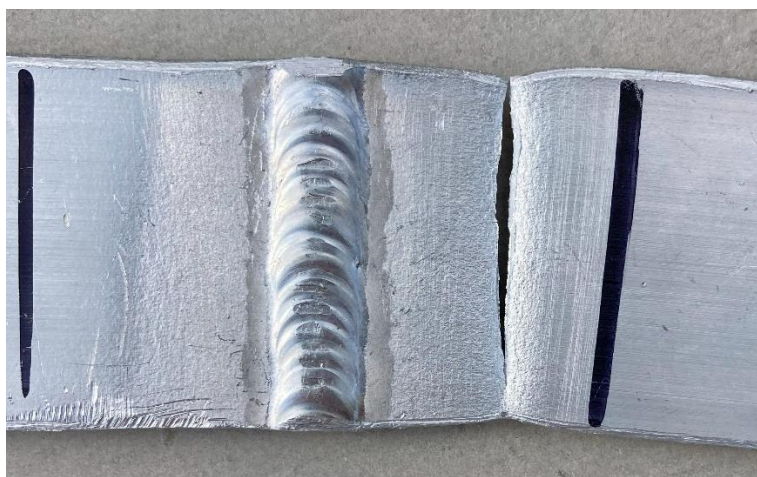
Detail lomu.



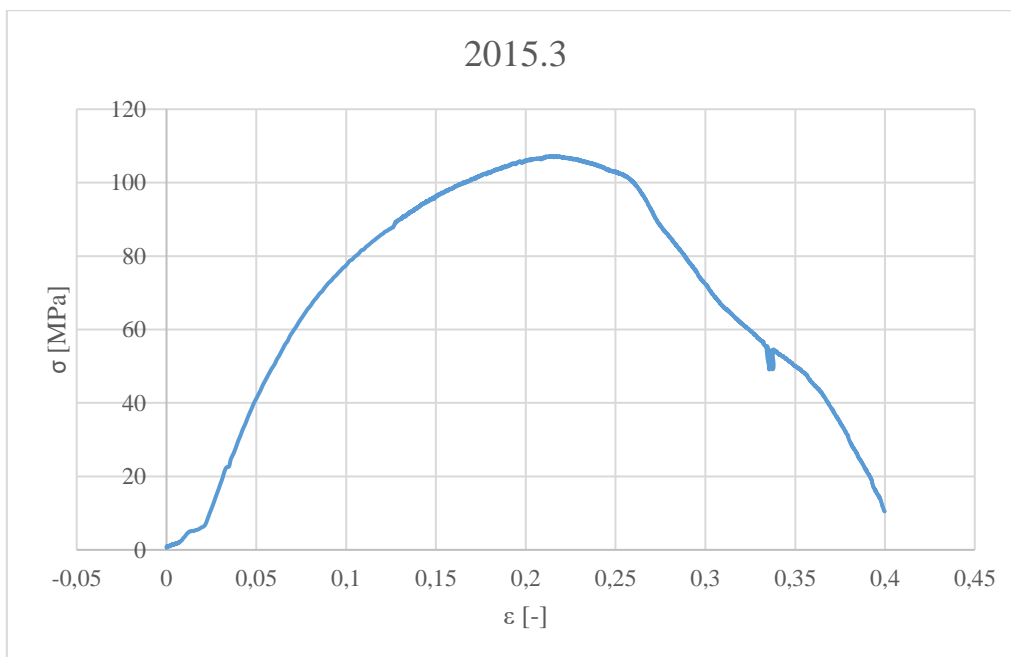
Graf tahové zkoušky vzorku 2015.2.



Vzorek 2015.2 po přetržení.



Detail lomu.



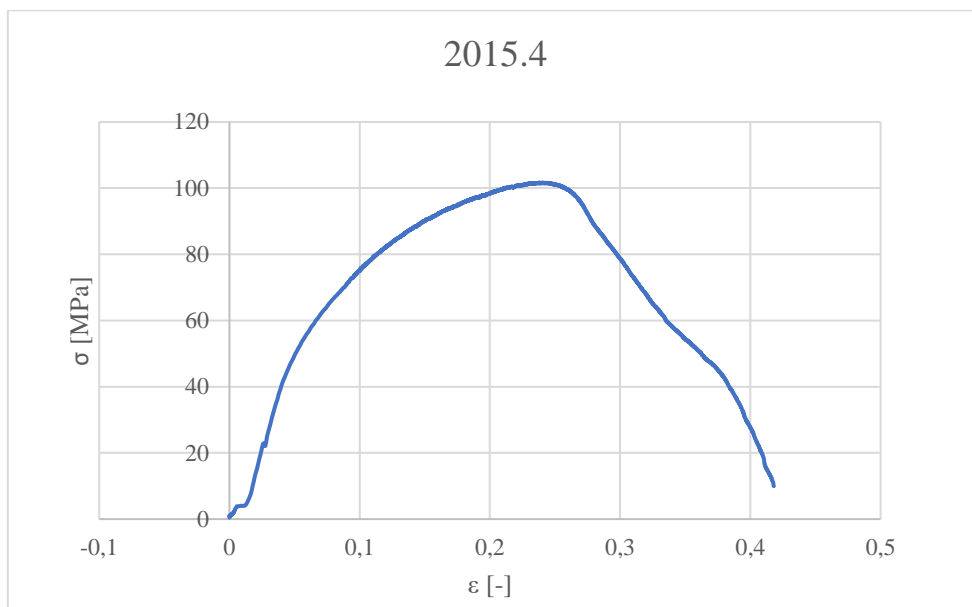
Graf tahové zkoušky vzorku 2015.3.



Vzorek 2015.3 po přetržení.



Detail lomu.



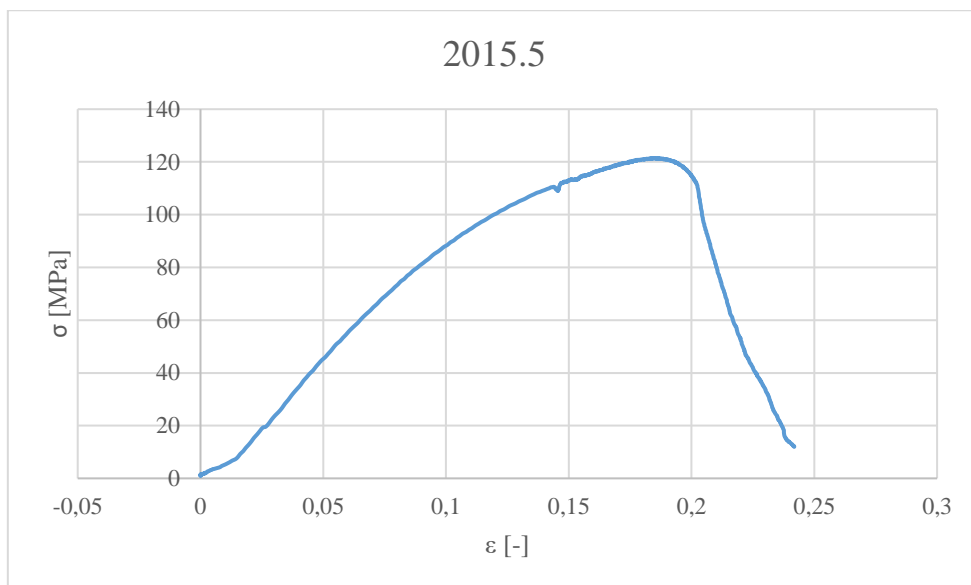
Graf tahové zkoušky vzorku 2015.4.



Vzorek 2015.4 po přetržení.



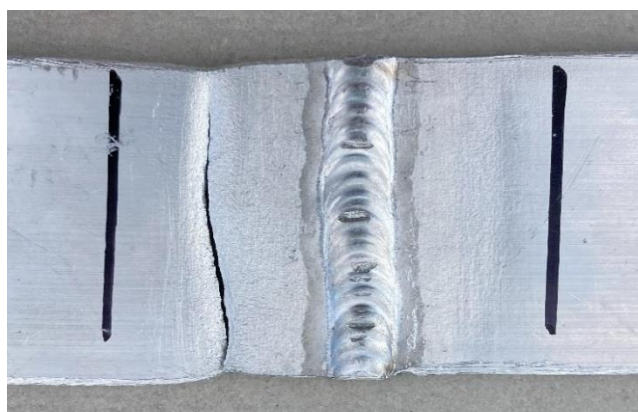
Detail lomu.



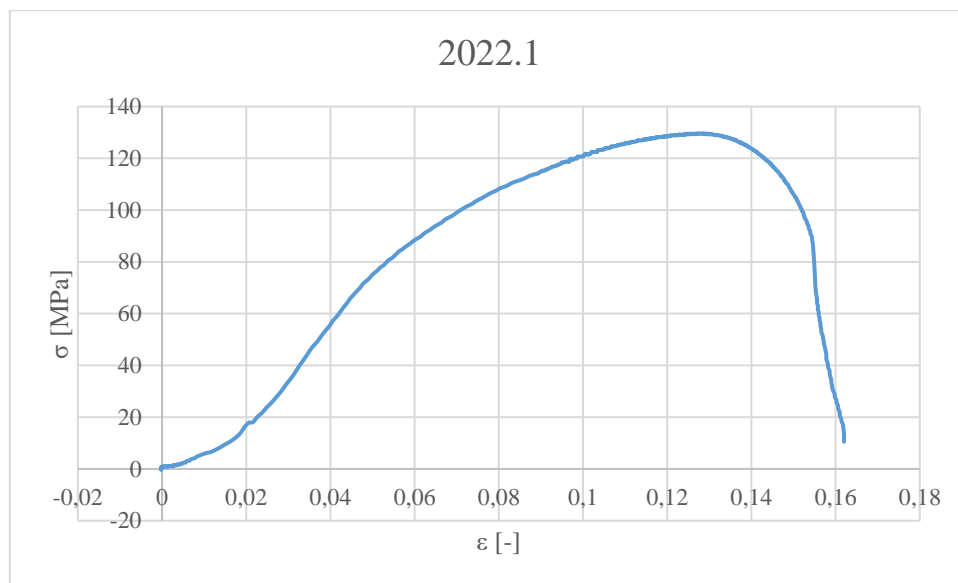
Graf tahové zkoušky vzorku 2015.5.



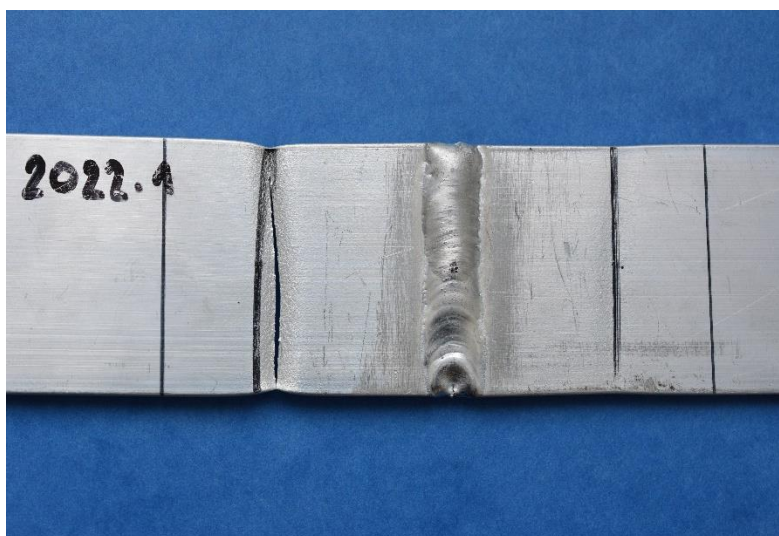
Vzorek 2015.5 po přetržení.



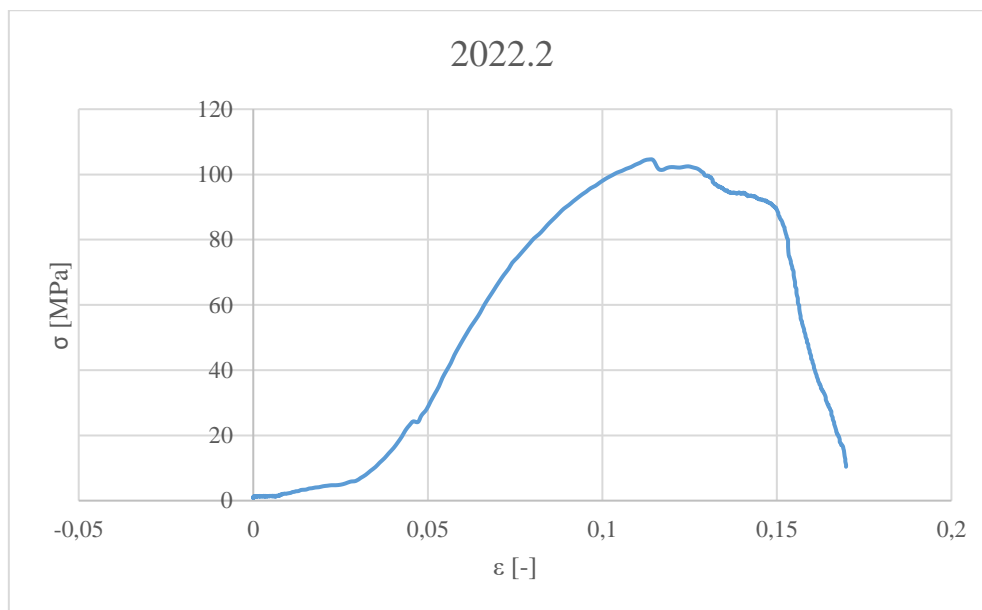
Detail lomu.



Graf tahové zkoušky vzorku 2022.2.



Detail lomu.



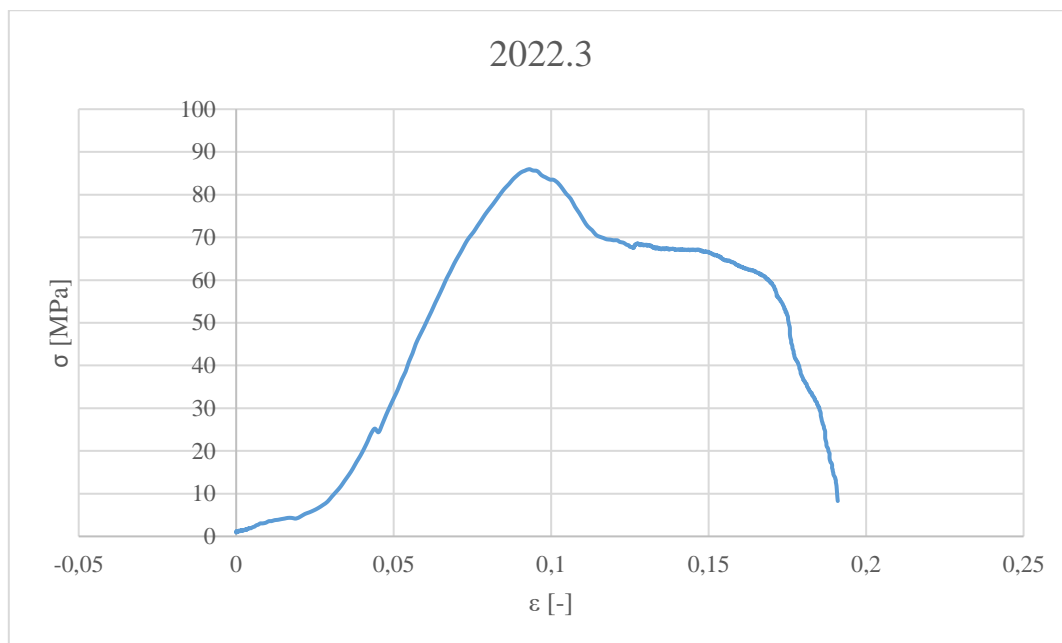
Graf tahové zkoušky vzorku 2022.2.



Vzorek 2022.2 po přetržení.



Detail lomu.



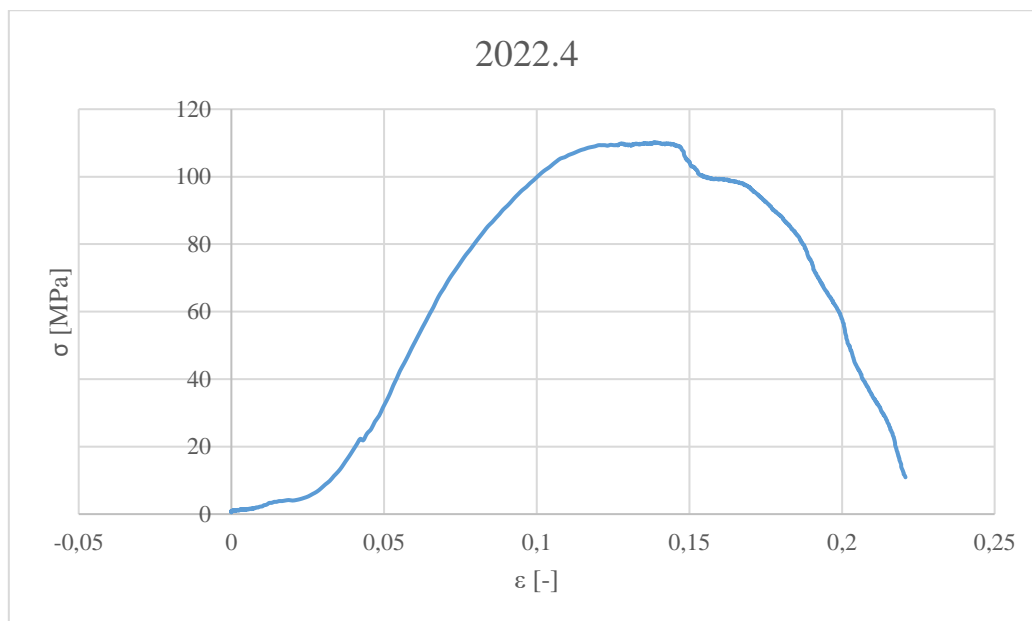
Graf tahové zkoušky vzorku 2022.3.



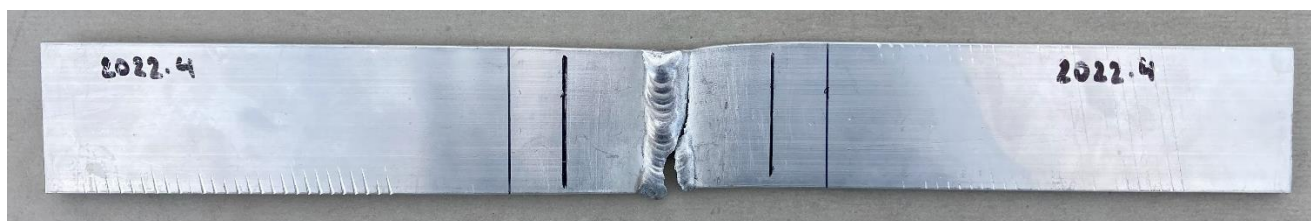
Vzorek 2022.3 po přetržení.



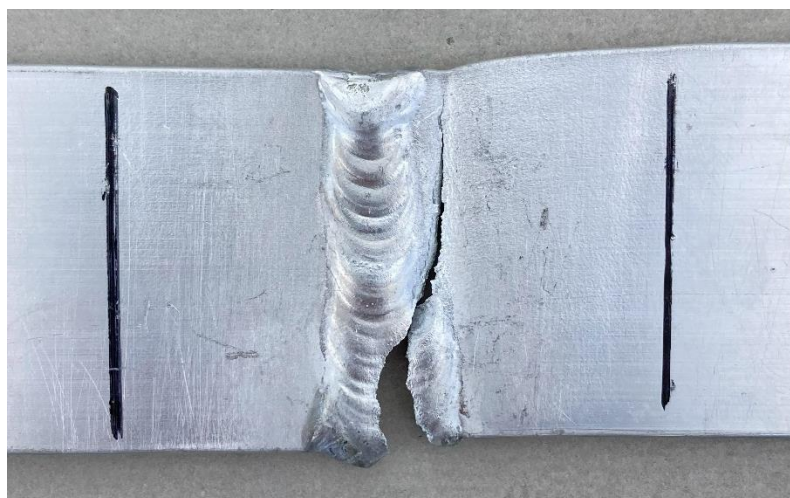
Detail lomu.



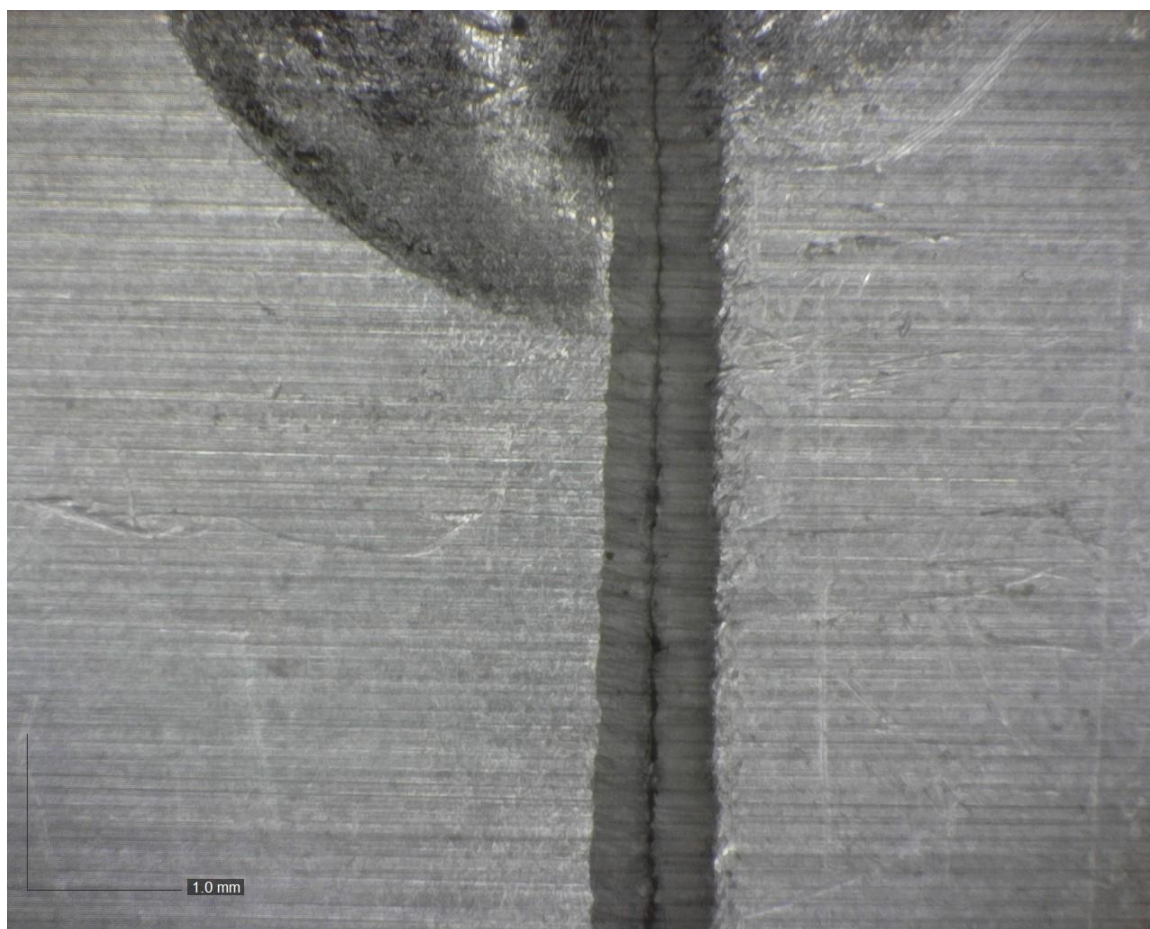
Graf tahové zkoušky vzorku 2022.4.

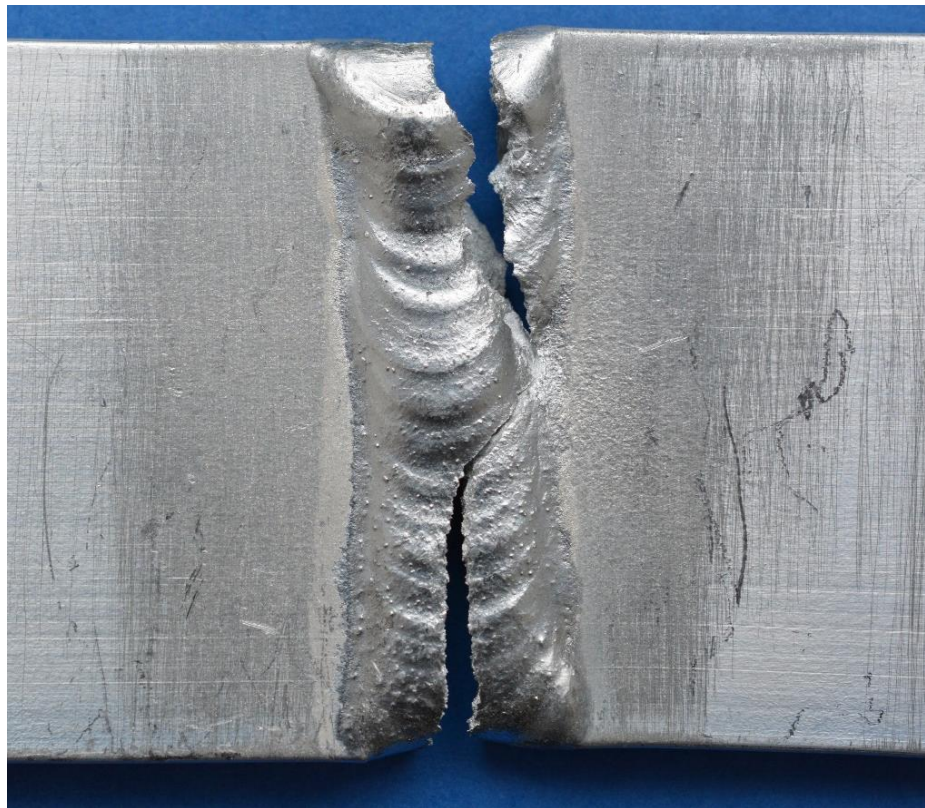
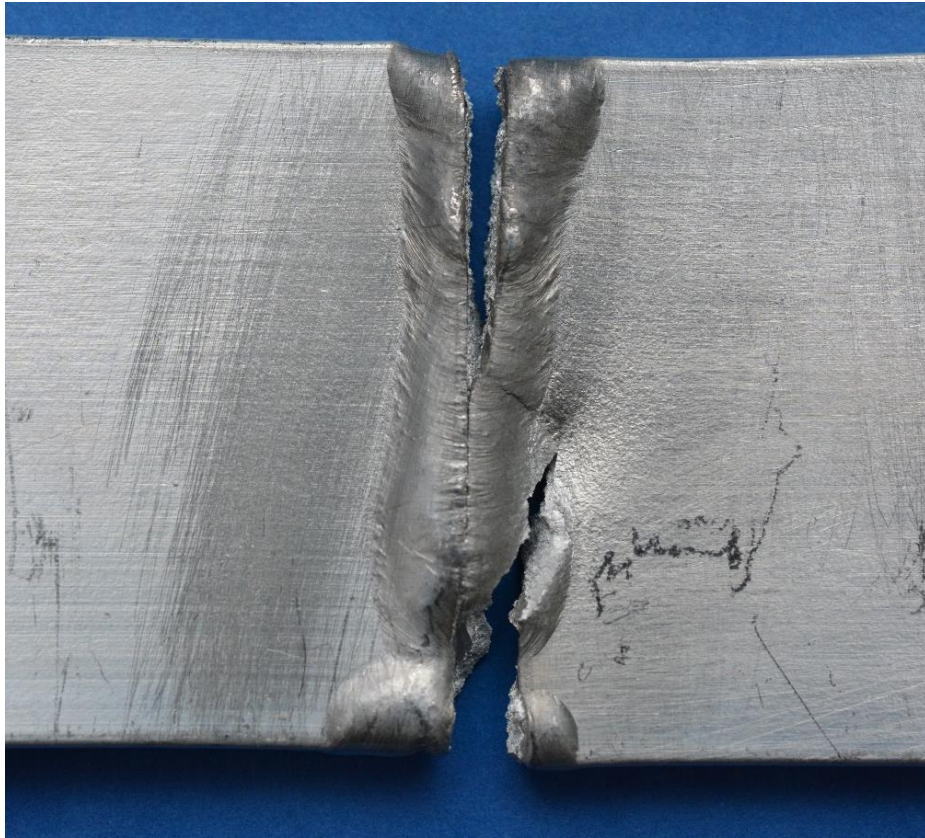


Vzorek 2022.4 po přetržení.



Detail lomu.





VUT FSI Brno		WPS Welding Procedure Specification specifikace svařovacího postupu		WPS No./č. WPS-VP/1/2023 Date/Datum 12.5.2023		Rev. 0 Pg./Str.: 1/1																																																																																													
Welding Process/Metoda: 1. 141 2. <i>Type of Weld/Typ svaru:</i> BW - tupý spoj <i>Backing/Podložka:</i> N.A. <i>Other/Ostatní:</i> Welder Svářeč				Supporting/Související WPQR																																																																																															
Base metal / Základní materiál: <i>Material 1:</i> EN AW 6060 (EN AW AlMgSi) <i>Group:</i> 23.1 <i>Outside Dia./Vnější</i> <i>Thickness/Tloušťka:</i> 3 mm <i>to/k Material 2:</i> EN AW 6060 (EN AW AlMgSi) <i>Group/Sk.:</i> 23.1 <i>Outside Dia./Vnější</i> <i>Thickness/Tloušťka:</i> 3 mm <i>Remark/Poznámka:</i>																																																																																																			
Filler Material / Svařovací materiál: <i>Classification:</i> 1. ČSN EN ISO 18273 <i>Klasifikace:</i> ČSN EN ISO 18273 <i>Designation:</i> 1. UNION AlMg4.5MnZr <i>Označení:</i> UNION AlMg4.5MnZr <i>Size/Průměr:</i> 1. 2,4 mm 2. <i>Name-Type of Flux/Jméno-typ tavidla:</i> <i>Drying of F.M./Sušení svař. mat.:</i> 1. °C 2. <i>Replace/Náhrada:</i> 1. 2.				Gas / Plyn: 6 <i>l/min</i> % <i>l/min</i> <i>Shielding/O. svaru:</i> 1. Ar I-1 2. <i>Backing/O. kořene:</i> 1. N.A. 2. <i>Trailing/Dodatečná:</i> 1. N.A. 2. <i>Remark/Poznámka:</i> EN ISO 14175																																																																																															
Joint Design / Tvar spoje:				Welding Sequences / Postup svařování:																																																																																															
Preheat / Předehřev: <i>Preheat Temp./Teplota předehřevu:</i> N.A. °C <i>Interpass:</i> °C <i>Post Heating/Dohřev:</i> N.A. °C h <i>Cooling After W./Ochlazení po s:</i> still air <i>Temp. Control/Kontrola teploty:</i> <i>Remark/Poznámka:</i> klidný vzduch																																																																																																			
Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování: <i>Type/Typ:</i> N.A. <i>Temperature/Teplota:</i> °C <i>Time/Čas:</i> min. <i>Heating Rate/Rychlost ohřevu:</i> °C/h <i>Cooling Rate/Rychlost ochlazení:</i> °C/h <i>Remark/Poznámka:</i>																																																																																																			
Technique / Technika svařování: <i>Tungsten El./Wolframová elektroda:</i> φ 2,4 mm <i>Type -</i> WC20 <i>Type of Bead/Tvar housenk:</i> 1. string - rovná 2. <i>Edge Preparation/Příprava úkosu:</i> mechanical / mechanicky <i>Weaving / Rozkvy:</i> 1. N.A. 2. <i>Method of Cleaning/Metoda čištění:</i> mechanical / mechanicky <i>Pulsing/Pulzace:</i> 1. N.A. 2. <i>Method of Back Gouging/Drážkování kořene:</i> mechanical / mechanicky <i>Oscillation/Oscilace:</i> 1. N.A. 2. <i>Remark/Poznámka:</i>																																																																																																			
Welding Parameters / Svařovací parametry: <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Layer(s) Vrstva</th> <th rowspan="2">Process Metoda</th> <th colspan="2">Filler Material/Svařovací materiál</th> <th rowspan="2">Type/Polarity Typ /Polarita</th> <th rowspan="2">Amperage/Proud (A)</th> <th rowspan="2">Voltage/Napětí (V)</th> <th rowspan="2">Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)</th> <th rowspan="2">Heat input (kJ/mm) Tepelný příkon(kJ/mm)</th> </tr> <tr> <th>φ (mm)</th> <th>Classification/Klasifikace</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>141</td> <td>2,4</td> <td>UNION AlMg4.5MnZr</td> <td>AC</td> <td>120</td> <td>14,7</td> <td>6,2</td> <td>1,1132</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>								Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál		Type/Polarity Typ /Polarita	Amperage/Proud (A)	Voltage/Napětí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)	Heat input (kJ/mm) Tepelný příkon(kJ/mm)	φ (mm)	Classification/Klasifikace	1	141	2,4	UNION AlMg4.5MnZr	AC	120	14,7	6,2	1,1132																																																																								
Layer(s) Vrstva	Process Metoda	Filler Material/Svařovací materiál		Type/Polarity Typ /Polarita	Amperage/Proud (A)	Voltage/Napětí (V)	Travel Speed (cm/min) Rychlost posuvu (cm/min)			Heat input (kJ/mm) Tepelný příkon(kJ/mm)																																																																																									
		φ (mm)	Classification/Klasifikace																																																																																																
1	141	2,4	UNION AlMg4.5MnZr	AC	120	14,7	6,2	1,1132																																																																																											
Remarks / Poznámky: Tack welding shall be performed accordance with WPS. Not Peening during and after welding.																																																																																																			
<i>Prepared (Name, Date, Signature):</i> 12.5.2023 <i>Připravil (jméno, datum, podpis):</i> Bc. Anna Hanáková				<i>Approved (Name, Date, Signature):</i> <i>Schválil (jméno, datum, podpis):</i>																																																																																															