



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STROJNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Porovnání změny mechanických vlastností svarových spojů Al slitin

Comparison of changes in the mechanical properties of
weld joints of Al alloys

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Ondřej Dudáš
Author

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Supervisor

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství
Study program

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dudáš Jméno: Ondřej Osobní číslo: 475081
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávací katedra/ústav: Ústav strojírenské technologie
Studijní program: Výrobní inženýrství
Specializace: Bez specializace

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Porovnání změny mechanických vlastností svarových spojů Al slitin

Název diplomové práce anglicky:

Comparison of changes in the mechanical properties of weld joints of Al alloys

Pokyny pro vypracování:

- Popis Al a jeho slitin – výtvarování Al materiálů nejvíce používaných pro svařování a zjištění jejich mechanických vlastností
- Analýza problematiky svařování Al a jeho slitin – popis problémů při svařování elektrickým obloukem
- Návrh experimentu – vytvoření vhodných svarových spojů s definovanými procesními parametry u vybraných typů Al slitin
- Vyhodnocení mechanických vlastností svarových spojů a základních materiálů
- Závěr – porovnání výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolařík, L. a kolektiv. Konstrukce a navrhování svarových spojů, Učební texty pro kurzy mezinárodních svářečských inženýrů a technologů, ČVUT v Praze, Praha, 2015
- [2] MATHERS, Gene. The welding of aluminium and its alloys. Boca Raton, FL: CRC Press/Woodhead Pub., 2005. ISBN 08-493-1551-4.
- [3] Michna, Š. a kolektiv. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Adin. Prešov, 2005, ISBN: 80-89041-88-4
- [4] Renwick, S. Handbook of Aluminium Alloys. NY Reasearch Press, 2015

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Miroslav Sahul, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: 27.04.2023

Termín odevzdání diplomové práce: 11.08.2023

Platnost zadání diplomové práce: 31.12.2023

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis díkane(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D. , a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Velmi rád bych tímto poděkoval panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi Ph.D. za obětavou pomoc při zpracovávání této práce a všechny odborné rady, doc. Ing. Marii Kolaříkové Ph.D. za velkou pomoc při provedení metalografické zkoušky, Ing. Vítu Novákovi za pomoc při mechanických zkouškách a celému kolektivu Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i své rodině a nejbližším za podporu během celého studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou změny mechanických vlastností při obloukovém svařování hliníkových nevytvrditelných slitin v místě svarového spoje. Teoretická část je zaměřena na hliníkové slitiny, jejich svařitelnost, zejména s ohledem na svařování elektrickým obloukem, a na metody svařování těchto slitin, konkrétně na metodu svařování MIG. Motivací pro sepsání této práce je detailní popsání změn, zejména těch mechanických, ve svarovém kovu po svaření obloukovými metodami a využití těchto dat pro návrh konstrukčních spojů.

Název diplomové práce:	Porovnání změny mechanických vlastností svarových spojů Al slitin
Autor práce:	Bc. Ondřej Dudáš
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	77 stran, 55 obrázků, 8 tabulek, 11 příloh
Klíčová slova:	svařování, MIG, aluminium, Al, obloukové, mechanické, vlastnosti, slitiny, vytvrditelnost, EN AW 5083

Annotation

This diploma thesis deals with the issue of changes in mechanical properties during arc welding of aluminum alloys at the weld joint. The theoretical part is focused on aluminum alloys, their weldability, especially regarding electric arc welding, or the methods of welding these alloys, specifically the MIG welding method. The motivation for writing this thesis is a detailed description of changes, especially mechanical ones, in the weld metal after arc welding and the use of this data for the design of structural joints.

Title of the final thesis:	Comparison of changes in the mechanical properties of weld joints of Al alloys
Author:	Bc. Ondřej Dudáš
Supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	77 pages, 55 pictures, 8 tables, 11 attachments
Keywords:	MIG, aluminium, welding, alloys, Arc, mechanical, properties, hardenability, EN AW 5083

Seznam použitých zkratk a symbolů

TIG	Tungsten Inert Gas (Obloukové svařování neodtavující se wolframovou elektrodou v inertní ochranné atmosféře)
WIG	Wolfram Inert Gas (Obloukové svařování neodtavující se wolframovou elektrodou)
MIG	Metal Inert Gas (Obloukové svařování odtavující se elektrodou v inertní ochranné atmosféře)
MMA	Manual Metal Arc (Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou)
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
SAW	Submerged Arc Welding (Svařování pod tavidlem)
PM	Přídavný materiál
ZM	Základní materiál

Obsah

2. Úvod a cíl práce	10
2. Hliník a jeho slitiny	11
2.1 Základní rozdělení Al slitin	12
2.2 Slévárenské slitiny.....	13
2.3 Tvářené slitiny	14
2.3.1 Vytvrditelné slitiny.....	15
2.3.2 Nevytvrditelné slitiny.....	16
2.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin	16
3. Technologie obloukového svařování	19
3.1 Obloukové svařování	19
3.2 Svařování metodou MIG	21
3.2.1 Princip metody.....	22
3.2.2 Ochranné plyny.....	22
3.2.3 Způsoby přenosu kovu pro metodu MIG	23
4. Technologie svařování hliníkových slitin metodou MIG	24
4.1 Svařitelnost hliníkových slitin obloukovými metodami	24
4.2 Vznik trhlin ve svarových spojích slitin Al	25
4.3 Pórovitost svarů	25
4.4 Pokles mechanických vlastností svarových Al spojů.....	26
5. Příprava experimentální části.....	29
5.1 Základní popis a části experimentu	29
5.2 Svařovací pracoviště a zařízení	30
5.3 Základní materiál – EN AW 5083	31
5.3.1 Mechanické vlastnosti	31

5.3.2	Chemické složení	32
5.3.3	Využití	32
5.4	Přídavné materiály	33
5.5	Parametry svařovacího procesu	36
6.	Vyhodnocení experimentální části	38
6.1	Metalografická analýza-makro	38
6.2	Měření tvrdosti	43
6.3	Zkouška tahem	46
7.	Závěr	60
	Seznam použitých zdrojů	61
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	65
	Přílohy	66

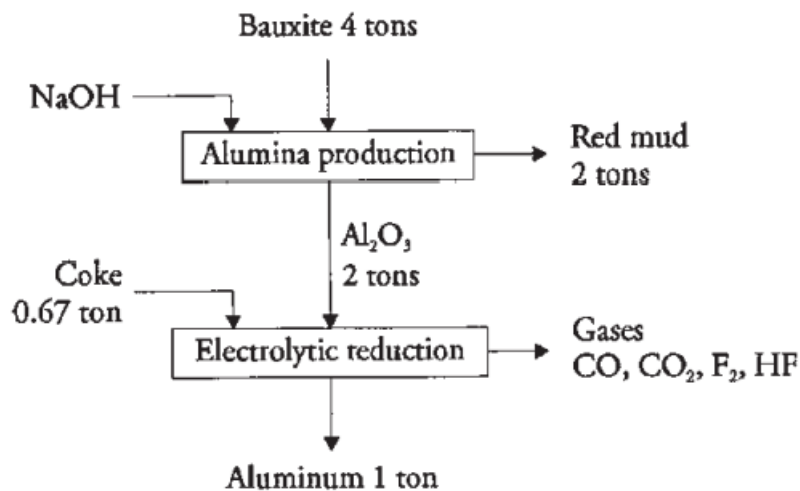
2. Úvod a cíl práce

Diplomová práce se zabývá zkoumáním vlivu svařování obloukovými metodami hliníkových slitin na jejich mechanické vlastnosti, resp. změny mechanických vlastností ve srovnání se základním materiálem. V teoretické části je zpracována rešerše zaměřená na popsání materiálů, se kterými se bude pracovat v experimentální části, dále pak problematiku jejich svařitelnosti, zejména s ohledem na jejich zpracování pomocí obloukových metod. Následuje část věnována metodě MIG (**M**etal **I**nert **G**as), kterou byly prováděny svarové spoje v experimentální části. Výstupy z této práce by měly sloužit ke stanovení, resp. upřesnění koeficientů sloužící ke konstrukčním výpočtům svarových spojů hliníkových slitin ve spolupráci s Ústavem konstruování a částí strojů na FS ČVUT v Praze. Hliníkové slitiny jsou v průmyslu hojně využívány pro mnoho aplikací. Vyznačují se zejména svými vlastnostmi jako je dobrá tepelná a elektrická vodivost, přijatelná cena, malá měrná hmotnost a dobrá recyklovatelnost těchto slitin. Důležitá je také jejich korozní odolnost způsobená vznikem ochranné oxidické vrstvy na povrchu. Svařování těchto slitin však provází několik úskalí, které znesnadňují jejich svařitelnost. Experimentální část byla realizována v Laboratoři výuky svářečských technologií na ČVUT v Praze, kde bylo využito svařovací robotické pracoviště. Svařovací metodou byla metoda MIG a jako základní materiál byla použita nevytvrditelná slitina EN AW 5083. Cílem experimentální části bylo vytvoření svarových spojů a jejich následné podrobení mechanickým zkouškám a rovněž i metalografické analýze pro určení vlivu svařování na pevnostní a strukturní vlastnosti.

2. Hliník a jeho slitiny

Ve většině odvětví průmyslu, které mají souvislost se strojními zařízeními a konstrukcemi, se používají různé materiály. Hlavními atributy pro rozdělení těchto materiálů je jejich chemické složení, mechanické vlastnosti, způsob zpracování, oblast použití daného materiálu či jakost. Tato práce se bude zabývat hliníkem, potažmo jeho slitinami.

Hliník (chemická značka Al- z latinského Aluminium) je prvkem patřící mezi lehké kovy, který byl objeven a extrahován z rudy v první polovině 19.století a je zajímavostí , že podíl tohoto prvku v zemské kůře tvoří více jak 8 %. Komerční výroba pak započala v devadesátých letech 19. století. Vzhledem k vysoké reaktivitě hliníku se tento prvek nenachází v pevném kovovém stavu, ale je přítomen v zemské kůře ve formě různých sloučenin kovů, nejdůležitější z nich je bauxit, ze kterého získáváme hliník pomocí chemických procesů a následnou rafinací k získání požadované čistoty, viz obr.1. Důležité je rovněž zmínit, že širokému používání hliníku a jeho slitin výrazně přispívá možnost jeho recyklace zpětným přetavením.



Obr. 1-Výroba hliníku [5]

Hliníkové materiály se dělí dle chemického složení na technický hliník (min 99 % hm.% Al) a na slitiny hliníku (obsah legujících prvků).

Hliník má teplotu tavení 658 °C a vykazuje velmi dobrou korozní odolnost, která je dána existencí tenkého oxidického filmu oxidu hlinitého na povrchu. Má dále vysokou elektrickou i tepelnou vodivost, nízkou hustotu a je vysoce reaktivní s atmosférickým kyslíkem. Jeho mechanické vlastnosti jako je mez pevnosti je poměrně nízká (70-100 MPa) a vhodnost použití čistého hliníku ke konstrukčním aplikacím je tedy velmi omezená.

Tabulka 1.-Vybrané vlastnosti hliníku.

Hustota [kg.m³]	2700
Měrná tepelná vodivost [W.m⁻¹.K⁻¹]	237
Elektrická vodivost [S.m]	37,7.10 ⁶

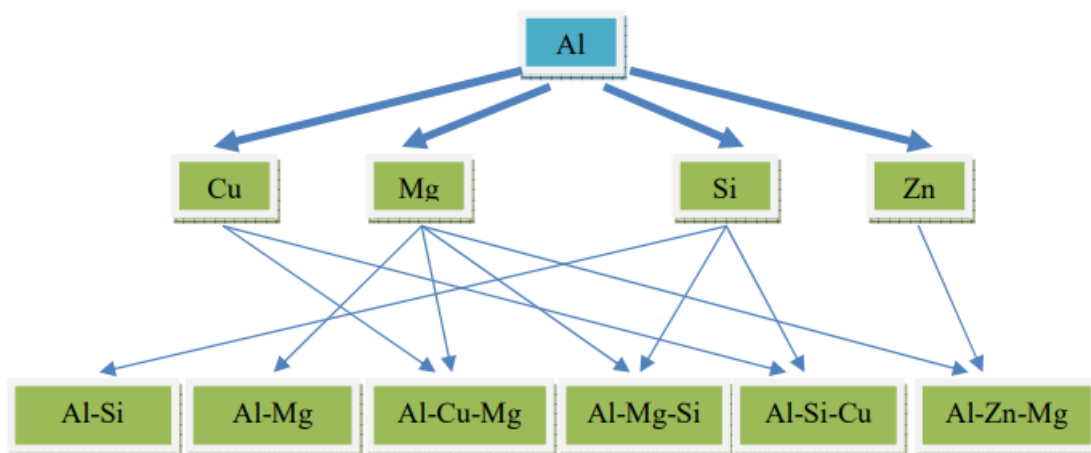
Jeho mechanické vlastnosti lze zvýšit vhodným dolegováním, nejčastěji prvky jako jsou měď (Cu), hořčík (Mg), křemík (Si), zinek (Zn) a mangan (Mn). Důležité je ale zmínit, že rozpustnost jednotlivých fází legur je omezená, avšak i přesto mohou legující prvky významně ovlivnit vlastnosti výsledné slitiny. Nejvyšší rozpustnost mají zinek (82%) a hořčík (17%). Atomy těchto prvků tvoří s hliníkem substituční tuhý roztok a působí tak napěťová pole. Vzájemné působení napěťových polí s dislokacemi prvků legur pak způsobují růst skluzového napětí a tím i následné zvýšení pevnostních vlastností slitiny. [1] [3] [4] [5]

2.1 Základní rozdělení Al slitin

Slitiny hliníku se nejčastěji dělí na základě způsobu jejich tepelného zpracování. Dle způsobu výroby se pak dělí na slitiny tvářené a slitiny slévárenské. Dalšími skupinami jsou pak slitiny Al pro práškovou metalurgii a pěnový hliník. Tvářené se pak dále člení dle možnosti jejich tepelného zpracování do skupin vytvrditelných a nevytvrditelných. Na podkladě norem lze v současné době rozlišit až 120 druhů hliníkových slitin, a proto lze říci, že nějaký velký „boom“ v oblasti vývoje nových slitin nás nejspíše nečeká. Nejvíce rozvíjejí oblastí hliníkových slitin je bezesporu letecký a kosmický průmysl, kde vývoj nových materiálů neustává. [3] [12]

2.2 Slévárenské slitiny

Tato skupina se vyznačuje vyššími obsahy legujících prvků, ale i nečistot či vad v podobě staženin a pórů. Rovněž mají i nižší mechanické vlastnosti oproti tvářeným slitinám, je to ovšem značně závislé na technologii odlévání. Nejlépe se odlévají eutektické slitiny.



Obr. 2- Rozdělení slévárenských slitin [9]

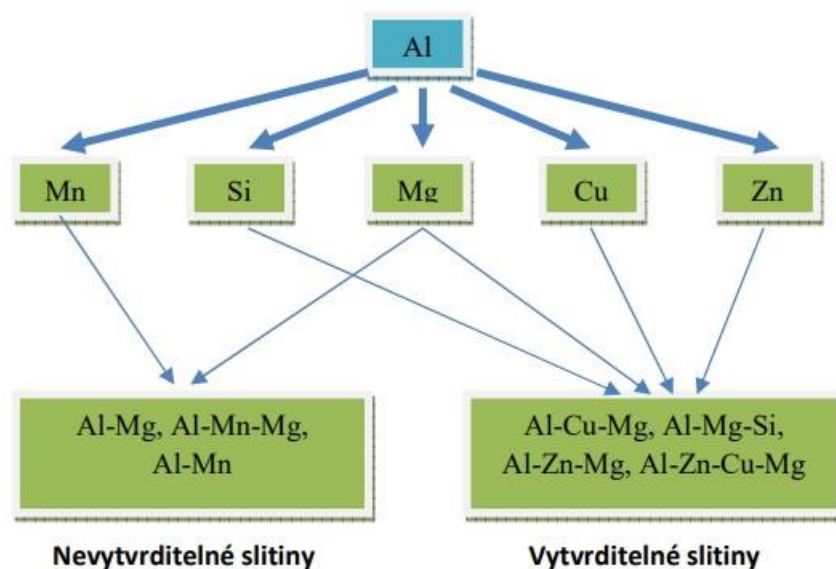
Slitiny typu Al-Si, obvykle nazývány siluminy, mají velmi široké uplatnění hlavně v automobilovém či leteckém průmyslu. Vyznačují se především výbornou zabíhavostí a odolností proti horkým trhlinám, což je důležité především pro svařitelnost. Jsou nejpoužívanější slévárenskou slitinou. Typ Al-Mg se naopak vyznačuje výbornou odolností proti korozi a hořčík umožňuje precipitační vytvrzení. Slitiny na bázi mědi se používají například na písty spalovacích motorů, vyznačují se tedy velmi dobrou odolností za vysokých teplot a dobrou obrobiteľností. Nejsou ale vhodné pro styk s potravinami či pro rázové namáhání. Tato skupina se značí písmeny EN AC-XXXXX, písmeno C (Casting) značí, že se jedná o slévárenskou slitinu, přičemž první číslice udává řadu dle typu slitiny viz tabulka 2 a písmeno. [9] [3] [1]

Tabulka 2.-Tabulka číselného značení slévárenských slitin dle ČSN EN 573-1-3. [3]

Řada	Typ slitiny
10000	čistý Al
20000	Al-Cu
30000	Al-Mn
40000	Al-Si
50000	Al-Mg
60000	Al-Mg-Si
70000	Al-Zn
80000	Al+jiné prvky

2.3 Tvářené slitiny

Tyto slitiny lze tvářet za tepla i za studena a dají se vytvrzovat. U určitých slitin ale nelze dosáhnout zlepšení či vhodné kombinace jejich vlastností, a proto se nevytvrzují.



Obr. 3- Rozdělení tvářených hliníkových slitin [9]

Tyto slitiny se dle normy ČSN EN 573-1-3 značí dle vzoru EN AW XXXX, kde písmeno W značí právě tvářitelnost (Wrought), a následné čtyři číslice označují řadu, závislou na jejím složení a modifikaci.

Tabulka 3.-Tabulka číselného označení tvářených hliníkových slitin dle ČSN EN 573-1-3. [3]

Řada (série)	Typ slitiny	Stav
1xxx	Čistý hliník	Nevytvrditelné
2xxx	AlCuMg	Vytvrditelné
3xxx	AlMn	Nevytvrditelné
4xxx	AlSi	Nevytvrditelné
5xxx	AlMg	Nevytvrditelné
6xxx	AlMgSi	Vytvrditelné
7xxx	AlZnMg	Vytvrditelné
8xxx	Al+jiné prvky	Vytvrditelné i nevytvrditelné

2.3.1 Vytvrditelné slitiny

U této skupiny tvářených slitin, které jsou termální, lze dosáhnout tepelným zpracováním výrazného zlepšení mechanických vlastností jako je tvrdost a pevnosti, použitelné pro konstrukční aplikace. Základními skupinami jsou : duraly (Al-Cu-Mg), avialy (Al-Mg-Si) a tzv. superduraly, které jsou oproti duraly dolegovány zinkem a mají zvýšený obsah hořčíku. Jelikož každá slitina z této skupiny se vyznačuje specifickými vlastnostmi, zde je několik zástupců:

- **AlMg0,5Si0,5 (EN AW 6060)** - velmi dobře svařitelná a tvářitelná slitina, používá se například pro tvarové lisování, po vytvrzení dosahuje hodnot $R_m=200-250$ MPa
- **AlCu4Mg (EN AW 2017)** - slitina nepříliš vhodná ke svařování, dobře obrobitelná, vyšší hodnoty meze pevnosti až k 450 MPa, používá se např. k výrobě draků letadel
- **AlZn6MgCu (EN AW 7075)** - slitina se sníženou odolností proti korozi, dobrou obrobitelností, ale opět špatně svařitelná, na hliníkové slitiny velmi vysoká pevnost: $R_m=450-550$ MPa [3] [1] [11] [2]

2.3.2 Nevytvrditelné slitiny

Tato skupina hliníkových slitin je charakterizována slitinami na bázi Al-Mg, Al-Mn a Al-Si. U těchto slitin lze vylepšit jejich mechanické vlastnosti pouze mechanickou cestou - tvářením za studena. Vytvrzovací proces by u těchto slitin neměl dostatečný efekt, a to i přestože rozpustnost Mg v alfa fázi je značná. Došlo by k enormnímu poklesu tažnosti za nevýrazného zvýšení pevnosti. Mechanické vlastnosti slitin Al-Mg jsou značně závislé na obsahu hořčíku ve slitině, a na parametrech mechanického zpevnění. Slitiny Al-Mn se nevytvřují z trochu jiného důvodu než v případě binárních slitin s hořčíkem. Důvodem je nízká rozpustnost manganu ve fázi alfa. Zde je opět několik zástupců z této skupiny:

- **AlMg3 (EN AW 5745)** - používá se v chemickém a potravinářském průmyslu, vyniká výbornou korozní odolností v náročných korozních prostředích, velmi dobře svařitelná, $R_m=180-280$ MPa
- **AlMn1 (EN AW 3103)**- má podobné využití jako slitina EN AW 5754, vyniká výbornou tvářitelností [1] [2] [3] [11] [14]

2.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin

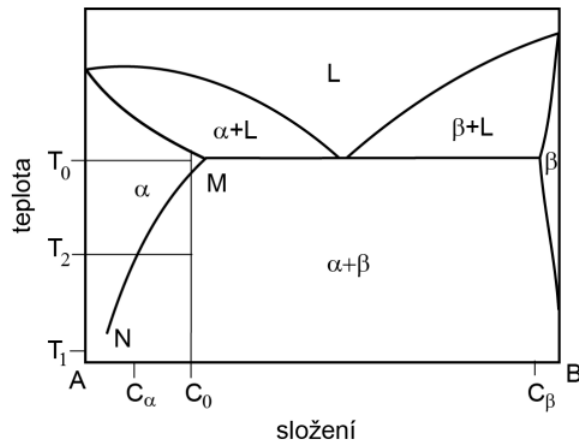
Tento proces rovněž známý jako precipitační vytvrzování má za cíl výrazně zlepšit mechanické vlastnosti vytvrditelných slitin. Skládá se z několika technologických fází:

- **Rozpouštěcí žíhání s následným rychlým ochlazením**
- **Precipitační vytvrzení – stárnutí (umělé/přirozené)**

Důležité je zmínit předpoklad pro možnost precipitačního vytvrzení, kterou je zejména existence tuhého roztoku s omezenou rozpustností určitého prvku v závislosti na teplotě.

Mezi tyto prvky (legury) se řadí: Cu, Mg, Mn, Si a Zn. Tyto prvky v běžném stavu tvoří stabilní substituční tuhý roztok s hliníkem, který je relativně tvárný a houževnatý.

Cílem je v principu homogenizace tuhého roztoku, rozpouštění intermetalických fází a následný vznik semikoherentních či koherentních precipitátů. Důležité pro pochopení těchto dějů jsou mimo jiné binární diagramy.



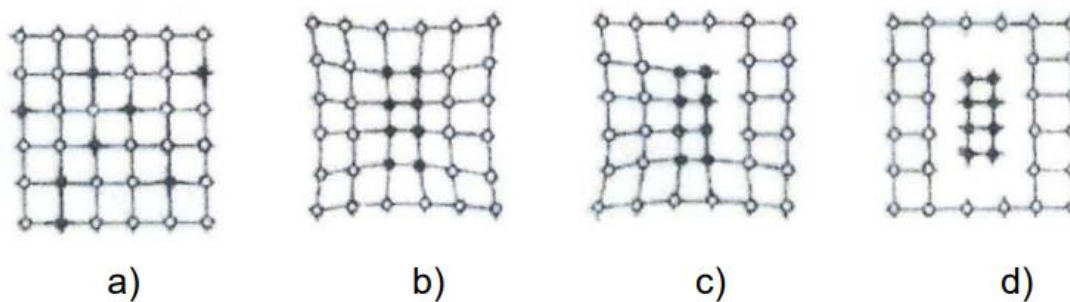
T₀ – homogenizační teplota
T₁ – teplota přirozeného stárnutí
T₂ – teplota umělého stárnutí
N C₀ – přesycení slitiny α

Obr. 4- Příklad dvoufázového – binárního diagramu. [14]

Při rozpouštěcím žíhání je nutné zvolit vhodnou teplotu v oblasti alfa fáze příslušného binárního rovnovážného diagramu, ta musí být vyšší než teplota solvu beta fáze, ale nižší než teplota solidu dané slitiny. V případě nedodržení tohoto teplotního určení by došlo buď k malému nasycení tuhého roztoku alfa nebo v případě překročení teploty solidu i natavení výrobku a jeho znehodnocení. V této fázi dochází k homogenizaci tuhého roztoku a rozpouštění intermetalických fází (CuAl₂, Mg₂Si...)

Rychlé ochlazení je nezbytné k získání přesyceného tuhého roztoku a jeho rychlost musíme zvolit vhodně, aby došlo k precipitačnímu rozpadu alfa fáze, ale zároveň nebyly vyvolány extrémně velké vnitřní deformace vlivem napětí v materiálu.

Stárnutím se rozumí doba, kdy dochází ke vzniku Guinier-Prestonových zón a následnému postupnému vylučování jemných semikoherentních či koherentních precipitátů, kteří přispívají ke zvýšení pevnosti a tvrdosti. Stárnutí může probíhat tzv. přirozeně – na vzduchu v řádu několika dnů až měsíců, nebo tzv. uměle – při teplotě 50-150 °C v řádu několika hodin. [1] [3] [5] [14]



Obr. 5-Stavy krystalických struktur během stárnutí. [14]

- a) přesycený tuhý roztok
- b) koherentní precipitát
- c) částečně koherentní precipitát
- d) nekoherentní precipitát – nežádoucí stav (přestárnutí)

Typické stavy tepelného zpracování u hliníkových slitin dle normy ČSN EN 515 uvádím v následující tabulce.

Tabulka 4.-Typické stavy tepelného zpracování hliníkových slitin.

T3	Rozpouštěcí žíhání + kalení + tváření za studena + přirozené stárnutí
T4	Rozpouštěcí žíhání + kalení + přirozené stárnutí
T5	Ochlazení ze zvýšené teploty tváření + umělé stárnutí
T6	Rozpouštěcí žíhání + kalení + umělé stárnutí
T7	Rozpouštěcí žíhání + kalení + umělé přestárnutí
T8	Rozpouštěcí žíhání + kalení + tváření za studena + umělé stárnutí

3. Technologie obloukového svařování

Svařování je proces spojování materiálů pomocí tepla, tlaku či kombinace obou faktorů, při kterém vzniká nerozebíratelný spoj. Vlastnosti tohoto spojení jsou dány mnoha faktory a je třeba je posuzovat jako celek, neboť vlastnosti základního materiálu a vlastnosti svarového spoje mohou být výrazně odlišné od stavu před svařováním. Mezi základní vlivy ovlivňující tyto vlastnosti patří především ty metalurgické – tuhnutí, chemické složení základního a přídavného materiálu či například napětí a deformace způsobené tepelným ovlivněním.

Oblasti, které jsou kritické z pohledu změny mechanických vlastností jsou především tepelně ovlivněné oblasti čili přechod mezi základním a svarovým kovem. Svařováním se mění pevnostní a plastické vlastnosti či struktura materiálu. Zásadní význam z hlediska výsledků svařování má rovněž i stav, ve kterém se nachází materiál v době vzniku spojení součástí a použitý druh energie na jeho vytvoření.

Oblastí, kterou se diplomová práce zabývá jsou metody tavného svařování, při kterých dochází ke vzniku spoje vlivem tepelného ovlivnění (ohřevu až na teplotu tavení) a následného zchladnutí. Jako zdroje tepla pro tavné metody slouží kyslíkoacetylenový plamen, elektrický oblouk, plazma či laser. [10]

3.1 Obloukové svařování

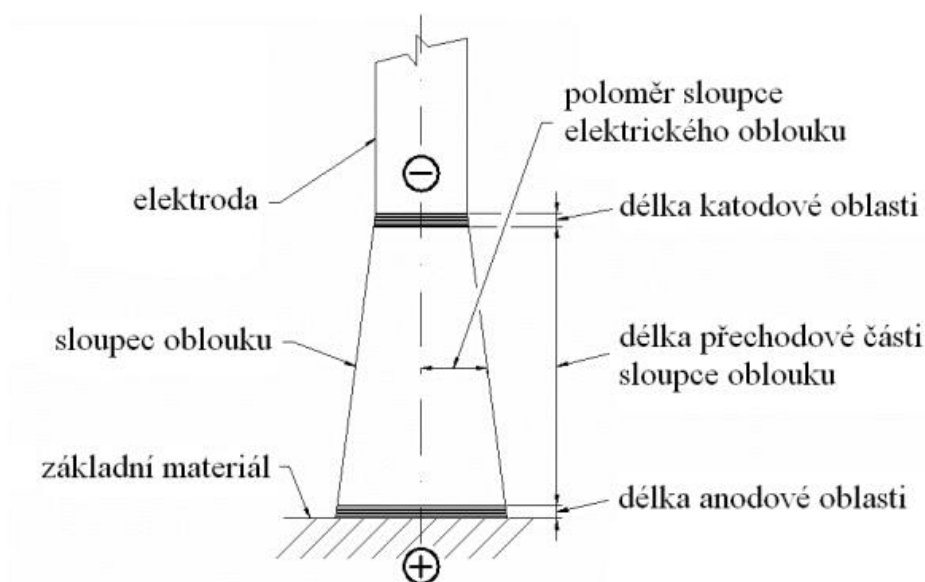
Historie využití elektrického oblouku jakožto zdroje vysokých teplot sahá do roku 1808, kdy byl objeven Angličanem Humphrym Davem [4]. Elektrický oblouk je nízkonapěťový vysokotlaký elektrický výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Výboj vzniká mezi elektrodou a základním materiálem. Jeho výkon, tvar a teplotu lze měnit dle technologických požadavků.

Za předpokladu dostatečného napětí pro ionizaci a proudu pro udržení plazmatu oblouku lze docílit stabilního hoření oblouku. Fyzikální a metalurgické děje probíhají v oblouku za vysokých teplot a v krátkém čase a jsou ovlivňovány několika faktory: chemickým složením plazmatu, materiálem elektrod, geometrickým uspořádáním systému anoda-katoda, tvarem elektrod, tepelnou vodivostí plazmatu, elektrody a základního materiálu či okolní atmosférou.

Mezi základní části elektrického oblouku patří katodová oblast, sloupec oblouku a anodová oblast, viz obr .6. Na katodovou vrstvu elektrody dopadají kladné ionty, které se vlivem elektrostatických sil pohybují ve směru záporného pólu. Teploty v této části oblouku rostou se zvyšujícím se proudem a pohybují se se běžně kolem 2 400-3 000 °C.

Sloupec oblouku se jeví jako zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu mezi elektrodami. Má tvar mírně se rozšiřujícího se kužele směrem od katody k anodě. V té oblasti se dosahuje velmi vysokých teplot, ta závisí na více faktorech, jako například intenzitou proudu, hodnotami napětí a také prostředí oblouku. Maximální teploty se nacházejí ve středu oblouku a průběh teploty lze připodobnit Gaussově křivce. Teploty oblouku při ručním svařování jsou v rozmezí 4 200-5 700 °C, při svařování v ochranných atmosférách metodou TIG/WIG 6 200-7 800 °C a u svařování MIG a MAG při vysoké proudové hustotě v rozmezí 8 000-1 500 °C.

Na anodové skvrně jsou neutralizovány a emitovány záporné elektrony. Teplota anodové vrstvy se pohybuje přibližně mezi 2 700-3 600 °C. [5] [10] [17] [18]



Obr. 6- Části elektrického oblouku. [18]

Při přenosu nataveného materiálu elektrody do svarové lázně dochází ke složitému silovému působení. Toto působení je ovlivněno podmínkami svařování a jejich parametry jako je proudová hustota, průměr elektrody či polarita.

Mezi základní druhy přenosu kovu do svarové lázně patří zkratový přenos, sprchový přenos, impulsní přenos, rotujícím obloukem či v současně době modifikovaný zkratový přenos. [10] [2] [13]

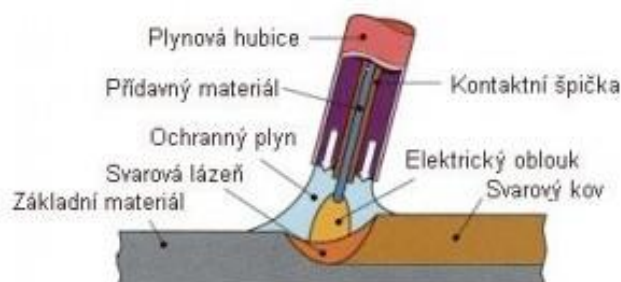
Mezi metody vhodné pro obloukového svařování Al slitin řadíme:

- **MIG** (Metal Inert Gas-131) - svařování v inertní ochranné atmosféře tavící se elektrodou
- **MMA** (Manual Metal Arc-111) - ruční svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou
- **TIG/WIG** (Tungsten/Wolfram Inert Gas-141) - svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertní ochranné atmosféře

3.2 Svařování metodou MIG

Jedná se o technologii svařování tavící se elektrodou v ochraně inertního plynu, která patří mezi nejrozšířenější metody svařování, především pro neželezné kovy a jejich slitiny. Mezi hlavní důvody použití této metody napříč průmyslem je široký výběr přídavných materiálů, ochranných plynů a snadná možnost mechanizace a robotizace této metody. MIG je založena na principu hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě přídavného drátu v ochranné atmosféře. [10] [18]

3.2.1 Princip metody



Obr. 7-Princip metody svařování MIG [19]

Na obrázku výše lze zjednodušeně zobrazený princip metody. Přidavný materiál (ve formě drátu) je podáván pomocí podávacích kladek automatického podavače, který je většinou součástí svařovacího zdroje. Ochranný plyn je dodáván ze zásobníku (obvykle tlakové láhve) hadicovým vedením přímo do svařovací hubice hořáku.

3.2.2 Ochranná atmosféra

Hlavní úlohou těchto plynů – v případě metody MIG jde o Argon a Helium, je zamezení přístupu vzdušné atmosféry do oblasti svaru, zejména pak ochrana tavné lázně, jejího okolí a vlastní elektrody. Ochranné atmosféry lze využít i pro tzv. sekundární ochranu, kdy je pomocí speciálního přípravku chráněn i kořen svaru. Při nepoužití ochranného plynu dojde k znehodnocení svarového spoje vlivem velkého množství pórů a může zapříčinit i vznik jiných vad.

Tyto plyny mají ale vliv i na způsob přenosu svarového kovu v oblouku, chování tavné lázně, ovlivňují rychlost tuhnutí i vlastního svařování a výrazně ovlivňují geometrii svaru (hloubku závaru, profil svarové housenky apod.)

Mezi hlavní charakteristiky, které ovlivňuje množství a druh ochranného plynu řadíme:

- Metalurgické děje při tvorbě kapky odtavující se kovu z elektrody
- Tvar a rozměr oblouku
- Síly působící v oblouku

- Povrch svaru a formování svaru
- Mechanické vlastnosti svarového spoje
- Charakter přenosu během oblouku
- Geometrie svaru

Inertní plyny používané u metody MIG(Ar/He/Ar+He) chemicky nereagují se svarovou lázní (jsou chemicky netečné), a proto nemají vliv na výsledné chemické složení svarového kovu. Tyto plyny se používají především pro svařování slitin mědi, hliníku a niklu. [2] [4] [18]

3.2.3 Způsoby přenosu kovu pro metodu MIG

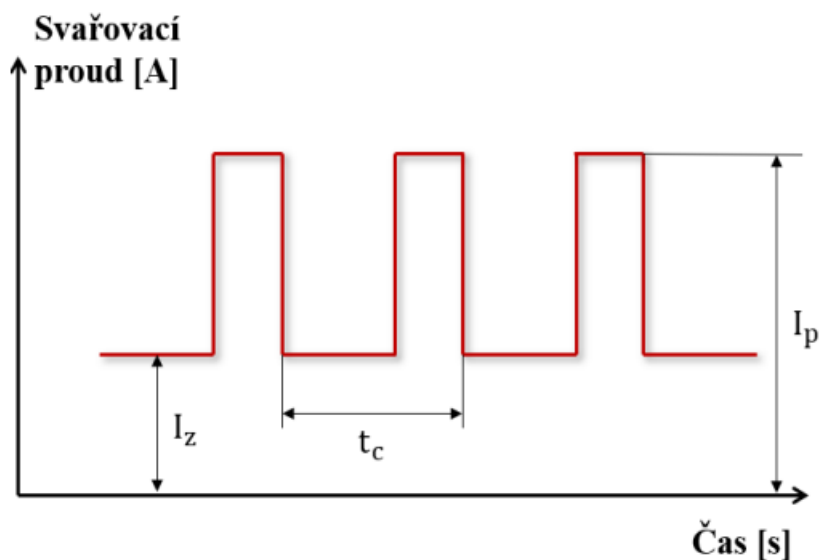
Důležitým parametrem pro svařování je jednoznačně způsob přenosu kovu v oblouku, ten závisí pak především na parametrech samotného svařování jako je svařovací proud a napětí na oblouku. Tento faktor má výrazný vliv na kvalitu a geometrii svaru, množství vneseného tepla či produktivitu samotného svařovacího procesu. Mezi základní způsoby přenosu při metodě MIG patří zkratový přenos, sprchový přenos a neméně důležitý impulzní přenos.

Zkratový způsob přenosu se uplatňuje v rozsahu svařovacího proudu od 60-180 A a napětí 14-22 V. Při zkratovém způsobu přenosu dochází k přerušování oblouku zkratem, při kterém se odděluje část kovu elektrody. Pravidelné zhasínání má přínos především v menším vneseném teple, a tím tak zmírňuje tepelně deformační účinek svařování.

Sprchový přenos je pak typický pro rozsahy proudu od 200-500 A a napětí 28-40 V. Jedná se o bezzkratový proces, kde při svařování dlouhým obloukem uvolňuje velké množství kapek malých rozměrů, které při přeletu elektrickým obloukem mají při dopadu velký rozptyl. Význam má použití při svařování neželezných kovů při svařování pod atmosférou argonu. Přínos sprchového přenosu je v snadné ionizaci oblouku a tím i předeřevu drátu. Nevýhodou je poměrně vysoký tepelný příkon do oblasti svaru. Přenos je vhodný pro hluboké závary.

Impulzní přenos je forma bezzkratového přenosu, kdy je cyklus řízen elektronickou cestou a průběh svařovacího proudu má pulzní charakter (pravidelný cyklus o určité frekvenci). Frekvence se pohybuje od 25-500 Hz. Tato aplikace má významný přínos při svařování hliníkových slitin a jsme schopni se přiblížit se výhodám svařování metodou TIG jako je pravidelná kresba svaru či velmi dobrá regulace vneseného tepla.

Při svařování metodou MIG se uplatňuje stejnosměrný proud a tzv. nepřímá polarita – elektroda je zapojena na kladném pólu. Při tomto zapojení je maximalizován čistící účinek elektrického oblouku, který spočívá v rozrušování oxidické vrstvy samotným účinkem elektrického oblouku a je při svařování hliníkových slitin velmi důležitý. [10] [18]



Obr. 8- Průběh impulsního přenosu v závislosti na čase. [28]

4. Svařitelnost hliníkových slitin metodou MIG

4.1 Svařitelnost hliníkových slitin obloukovými metodami

Svařitelnost hliníkových slitin pomocí obloukových metod je na velmi dobré úrovni za předpokladu použití tzv. inertní ochranné atmosféry, která zaručí nezbytné rozrušení tenké oxidické vrstvy Al_2O_3 na povrchu materiálu a brání další oxidaci během svařování z důvodu nerozpustnosti kyslíku v hliníku. Komplexně vzato je ale činitelů, kteří významně ovlivňují svařitelnost více, mezi některé další patří: velká afinita Al ke kyslíku, velká rozpustnost plynů v Al či precipitační děje, zejména u vytvrditelných slitin. Důsledky působení těchto činitelů pak může dojít k problémům jako je vznik trhlin za tepla, pórovitost svarů či pokles mechanických vlastností, na který se podrobně zaměřím v dalších kapitolách této práce. Největším problémem je však právě již zmíněná tvorba oxidické vrstvy na povrchu.

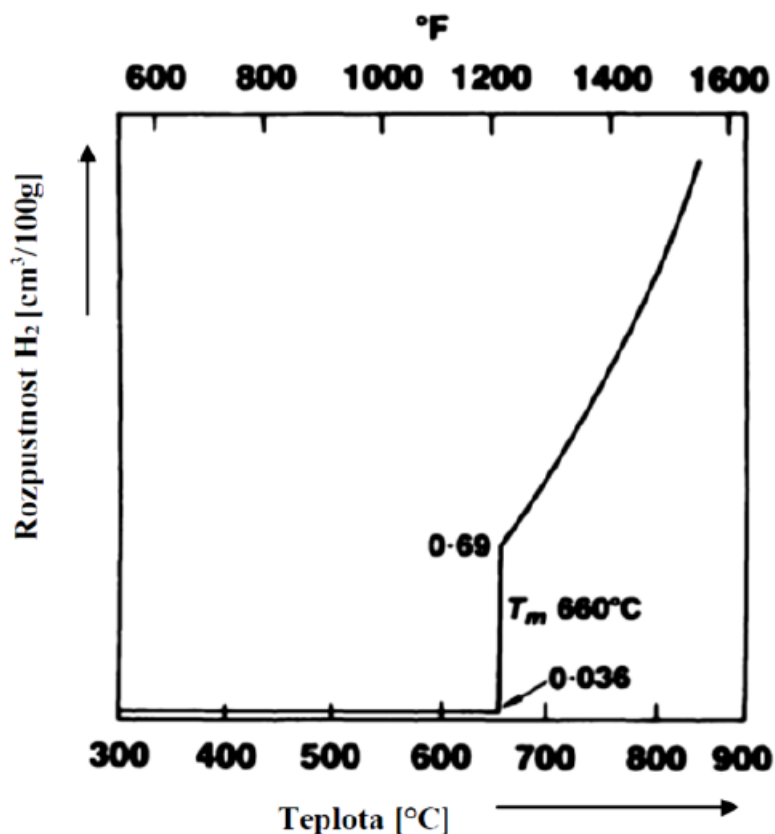
4.2 Vznik trhlin ve svarových spojích slitin Al

Trhliny se mohou ve svarových spojích hliníkových slitin vyskytovat ve dvou podobách. Prvním případem jsou trhliny za studena. Tyto trhliny jsou méně časté a dochází k nim především u vybraných slitin na bázi Al-Cu-Mg a Al-Zn-Mg a nejvíce v TOO. Vznik tohoto problému probíhá přibližně v rozmezí 200-400 °C a jejich příčinou může být iniciace již vzniklých mikrotrhlin při vysokých teplotách, pórovitost uvnitř svaru či křehkost na okrajích zrn. Jako opatření lze využít vícestupňového tepelného zpracování.

Druhým, častějším případem, je pak vznik trhlin za tepla, který je spojen s objemovými změnami v průběhu krystalizace. Vlivem změny koeficientu teplotní roztažnosti na pomezí tuhé a tekuté fáze zde vznikají tahová napětí, a pokud je zde velký interval krystalizace, tak dojde k velkému smrštění a následnému vzniku trhlin. Čím větší je pak interval tuhnutí dané slitiny, tím náchylnější je slitina na vznik trhlin. Z tohoto vyplývá, že jako faktory, které mohou ovlivnit tento problém jsou především chemické složení základního materiálu a přídavného materiálu se zaměřením na omezení nečistot v obou těchto materiálech a vyšším obsahem legujících prvků.

4.3 Pórovitost svarů

Nepříznivý vliv vodíku na kvalitu svarových spojů není ničím překvapivým, nicméně u svařování hliníkových slitin je tento problém poměrně značný a při nedodržení určitých zásad i častý. Tento problém, narozdíl například u ostatních vad se vyskytuje přímo ve svarovém kovu ve formě bublinek, pórů či dokonce zárodků trhlin. Příčinou je pak velmi prudký pokles rozpustnosti vodíku při krystalizaci a jeho neúplné vyloučení ze svarové lázně či vyloučení pod teplotou solidu. V tekutém stavu pak vylučující se vodík vytvoří útvary ve formě bublinek či pórů. Především pórovitosti lze především minimalizováním zdrojů vodíku před svařováním a použitím ochranné atmosféry vysoké čistoty. [2] [3] [4] [18]

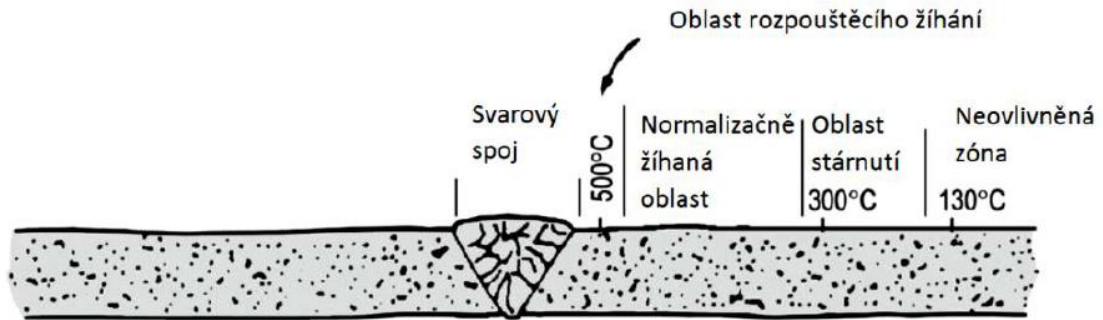


Obr. 9- Rozpustnost vodíku v závislosti na teplotě [20]

4.4 Pokles mechanických vlastností svarových Al spojů

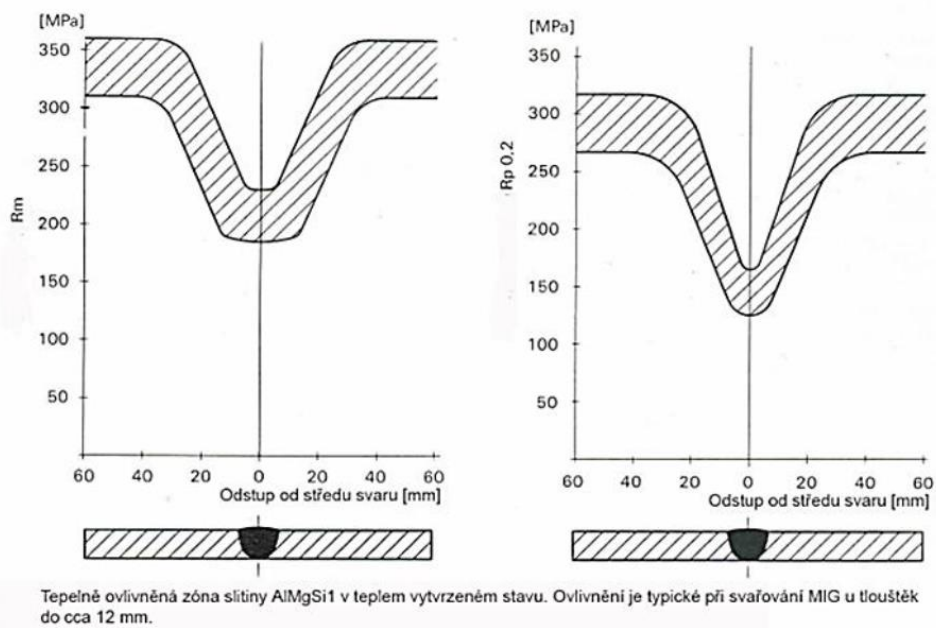
Jedná se o velmi závažný problém zejména u vytvrditelných hliníkových slitin. Předmětem této diplomové práce je kvantifikovat tyto změny u slitin nevytvrditelných u kterých je tento problém méně závažným jevem.

Týká se TOO, kde dochází vlivem precipitačních jevů k rozpouštění vytvrzující fáze a tím k výraznému poklesu mechanických vlastností, až na úroveň žíhaného materiálu, ale i snížení odolnosti vůči korozi. Během svařování dochází k ohřevu materiálu až na teplotu tavení. V TOO probíhají při teplotě nad 200 °C precipitační děje a dle teploty se mění mechanické vlastnosti jako je pevnost a tvrdost. Poměrně dobře je tato problematika popsána u vytvrditelných slitin, ale u těch nevytvrditelných je třeba hlubšího zkoumání a je třeba nalézt parametry či tepelné režimy, které tyto jevy potlačí. Pro vytvrditelné slitiny lze nalézt některé možnosti jako je opětovné tepelné zpracování či použití metody svařování s pracovní teplotou menší, než je teplota stability slitin, tedy přibližně 200 °C. [2] [3]



Obr. 10- Oblasti tepelného ovlivnění svarového spoje [23]

Pro ukázkou dokládám některé z předchozích výzkumů z této oblasti.



Obr. 11- Průběh poklesu meze pevnosti (vlevo) a smluvní meze pevnosti (vpravo) u vytvrditelné slitiny AlMgSi1. [3]

Na obr.11 je zcela zřetelný výrazný pokles meze pevnosti v TOO i ve svaru jako takovém, důležitost popsání těchto změn nejen co se týče meze pevnosti, ale i tvrdosti či tažnosti, je nezbytným podkladem pro pevnostní výpočty ve fázi navrhování svarových spojů.

Tento proces poklesu meze pevnosti lze popsat pomocí výpočtového koeficientu α viz níže, který je roven poměru R_d ku R_{wd} , kde R_d je mez pevnosti neovlivněného materiálu a R_{wd} je mez pevnosti materiálu po svaření.

$$\alpha = \frac{R_{wd}}{R_d}$$

Koeficient α nabývá u vytvrditelných slitin hodnot až okolo 0,5-0,4 a u nevytvrditelných typu AlMg okolo 0,9. Zpřesnění těchto koeficientů pro nevytvrditelnou slitinu AW 5083 v závislosti na typu přídavného materiálu (popř. prokázání jeho vlivu) je předmětem experimentální části diplomové práce.

5. Příprava experimentu

Jak již bylo nastíněno, cílem experimentální části je vyhotovení svarových spojů a jejich následné podrobení zkouškám mechanickým vlastností-zkouška tvrdosti podle Vickerse v souladu s ČSN EN ISO 9015-1, zkouška tahem dle ČSN EN ISO 5178, k určení poklesu mechanických vlastností po svařování a důkladnému rozboru naměřených dat. Na metalografických výbrusech pak byla provedena makroskopická analýza. Svarové spoje byly z důvodu vyšší přesnosti a přenositelnosti výsledků svařovány na robotizovaném pracovišti FS ČVUT v Praze. V neposlední řadě bylo cílem porovnat a ověřit korelaci s doporučenými výpočtovými koeficienty.

5.1 Základní popis a části experimentu

Samotná experimentální část probíhala na robotizovaném pracovišti FS ČVUT v Praze a v laboratořích Ústavu strojírenské technologie. V první fázi bylo nutné zvolit základní materiál, druhy přídavného materiálu a zvolit vhodné parametry svařování.

Zvolena byla hliníková slitina EN AW 5083 na bázi AlMg, která bude blíže popsána v kapitole 5.3. Pro potřeby porovnání bylo zvoleno hned 5 typů svařovacích drátů, voleny byly s ohledem na doporučení výrobce (firmy ESAB) a předchozí zkušenosti. Bylo svařováno metodou MIG a typem přenosu CMT (Cold Metal Transfer). Velikost vzorků svarových spojů byla navržena 100x150 mm, svařeny byly tupým svarem bez svarové mezery. Od každého typu přídavného materiálu byly svařeny 4 vzorky, celkem tedy 20 svařených vzorků. Tloušťka svařovaných vzorků byla 3mm.

V další fázi experimentu bylo provedeno dělení vzorků tak, aby je bylo možné připravit na následné zkoušky tahem, makrostrukturní analýzu a na nich provedenou zkoušku tvrdosti. Po dělení následovalo příprava metalografických výbrusů a obrobení vzorků pro zkoušku tahem.

Po provedení mechanických zkoušek základního materiálu, přídavného materiálu a samotných svarových spojů došlo ke zpracování, vyhodnocení a porovnání výsledků vzhledem k původnímu stavu materiálu v návaznosti na teoretické předpoklady.

5.2 Svařovací pracoviště a zařízení

Samotné svařování pak bylo realizováno na robotizovaném pracovišti FS ČVUT, které obsahuje průmyslového robota Fanuc ArcMate 100iC, jednoosé polohovadlo Fanuc P250 a svařovací zdroj Fronius TPS 3200 CMT. Ukázku pracoviště je možné vidět na obrázcích 12 a 13.



Obr. 12- Ukázka robota Fanuc a svařovacího přípravku.



Obr. 13- Uspořádání robotizovaného pracoviště FS ČVUT.

Jako další podpurná zařízení například pro přípravu vzorků pro svařování sloužili mechanické dílenské nůžky či systém pro monitorování průběhu svařování WeldMonitor 4.5.

5.3 Základní materiál – slitina EN AW 5083

Slitina EN AW 5083 se podle chemického složení značí AlMg4.5Mn0.7 je hojně využívána v širokém spektru aplikací. Vyniká především velmi dobrou svařitelností, vynikající korozní odolností proti chemickým látkám či proti mořské vodě. Materiál si zachovává výborné mechanické vlastnosti po procesu svařování. Jedná se o nevytvrditelnou slitinu.

5.3.1 Mechanické vlastnosti ZM

Materiál se dodává ve nejčastěji ve stavu H11-v tzv. měkkém stavu po žíhání. V rámci pětitisícové řady se tato slitina řadí k těm s nejlepšími mechanickými vlastnostmi. Mez pevnosti se dle materiálových listů pohybuje nejčastěji v rozmezí 270-340 MPa, tažnost je dle materiálových listů v mezích 11-15 % a tvrdost okolo 75 HB. Tyto mechanické vlastnosti byly ověřeny v rámci zkoušky tahem a hodnoty meze pevnosti základního materiálu dosáhly 334 MPa a tažnosti 19,5 %, viz kapitola 6.3. [13] [16]

5.3.2 Chemické složení ZM

Chemické složení základního materiálu bylo ověřeno pomocí ručního přenosného spektrometru a výsledek lze nalézt v tabulce č.5. Hodnoty v tabulce č. 5 byly zprůměrovány ze čtyř opakovaných měření.

Tabulka 5.-Chemické složení slitiny EN AW 5083 (AlMg4.5Mn0.7)

Prvek	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Cu	Ni
EN AW 5083	% zbytek	0,17	0,23	0,014	3,7	0,5	0,16	0,07	0,014	0,008



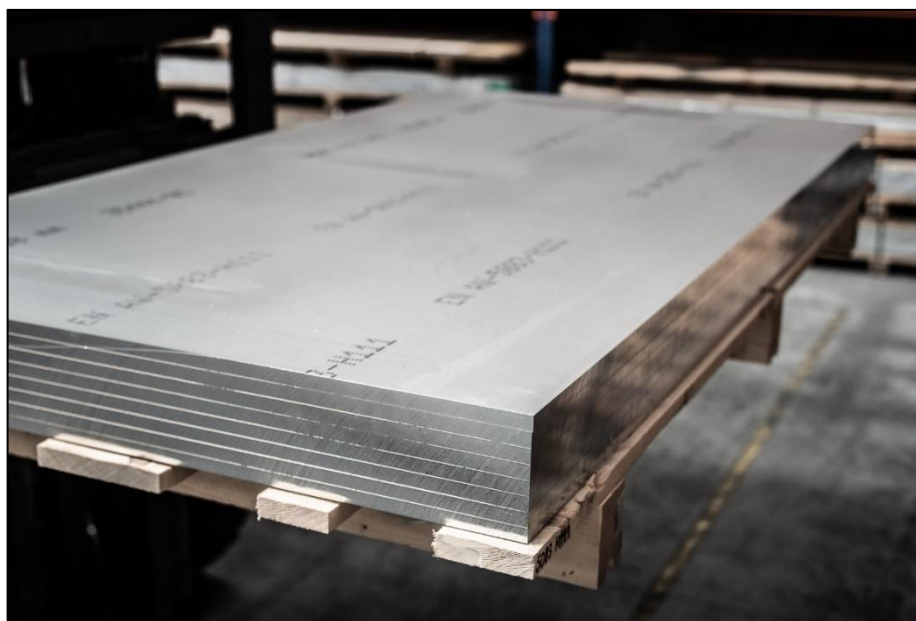
Obr. 14- Ukázka z měření chemického složení základního materiálu.

5.3.3 Využití

Nejčastěji se základní materiál v průmyslové praxi používá v následujících oblastech:

- Stavba lodí
- Železniční vozy
- Automotive
- Tlakové nádoby
- Hydraulické komponenty
- Letecký průmysl

Materiál je obvykle dodáván ve formě plechů, tyčí či profilů. V tomto případě byl zvolen plech o tloušťce 3mm.



Obr. 15- Plechy materiálu EN AW 5083 ve stavu H111 [15]

5.4 Přídavné materiály

Přídavné materiály použité pro experiment byly vybírány s ohledem na doporučení výrobce, v našem případě firmy ESAB Vamberk s .r .o , člen koncernu, ale také bylo z důvodu poměrně velké variability výběru při svařování hliníkových slitin vycházeno z praktických zkušeností. Bylo tedy zvoleno 5 typů přídavných materiálů, přičemž tři z nich jsou materiály pětitisícové řady (mají velmi podobné chemické složení k základnímu materiálu), jeden je na bázi křemíku z řady čtyřtisícové a poslední je čistý hliník, tedy tisícová řada. Průměr všech typů přídavných drátů byl 1,2 mm. Označení a chemické složení lze nalézt níže v tabulce č. 6. [26]

Tabulka 6.-Zvolené typy přídavných materiálů a jejich chemické složení. [22]

Typ PM/Obsah prvku [%]	Al	Mn	Si	Mg	Cu	Ti	Zn	Zr	Fe	Cr
OK Autrod 5087	% zbytek	0,8	0,04	4,7	0,01	0,08	0,01	0,11	0,12	0,08
OK Autrod 5356	% zbytek	0,13	0,05	4,9	0,01		0,01		0,13	0,12
OK Autrod 5183	% zbytek	0,65	0,04	4,9	0,01	0,1	0,01		0,13	0,08
OK Autrod 4043	% zbytek	0,01	5		0,02	0,01	0,01		0,14	
OK Autrod 1070	% zbytek	0,01	0,02		0,01				0,13	

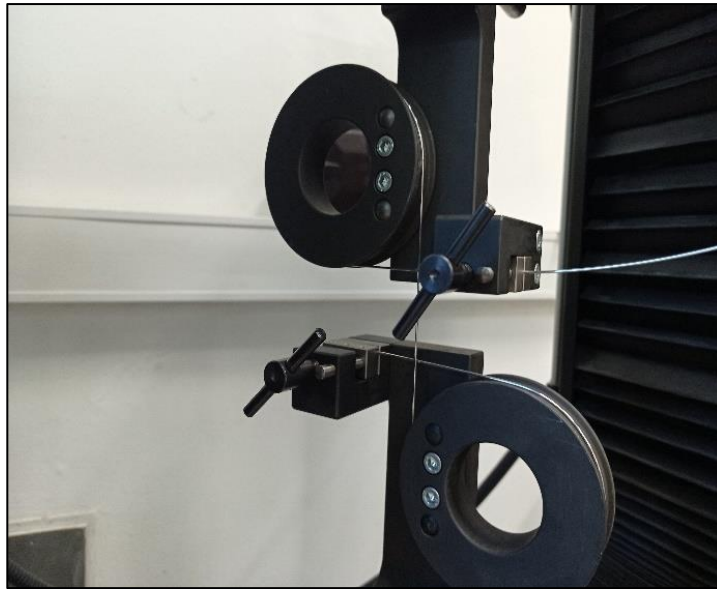
Přídavné materiály byly podrobeny zkoušce tahem na speciálních kladkách pro zjištění orientačních hodnot meze pevnosti jednotlivých svařovacích drátů. Zkouška byla realizována dle normy ČSN ISO 6892-1 a proběhla v laboratoři mechanických zkoušek na FS ČVUT v Praze.

Zkušební vzorky o průměru 1,2mm byly dlouhé cca 500 mm a od každého PM byly provedeny tři měření. Zátěžná síla byla stanovena na 100 N, rychlost zatěžování 10 mm/min a zkouška probíhala do přetržení vzorku. Hodnoty tažnosti nebylo možné vyhodnocovat z důvodu nemožnosti měřit prodloužení pomocí průtahoměru vlivem prokluzu a natáčení drátu na kladkách.

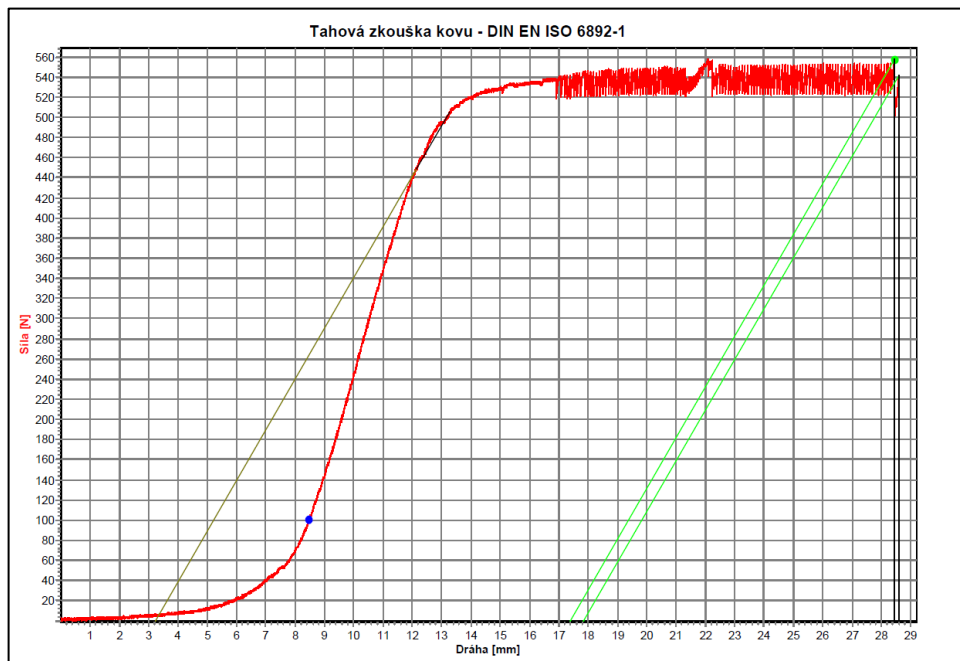
Zkouška tahem PM byla provedena z důvodu nemožnosti ověřit základní mechanické vlastnosti přídavných drátů před samotným svařením. Výrobce udává pouze zaručené mechanické vlastnosti po svaření. Byly provedeny tři zkoušky od každého typu drátu pro větší statistický soubor dat a vyloučení případných krajních hodnot. Výsledky, které reprezentují průměrnou hodnotu ze tří měření lze nalézt v tabulce č.7.

Tabulka 7.-Naměřené mechanické vlastnosti jednotlivých typů přídavných drátů.

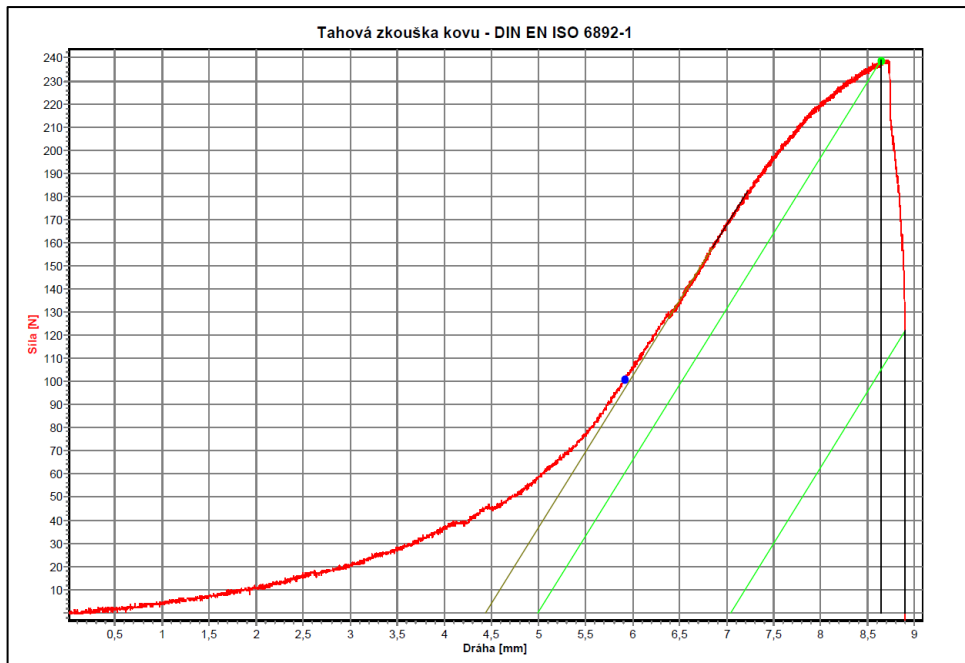
Typ PM	Mez pevnosti v tahu [N/mm²]
<i>OK Autrod 5087</i>	471
<i>OK Autrod 5356</i>	466
<i>OK Autrod 5183</i>	500
<i>OK Autrod 4043</i>	246
<i>OK Autrod 1070</i>	220



Obr. 16- Upnutí přídavných drátů do speciálních kladkových čelistí.



Obr. 17.- Ukázka ze záznamu pracovního diagramu zkoušky tahem – PM OK Autrod 5183.



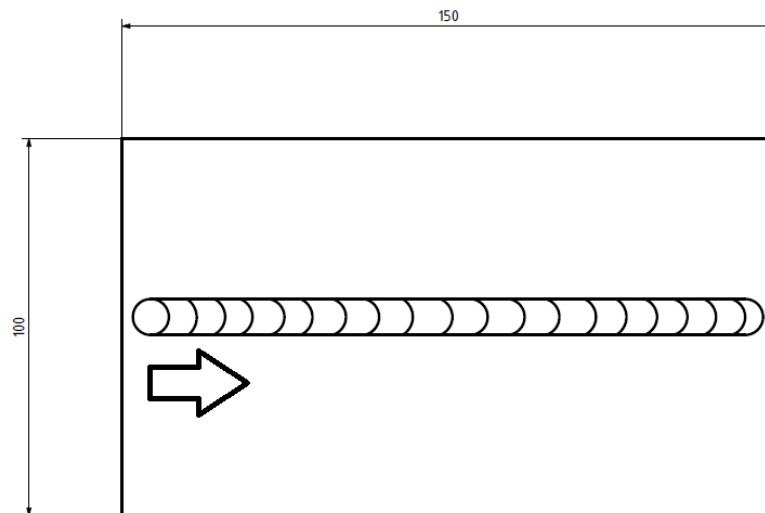
Obr. 18- Ukázka ze záznamu pracovního diagramu zkoušky tahem- PM OK Autrod 1070

5.5 Parametry svařovacího procesu

Svařování vzorků bylo prováděno metodou MIG režimem CMT (Cold Metal Transfer), který je velmi vhodný právě pro svařování hliníkových slitin, kde nám jde z pohledu svařitelnosti o stabilitu oblouku a zároveň i málo vneseného tepla do základního materiálu. Rovněž bylo použito nezbytné ochranné atmosféry ve formě 100 % Argonu čistoty 4.6 při průtoku 8-10 l/min a byl dodáván jak pomocí hubice přímo do svarové lázně, tak i zesponu svaru pro zajištění kořenové ochrany (pomocí přípravku na obr.19)



Obr. 19- Upnutí základního materiálu pomocí přípravku.



Obr. 20- Výsledný vzorek svařeného základního materiálu s vyznačeným směrem svařování.

Samotné procesní parametry, které byly zvoleny pro svařování všech zkoumaných vzorků byly stanoveny experimentálně. Nakonec bylo svařováno proudem 110 A a napětím 13,3 V. Zkušební svary byly kontrolovány vizuálně a všechny vyhověly kvalitou stupni B podle ISO 10042. Svařováno bylo rychlostí 40 cm/min a posuv drátu 5,4 m/min. Před začátkem svařovacího procesu bylo nezbytné základní vzorky odmastit a okartáčovat (pomocí nerezového kartáče) za účelem rozrušení oxidické vrstvy s vysokou teplotou tavení. Na obr.21 lze vidět typický průběh svařování při použití režimu CMT. Pro porovnatelnost výsledků bylo svařováno stejnými parametry a tepelný cyklus nebyl nijak ovlivňován.



Obr. 21- Průběh proudu a napětí v závislosti na čase při režimu CMT.

6. Vyhodnocení experimentální části

V rámci vyhodnocení experimentální části bylo nutné provést metalografickou analýzu makrostruktury se zaměřením na kontrolu vnitřních vad, geometrii svarové housenky (převýšení svaru a výšku svaru včetně kořene) a posouzení vlivu na strukturu a tepelné ovlivnění materiálu (šířku tepelně ovlivněné oblasti). Jako další bylo realizováno provedení zkoušky tahem pomocí využití systému Aramis a naměřen průběh tvrdosti svarového spoje s vyhodnocením tvrdosti ve všech oblastech: v základním materiálu, TOO a samotném svaru.

6.1 Metalografická analýza-makrostruktury

Pro účel této analýzy byly od každého svařeného vzorku (každého PM) připraveny 3 vzorky. Vzorky byly nejdříve hrubě děleny na pásové pile, následně řezány na požadované velikosti na metalografické pile, a pak zality speciální pryskyřicí. Následovalo postupné trojnásobné broušení vzorků na brusných papírech-1200, 2000 a 4000. Broušení probíhalo s přívodem vody, rychlost otáčení kotouče byla 300 ot./min a doba jednoho broušení byla 2 min. Finální mechanickou operací pak bylo leštění, to probíhalo na speciálních leštících plátnech rychlostí 150 ot./min bez vody, dobou 4 min a s přidavkem leštící emulze na bázi SiO_2 .

Pro lepší zviditelnění jednotlivých oblastí spoje pak bylo přikročeno k leptání pomocí Kellera leptadla na bázi kyseliny chlorovodíkové, fluorovodíkové, dusičné a destilované vody.

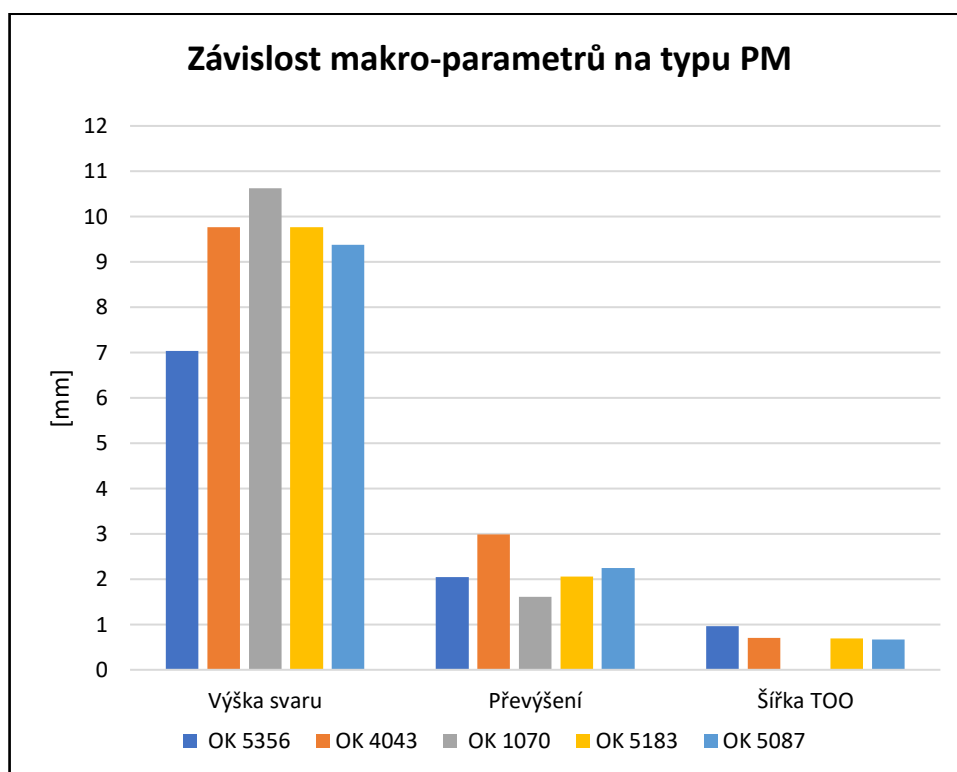


Obr. 22- Leštění pomocí zařízení Buehler Grinder-Polisher Beta s automatickou hlavou Vector.



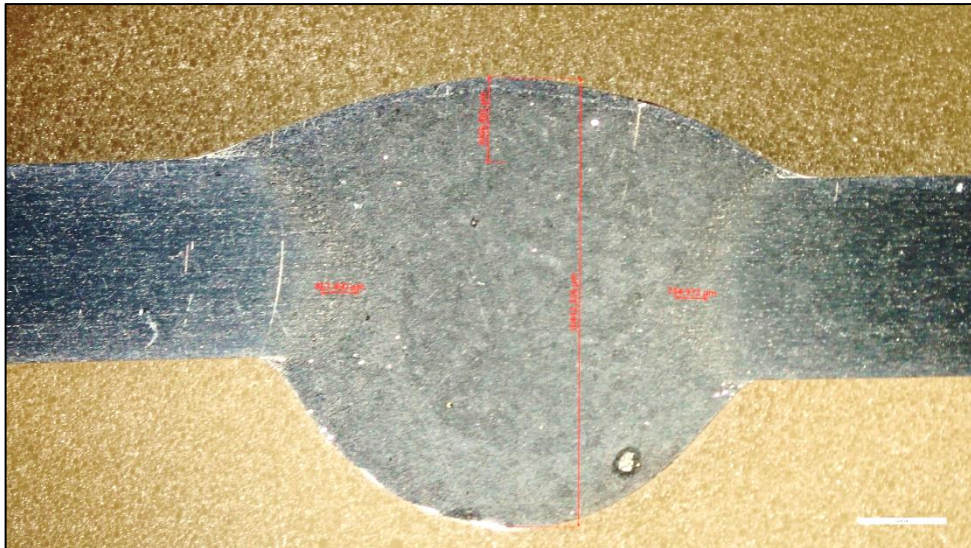
Obr. 23- Vzorek určený pro analýzu makrostruktury.

V rámci vyhodnocování bylo přistoupeno k analýze geometrických parametrů jako je převýšení svaru, zejména s ohledem na zvolené požadavky odpovídající stupni B dle ČSN EN ISO 10042, dále pak celkovou výšku svaru a šířku TOO.



Obr. 24- Naměřené charakteristiky při makrostrukturní analýze.

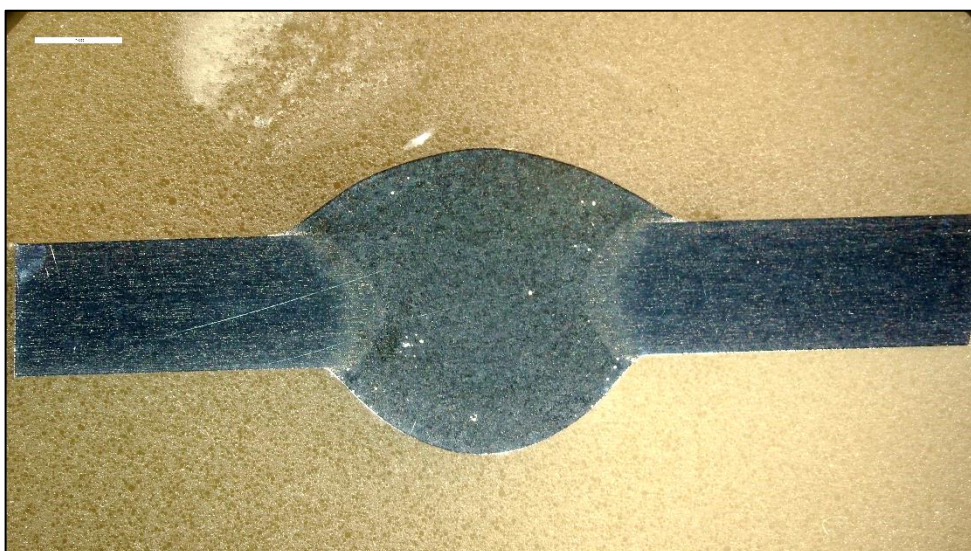
Dle grafu na obr. 24 lze konstatovat, že ačkoliv by se dle teoretických předpokladů mohlo zdát, že primární vliv na geometrii svaru mají hlavně svařovací parametry jako je proud a napětí, vliv přídatného materiálu není rozhodně zanedbatelný. Mezi zástupci pětistícové řady je například poměrně velké převýšení u OK Autrod 5183 a 5087, které je ale v korelaci s dalším zástupcem, a to OK Autrod 5356. Rovněž je dobré se pozastavit i nad faktem, že u PM OK Autrod 1070 nebyl nalezen téměř žádný přechod mezi svarovým kovem a ZM, je zde patrná velmi malá oblast, která byla prakticky neměřitelná. Číselně vyjádřeno, největší převýšení svaru bylo dosaženo u OK Autrod 4043 a to 2,99 mm, naopak nejnižší u OK Autrod 1070, kde bylo patrné výrazné prolití svarového kovu v oblasti kořene. Nejširší tepelně ovlivněná oblast byla naměřena u OK Autrod 5356 a měřila 0,96 mm. Na následujících makro-snímčích lze vidět způsob odečtu hodnot i celkovou vizuální stránku svarových spojů.



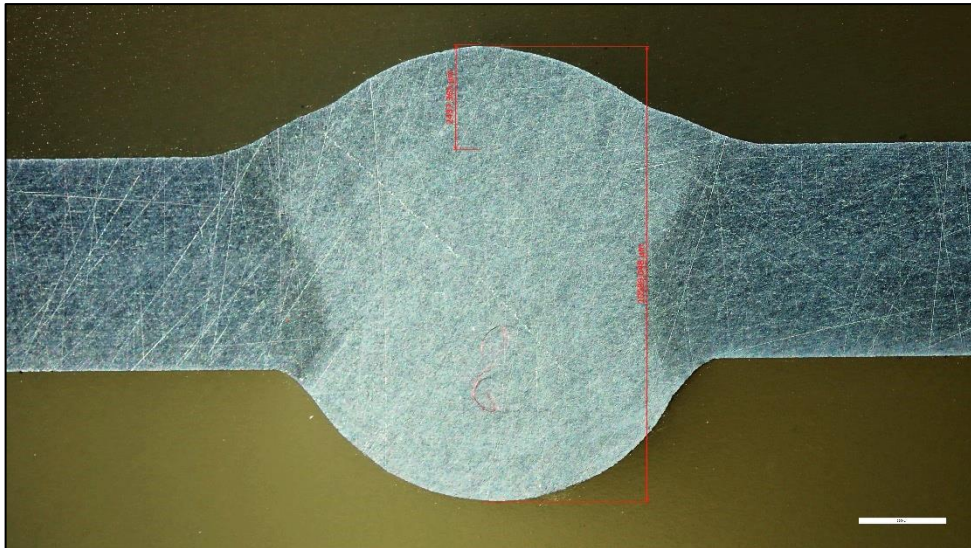
Obr. 25- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 5087.



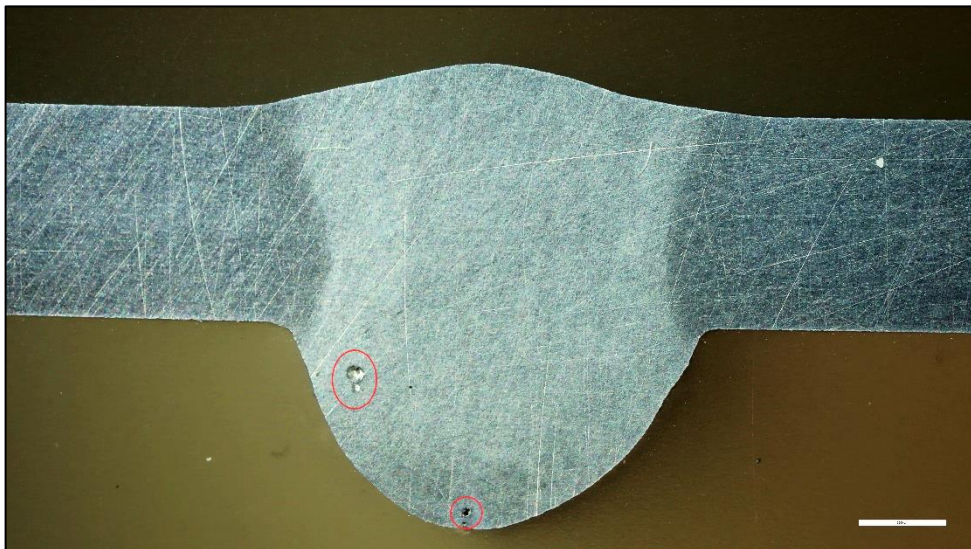
Obr. 26- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 5183.



Obr. 27- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 5356



Obr. 28- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 1070



Obr. 29- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 1070- póry ve svarovém kovu.

Důležité je uvést, že u dvou makrostrukturních vzorků byly objeveny póry ve svarovém kovu, viz obr. 29. Tyto vady se objevily u přídatných materiálů OK Autrod 1070 a OK Autrod 5087. [24]

6.2 Měření tvrdosti

Další důležitou částí experimentu byla zkouška tvrdosti podle Vickerse dle normy ČSN EN ISO 9015-1, při které byl zkoumán průběh tvrdosti na metalografických výbrusech. Měření probíhalo na zařízení Buehler IndentaMet 1104 – Vickers. Princip měření spočívá ve vnikání indentoru ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu do materiálu definovaným zatížením a následnému odečtu délky úhlopříček po odlehčení. Způsob značení a následný přepočet na výslednou tvrdost lze nalézt níže.

Značení tvrdosti dle Vickerse

68 HV 1/20

- 68- hodnota tvrdosti
- HV-označení tvrdosti
- 1- přibližná hodnota zatížení v kgp
- 20- doba zkušebního zatížení, uvádí se, pokud není v rozsahu 10-15 s

Zjednodušený výpočet hodnoty tvrdosti:

$$\textit{Tvrdost podle Vickerse} = 0,1891x \frac{F}{d^2}$$

Kde:

- F-hodnota zkušebního zatížení [N]
- d – aritmetický průměr délek dvou úhlopříček [mm]

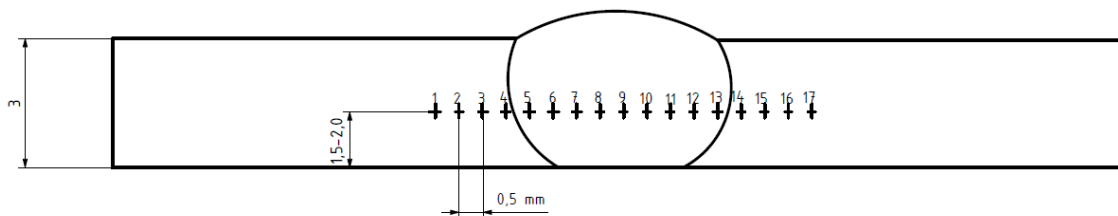
Měření v našem případě bylo provádění zatížením odpovídající tvrdosti HV 1 a doba zatěžování byla 12 s.



Obr. 30- Univerzální tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104.

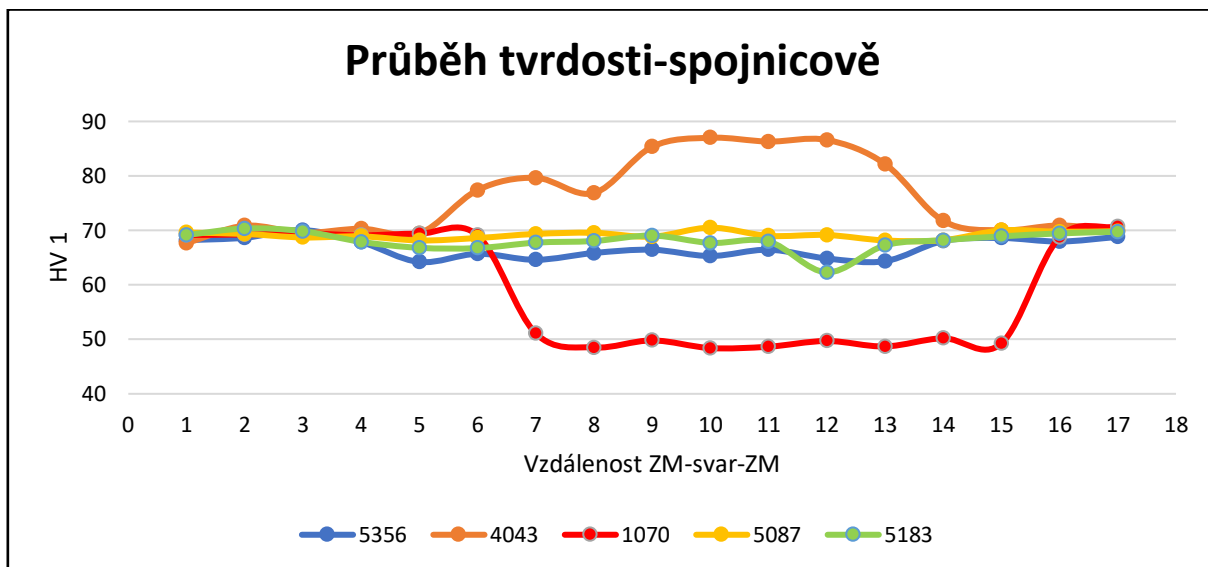
Měření probíhalo vždy na dvou vzorcích od každého přídavného materiálu. Pro porovnatelnost jednotlivých vzorků a pro vykreslení průběhu tvrdosti přes svarový spoj bylo přistoupeno k měření v linii s pravidelnými rozestupy 0,5 mm.

Vtisky tak jednoznačně obsahly jak základní materiál, TOO tak i svarový kov.



Obr. 31- Umístění vtisků tvrdosti na metalografickém výbrusu.

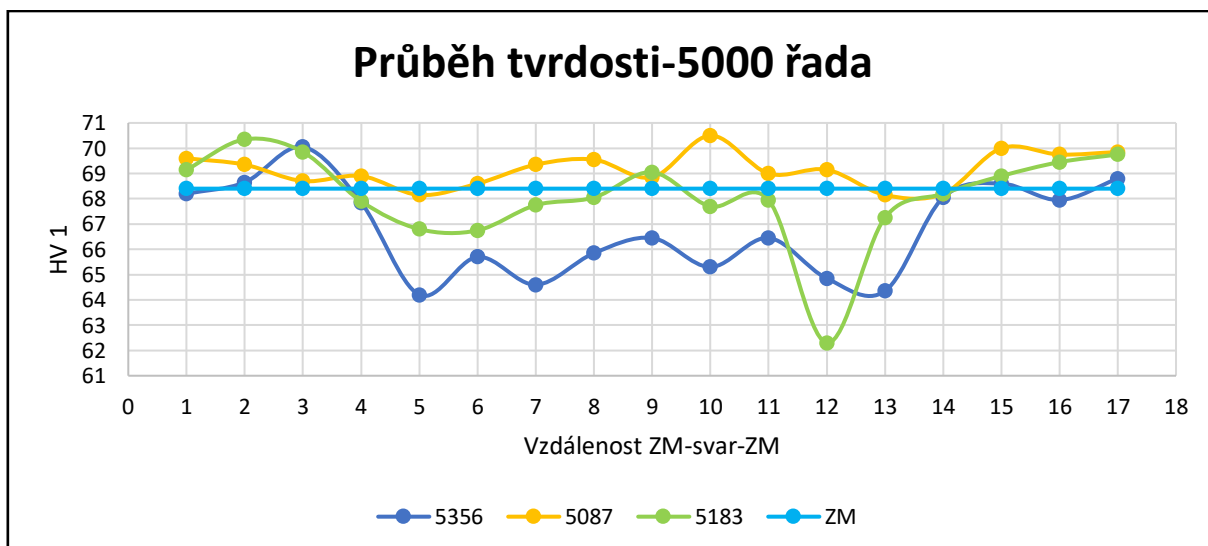
Naměřené hodnoty mikrotvrdosti byly vyhodnoceny pomocí aritmetického průměru měření dvou vzorků v každé pozici. Průměrná odchylka všech měření statistického souboru činila 1,5 %. Maximální odchylka pak 9,7 %, a to se vyskytlo pouze v jednom případě, příčinou mohl být chybný odečet na zařízení.



Obr. 32- Grafická závislost hodnot tvrdosti na vzdálenosti ZM-svar-ZM.

Na grafu výše lze vidět závislost mikrotvrdosti HV 1 na pozici viz obr. 32. Je zde výrazný pokles tvrdosti v oblasti TOO a ve svarovém kovu při použití přídavného materiálu OK Autrod 1070 a naopak výrazný nárůst tvrdosti s přídavným materiálem na bázi křemíku-OK Autrod 4043. Oba tyto jevy byly předpokládány a jsou v souladu s teoretickými předpoklady.

Zajímavý je i pohled na průběh tvrdosti při použití materiálů z pětitisícové řady viz graf níže.

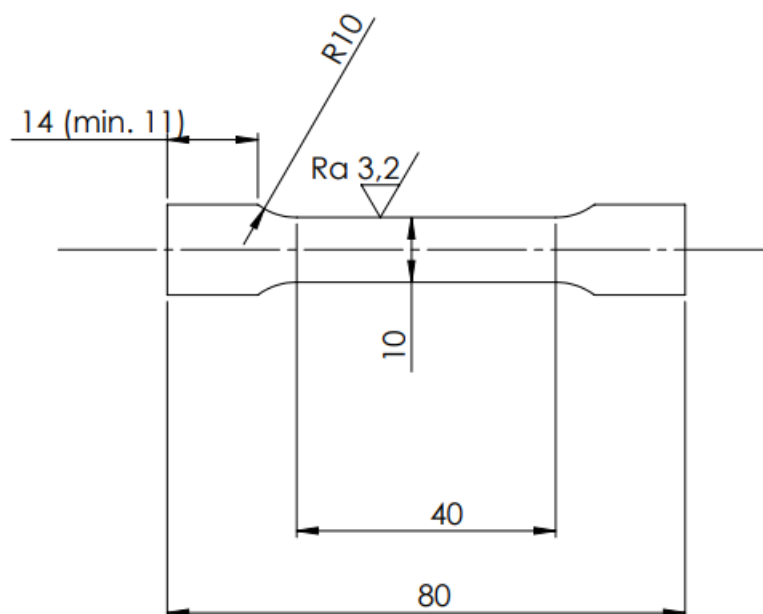


Obr. 33- Grafická závislost tvrdosti na vzdálenosti ZM-svar-ZM 2.

Pro lepší ilustraci je na tomto grafu vynesena i tvrdost základního materiálu, která byla naměřena na metalografických výbrusech mimo okolí, které mohlo být ovlivněné procesem svařování. Tato mikrotvrdost byla vypočítána jako průměrná hodnota z pěti měření (68,4 HV 1). Výborných vlastností, co se týče tvrdosti, čili nezaznamenání poklesu či výrazného nárůstu, bylo dosaženo při svařování PM OK Autrod 5087. Naopak výrazný pokles tvrdosti byl zaznamenán u PM OK Autrod 5356 v prakticky v celé oblasti zahrnující svarový kov i TOO, tento pokles činil v průměru přibližně 4,5 % ve vztahu k základnímu materiálu. Lze rovněž vidět i pokles na pozici 12 (okraj svarového kovu) u PM OK Autrod 5183, jelikož je ale tento pokles pouze na jedné straně svaru, nelze z toho vyvozovat nějaké důležité a předmětné závěry. [23]

6.3 Zkouška tahem

V neposlední řadě bylo nezbytné provést zkoušku tahem dle normy ČSN EN ISO 5178, při které byly zjišťovány mechanické vlastnosti jako je tažnost, mez pevnosti v tahu či další koeficienty, které umožňuje systém vyhodnocení Aramis metodou DIC. Této zkoušce byly podrobeny vždy 3 vzorky od každého přídavného materiálu. Zároveň byly odzkoušeny tři vzorky bez svarového spoje, z důvodu ověření mechanických vlastností základního materiálu. Vzorky byly připraveny dle nákresu viz obr.34 a to z důvodu využití systému Aramis.



Obr. 34- Vzorek určený pro zkoušku tahem.

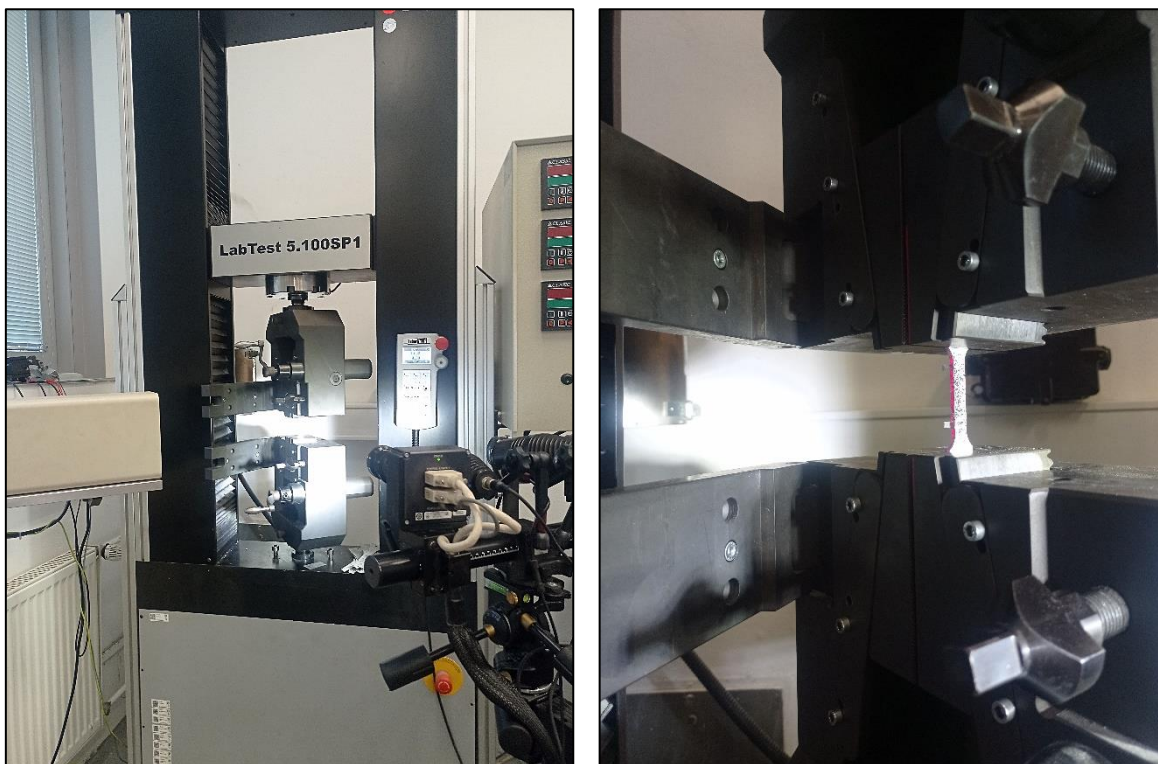


Obr. 35- Hrubé dělení svařených vzorků pro obrobení do požadovaného tvaru.

Zkouška tahem byla realizována v Laboratoři mechanických zkoušek na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze. Probíhala na trhacím zařízení LabTest 5.100SP1 a jak už bylo zmíněno, byl využit software Aramis, který po nanesení speciálního povlaku na povrch vzorku umožňoval analýzu deformací a následné vyhodnocení koeficientů jako je například součinitel plastické deformace a jiné. Nanesení probíhalo ve dvou krocích, nejdříve aplikace základové bílé barvy a následný nástřik barvy s granitovým efektem pro vytvoření rastru viz obr. 36.



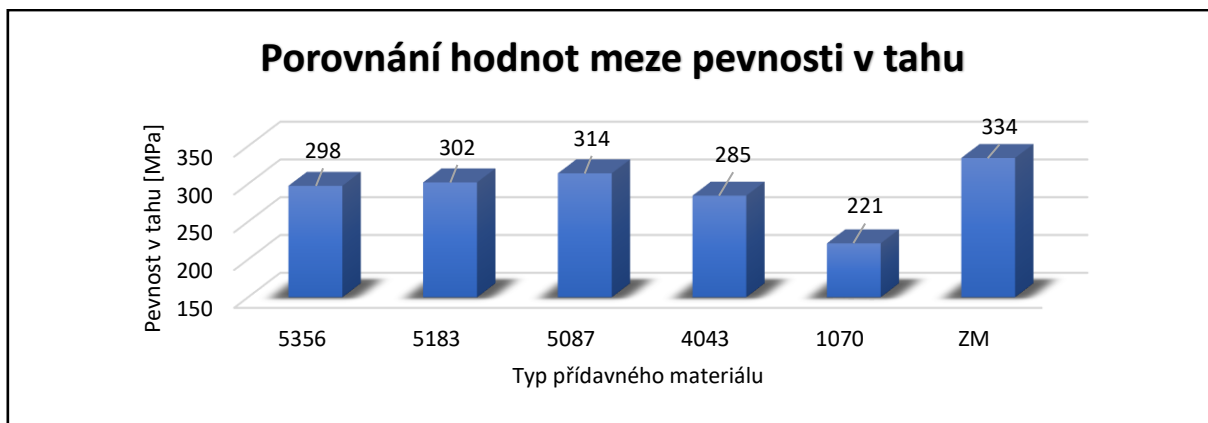
Obr. 36- Aplikace speciálního rastrového povlaku na zkušební vzorky.



Obr. 37- Zkušební zařízení LabTest a upnutí vzorku mezi čelisti.

Zatěžování probíhalo rychlostí 2 mm/min a zkouška probíhala do přetržení vzorku. Snímání prodloužení nezbytné pro výpočet hodnot tažnosti bylo realizováno pomocí optické kamery a reflexních pásků umístěných na vzorcích.

Celkové vyhodnocení probíhalo jako porovnání hodnot mechanických vlastností v závislosti na typu přídavného materiálu a rovněž i vzhledem k základnímu materiálu. Důležité je zmínit, že u všech zkoumaných vzorků došlo dle předpokladu k přetržení v místě svarového spoje.



Obr. 38- Grafické porovnání hodnot meze pevnosti v tahu.

Mezi základní vyhodnocení, i v návaznosti na cíle práce v podobě upřesnění výpočtových pevnostních koeficientů pro návrh svarových spojů hliníkových slitin, byla analýza změny resp. poklesu meze pevnosti svarových spojů vzhledem k základnímu materiálu.

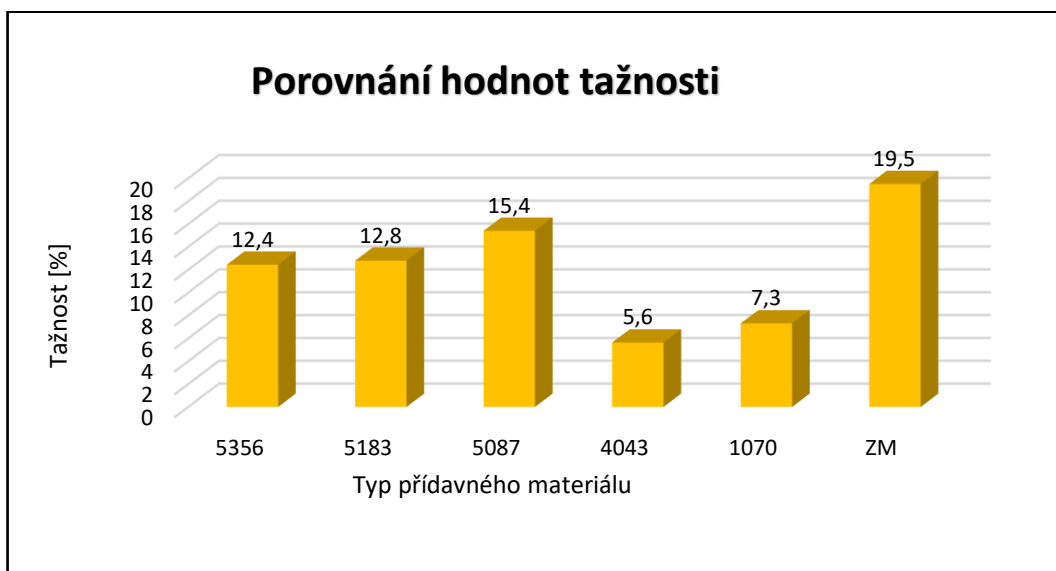
Základní materiál bez svarového kovu dosáhl hodnoty $R_m = 334$ MPa. K očekávanému poklesu tedy došlo u všech vzorků s různými přídavnými materiály. Dle teoretických předpokladů došlo k největšímu poklesu při použití PM na bázi čistého hliníku (OK Autrod 1070), pokles činil takřka 34 %. Nicméně hodnota meze pevnosti samotného přídavného materiálu je téměř totožná s hodnotou svarového spoje s tímto svařovacím drátem. Naopak k nejmenšímu poklesu meze pevnosti v tahu došlo u vzorků svařovaných PM OK Autrod 5087. Zde činil pokles pouhých 6 %. Z naměřených dat (tabulka č. 8) lze vidět velmi výrazný pokles meze pevnosti svarových spojů oproti mezi pevnosti samotných přídavných materiálů pětitisícové řady.

Tabulka 8.-Tabulka poklesu meze pevnosti tahu v závislosti na přídavném materiálu.

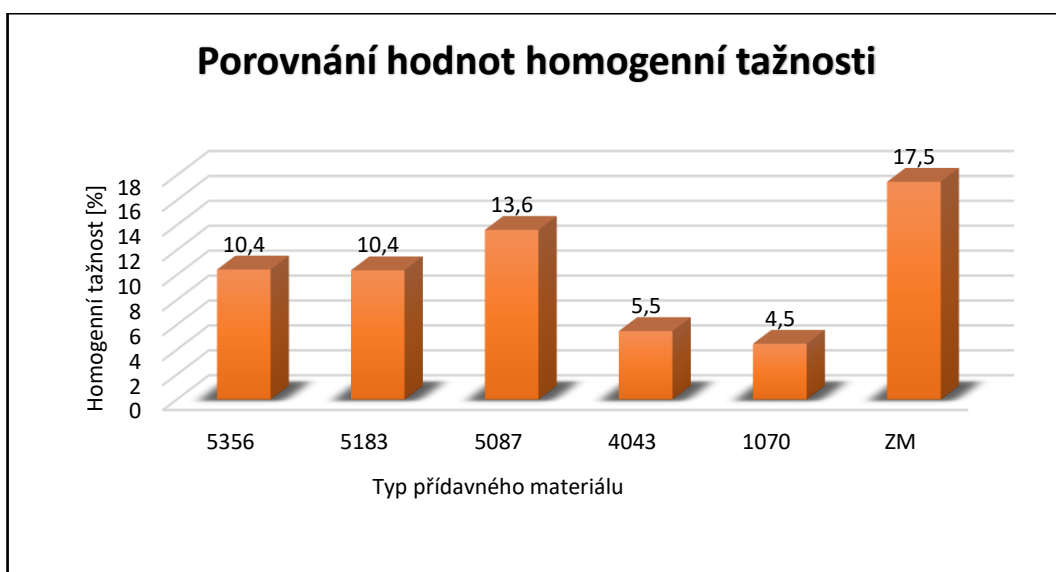
Typ PM	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti ZM [MPa]	Procentuální pokles	Teoretický koeficient α
OK Autrod 5356	298	334	11,0%	0,892
OK Autrod 5183	302		9,7%	0,904
OK Autrod 5087	314		6,1%	0,940
OK Autrod 4043	285		14,9%	0,852
OK Autrod 1070	221		33,8%	0,662

Teoretický výpočtový koeficient, vycházející z tohoto experimentu, který udává míru poklesu meze pevnosti ZM oproti svarovému spoji lze pro každý PM nalézt v tabulce č. 8.

Jako další analyzovaná vlastnost bylo stanovení hodnoty tažnosti (A)-trvalé prodloužení měřené délky po lomu, a homogenní tažnosti (A_{gt}), která je dle normy ČSN EN ISO 6892- 1 definována jako plastické prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení.

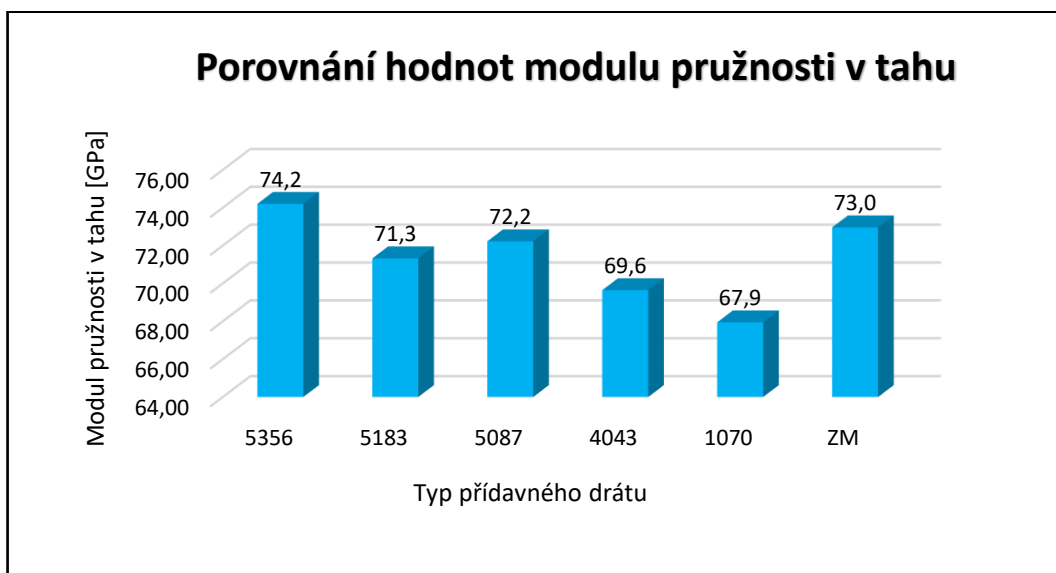


Obr. 39- Grafické znázornění změny tažnosti v závislosti na přídatném materiálu.



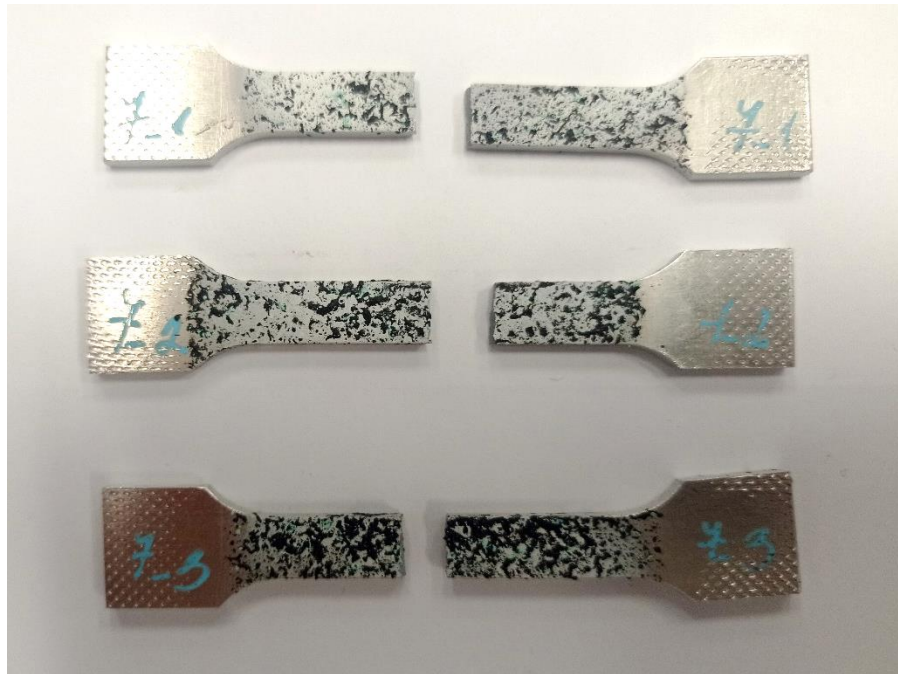
Obr. 40- Grafické znázornění změny homogenní tažnosti v závislosti na přídatném materiálu.

Z výše představených grafů (obr. 39 a obr. 40) lze vidět, že je zde poměrně značný pokles hodnot tažností vzhledem k základnímu materiálu, což může v určitých aplikacích být poměrně značný problém a je třeba ho reflektovat. Zajímavý je i pokles u přídavných materiálů OK Autrod 5356 a 5183 oproti PM OK Autrod 5087. Hodnoty tažností u základního materiálu pak korelují s hodnotami zaručenými od dodavatele základního polotovaru.

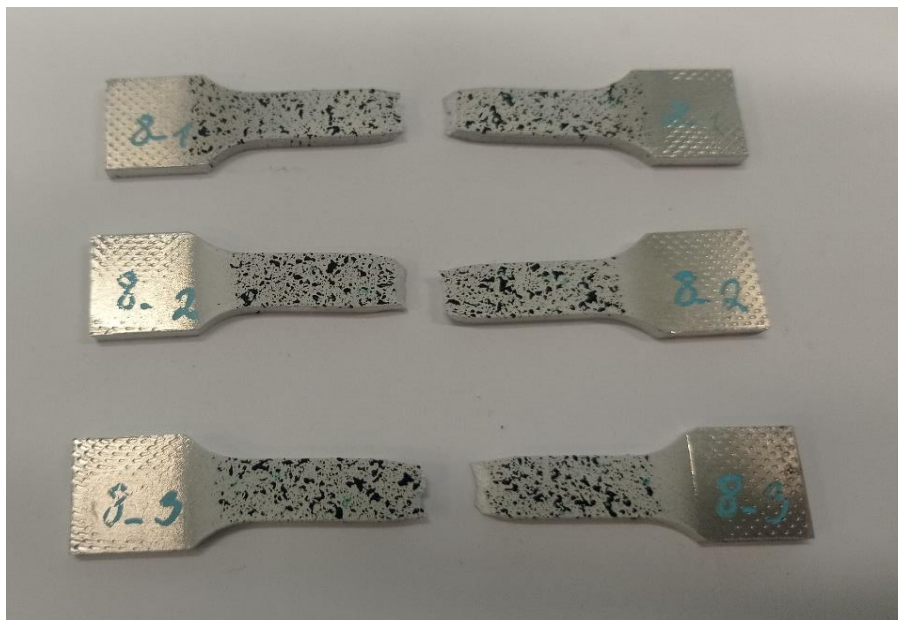


Obr. 41- Grafické znázornění modulu pružnosti na přídavném materiálu.

Dalším vyhodnocovaným parametrem byl modul pružnosti v tahu, který je velmi přibližně udáván pro hliníkové slitiny okolo 70 GPa. Na podkladě tohoto měření nám vyšla hodnota pro základní materiál, čili slitinu EN AW 5083, 73 GPa. Ostatní hodnoty pro svarové spoje s danými přídavnými materiály lze nalézt na obr. 41. [25]



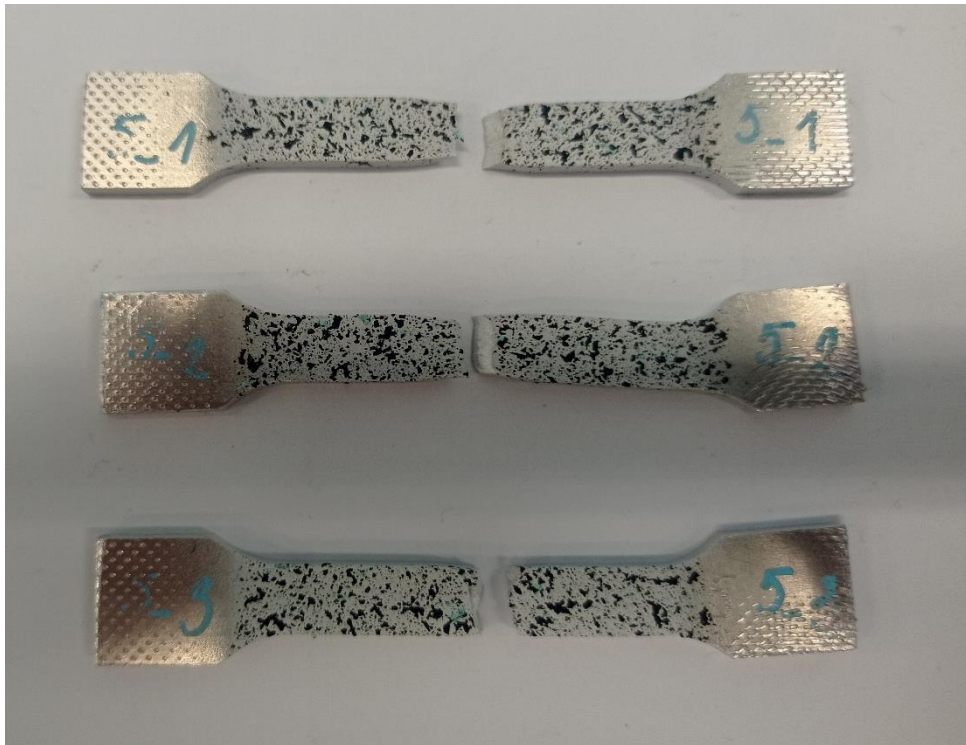
Obr. 42- Vzorok po zkoušce tahem- OK Autrod 4043.



Obr. 43- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 1070.



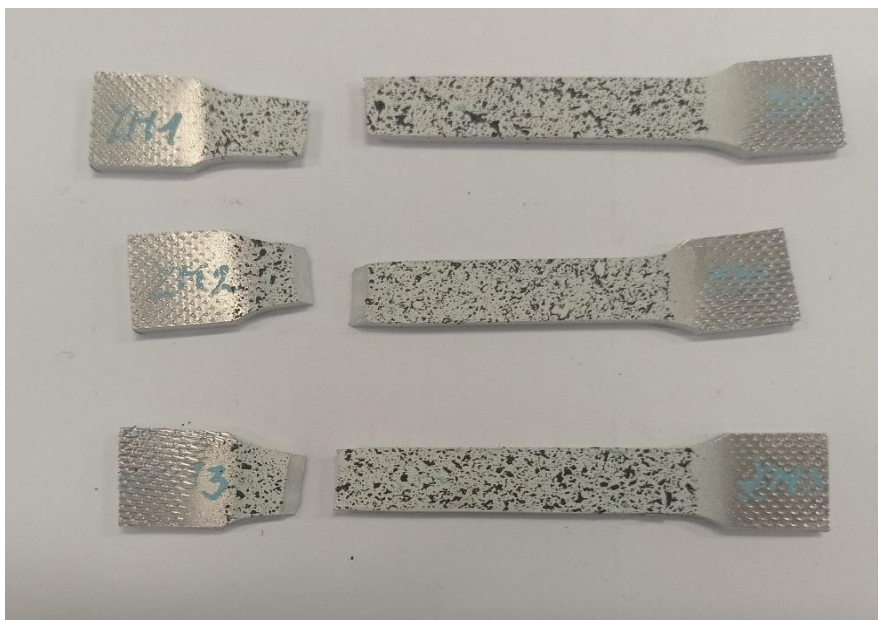
Obr. 44- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 5183



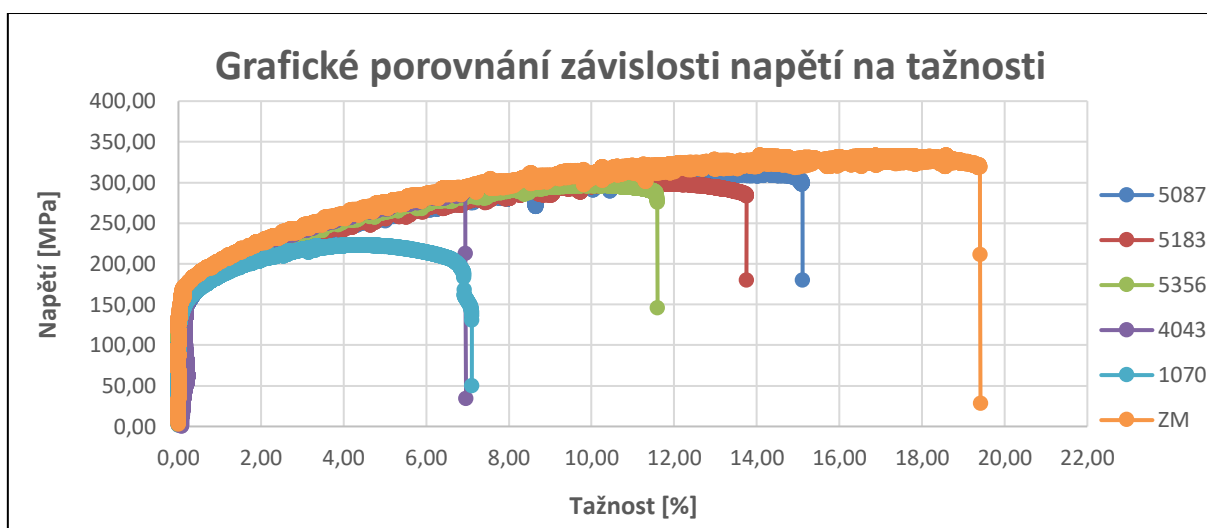
Obr. 45- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 5356.



Obr. 46- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 5087.



Obr. 47- Vzorek po zkoušce tahem-základní materiál.

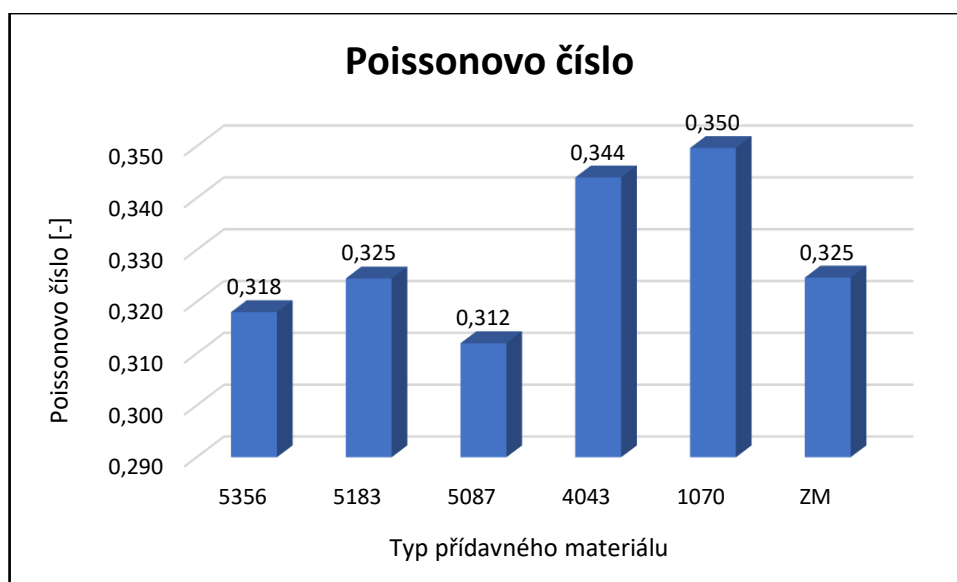


Obr. 48- Grafické porovnání ze zkoušky tahem jednotlivých vzorků.

Na obr. 48, resp. na grafickém znázornění, lze vidět porovnání jednotlivých křivek závislosti napětí na tažnosti až do přetržení. Tento typ grafu, který není normalizovaným diagramem, byl zvolen z důvodu lepší prezentace naměřených dat. Toto znázornění je pro lepší představu a srovnání oproti základnímu materiálu. Průběhy zkoušky tahem vygenerované softwarem lze nalézt v příloze této práce.

System Aramis umožňuje vyhodnocení i některých koeficientů, které jsou velmi zajímavé pro porovnání plastických/elastických vlastností materiálů. Jedná se o koeficienty jako je součinitel plastické anizotropie, Poissonovo číslo a exponent deformačního zpevnění. Tyto parametry jsou velmi dobře uchopitelné zejména ve vztahu k technologii tváření popř. pro použití při numerických simulacích.

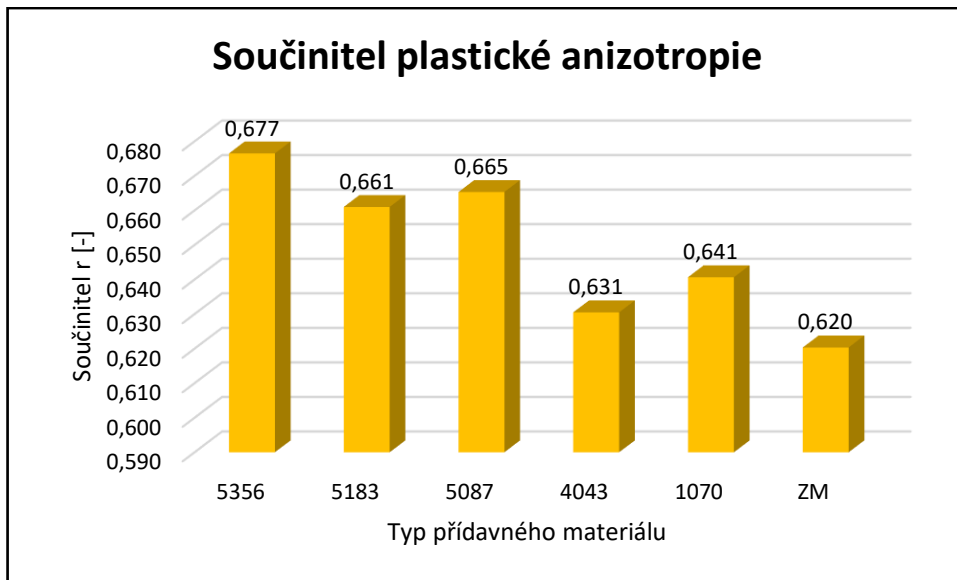
Poissonovo číslo μ je převrácenou hodnotou Poissonovy konstanty a nabývá obvykle hodnot u kovů v rozmezí 0-0,5. V principu značí poměr relativního prodloužení v podélné ose vzhledem k příčnému zúžení při namáhání tahem.



Obr. 49- Grafické porovnání hodnot Poissonova čísla.

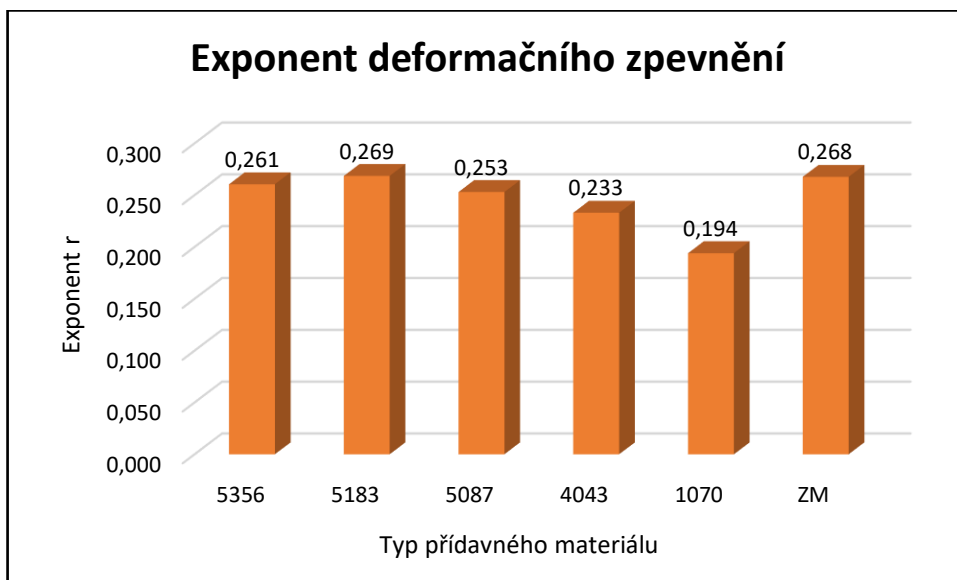
Hodnota základního materiálu činila 0,325 a dle výsledků je zřetelný velký rozdíl při použití přídatných materiálů OK Autrod 1070 a 4043, kde je tento poměr výrazně vyšší než v případě PM pětitisícové řady.

Dalším parametrem je součinitel plastické anizotropie, který je definován jako poměr skutečné plastické deformace šířky ke skutečné deformaci tloušťky zkušební tělesa. Tento parametr se značí r , a je jedním z významných ukazatelů tvařitelnosti. Zde je v kontextu dalších výsledků poměrně značný výkyv hodnot při použití přídatných materiálů pětitisícové řady vzhledem k ZM. Nárůst koeficientu je v rozmezí cca 0,04-0,05.



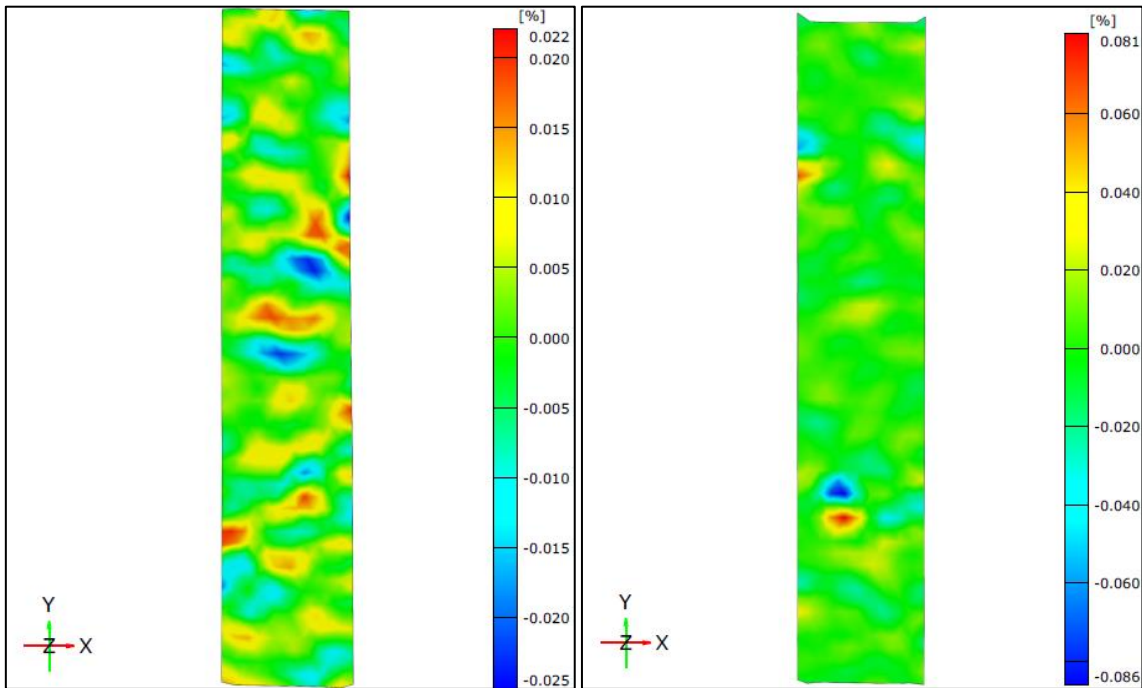
Obr. 50- Grafické porovnání hodnot součinitele plastické anizotropie.

Jako poslední parametr byl hodnocen exponent deformačního zpevnění. Ten opět slouží především k hodnocení tvařitelnosti daného materiálu a vzhledem k cílům experimentu má spíše doplňkový charakter. Význam pak může být zejména hodnota základního materiálu EN AW 5083, která činila 0,268.

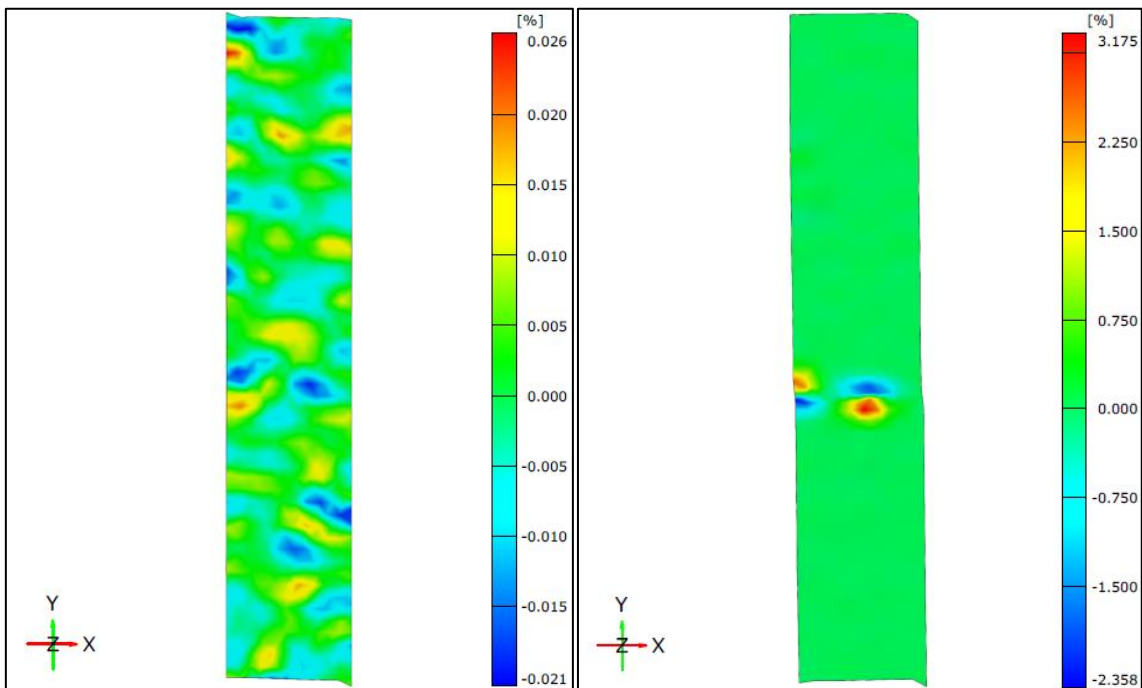


Obr. 51- Grafické porovnání hodnot exponentu deformačního zpevnění.

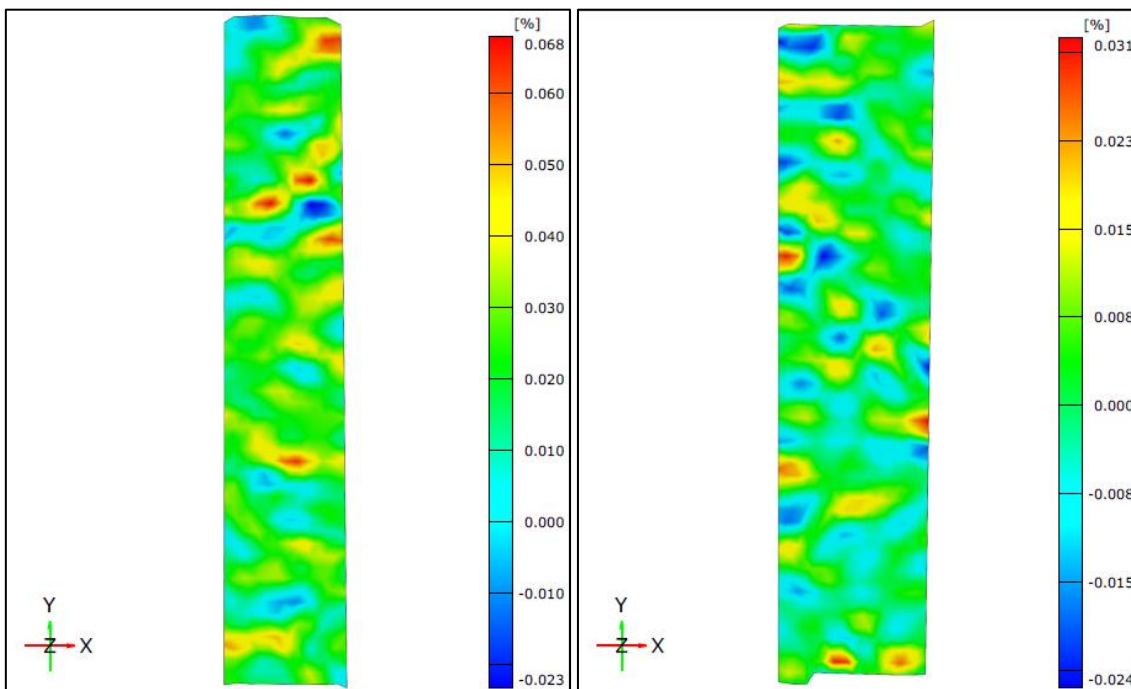
Na následujících snímcích (obr. 52 až obr. 54) lze vidět poměrné deformace v průběhu zkoušky tahem pro jednotlivé vzorky a snímky ze systému Aramis. [27]



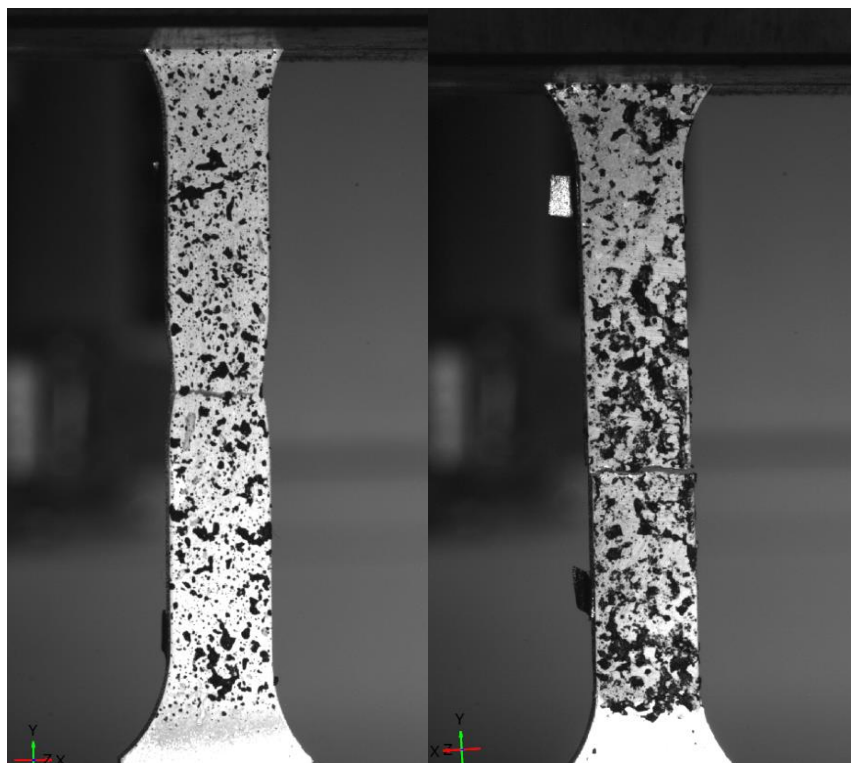
Obr. 52- Porovnání deformací během zkoušky tahem- OK Autrod 5087 vs. OK Autrod 5183



Obr. 53- Porovnání deformací během zkoušky tahem- OK Autrod 5356 vs. OK Autrod 4043



Obr. 54- Porovnání deformací během zkoušky tahem-OK Autrod 1070 vs. základní materiál



Obr. 55- Snímky ze systému Aramis v momentu přetržení zkušebního tělesa.

7. Závěr

V experimentální části byly potvrzeny předpoklady a cíle, které byly vytyčeny v úvodu práce, a to zejména ověření svažitelnosti hliníkových nevytvrditelných slitin metodou MIG realizované na slitině EN AW 5083, zpracování vzorků ke svařování, následné svaření a analýza jejich mechanických vlastností. Byl potvrzen vliv přídavného materiálu na změnu mechanických vlastností v porovnání se základním materiálem. V návaznosti na normu ČSN EN 1011-4 byly zvoleny přídavné materiály doporučené pro svařování slitiny EN AW 5083 z pětistícové řady a i u těchto doporučených materiálů byl zmapován pokles mechanických vlastností, zejména meze pevnosti v tahu a tažnosti. U přídavných materiálů, které byly zvoleny experimentálně (OK Autrod 1070 a OK Autrod 4043) byla předpokládána výraznější změna mechanických vlastností a tyto předpoklady byly rovněž prokázány. V návaznosti na tuto skutečnost lze doporučit pro svařování slitiny EN AW 5083 přídavný drát OK Autrod 5087, při jehož použití byl pozorován nejmenší rozdíl mechanických vlastností ve srovnání se základním materiálem. Jedním z cílů bylo rovněž ověření a upřesnění výpočtových pevnostních koeficientů pro návrh svarových spojů hliníkových nevytvrditelných slitin. V tomto případě lze říci, že teoretické předpoklady pro doporučené přídavné materiály korelují s hodnotami α okolo 0,9. Je nutné vzít ale v potaz například výraznější pokles tažnosti, který tento vztah nereflektuje. Pevně věřím, že tato práce bude přínosná a bude sloužit jako podklad pro další výzkum. V tomto případě by bylo vhodné se zaměřit i na ostatní nevytvrditelné slitiny a ověření těchto závěrů.

Seznam použitých zdrojů

1. MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Peter JURČI a Petr ZUNA. Kovové materiály. 2.vydání. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
2. KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost. 2.vydání. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
3. KOLAŘÍK., Ladislav, a kolektiv. Konstrukce a navrhování svarových spojů: Učební texty pro mezinárodní svářečské inženýry a technology. Praha, 2017.
4. MATHERS, Gene. The welding of aluminium and it's alloys. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002.
5. Handbook of Aluminium. 2. New York: Marcel Dekker. ISBN 9780203912607.
6. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications [online]. Materials Science And Engineering, 2000.
7. Evaluation of EN AW-5083 aluminium alloy homogeneity using statistical analysis of mechanical properties. Journal of Mining and Metallurgy, University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Sisak, Croatia, 2017.
8. MAGLIC, Leon, Dejan MARIC, Tomislav ŠOLIČ a Ivan SAMARDŽIČ. Optimization Of Synchropulzed MIG Welding Parametres for Welding of AW 5083 SheetsProcess. 2022.
9. MECHANICKÉ VLASTNOSTI A STRUKTURA SLITINY HLINÍKU PO TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ [online]. Brno, 2012 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53419.
Bakalářská práce. VUT Brno.
10. KUNCIPÁL, Josef. Teorie svařování. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1986.
11. Základní technické informace k prodáváným slitinám [online]. In: . [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>
12. JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
13. Slitiny hliníku [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/>
14. SODOMKA, Jaromír. Hliník a jeho slitiny [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/personal/sodomjar/Hlinik_a_jeho_slitiny.pdf

15. Hliníkové desky EN AW 5083 [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.profimet.cz/cz/hlinik/hlinikove-desky/en-aw-5083>
16. EN AW-5083 0/H11 [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-5083>
17. KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. Nové technologie ve svařování. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984.
18. Technologie svařování a zařízení.: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
19. Metoda svařování MIG/MAG [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere-plynu>
20. PIHL Riina, Improvement of efficiency and quality of aluminium hull welding [online]. Tampere 2012 [cit.2023-04-24].
21. WEMAN, Klas. Welding Processes Handbook. Second edition. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-0-85709-510-7.
22. Příkladné svařovací materiály MIG/MAG-hliníkové dráty. ESAB [online]. [cit. 2023-07-01]. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/search/?category=p%C5%99%C3%ADdavn%C3%A9-sva%C5%99ovac%C3%AD-materi%C3%A1ly-sva%C5%99ovac%C3%AD-dr%C3%A1ty-mig-mag-gmaw-hlin%C3%ADkov%C3%A9-dr%C3%A1t
23. ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály-Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Praha, 2018.
24. ČSN EN ISO 10042. Svařování -Svarové spoje hliníku a jeho slitin zhotovené obloukovým svařováním- Určování stupňů kvality. Praha, 2019.
25. ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály- Zkoušení tahem-Část č.1- Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha, 2019.
26. ČSN EN 1011-4: Svařování -Doporučení pro svařování kovových materiálů- Část 4: Obloukové svařování hliníku a slitin hliníku. Praha, 2002.
27. PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. Tvářitelnost kovových materiálů. Ostrava, 2007.
28. BEZÁK. Zváracie procesy a zariadenia: učebný text pre vyšší zvaračský personál. Bratislava, 2011. ISBN 978-80-89421-01-5.

Seznam obrázků

Obr. 1-Výroba hliníku [5]	11
Obr. 2-Rozdělení slévárenských slitin [9]	13
Obr. 3- Rozdělení tvářených hliníkových slitin [9].....	14
Obr. 4- Příklad dvoufázového – binárního diagramu. [14].....	17
Obr. 5-Stavy krystalických struktur během stárnutí. [14]	18
Obr. 6- Části elektrického oblouku. [18].....	20
Obr. 7-Princip metody svařování MIG [19].....	22
Obr. 8- Průběh impulsního přenosu v závislosti na čase. [28]	24
Obr. 9- Rozpustnost vodíku v závislosti na teplotě [20]	26
Obr. 10- Oblasti tepelného ovlivnění svarového spoje [23].....	27
Obr. 11- Průběh poklesu meze pevnosti (vlevo) a smluvní meze pevnosti (vpravo) u vytvrditelné slitiny AlMgSi1. [3].....	27
Obr. 12- Ukázka robota Fanuc a svařovacího přípravku.	30
Obr. 13- Uspořádání robotizovaného pracoviště FS ČVUT.....	31
Obr. 14- Ukázka z měření chemického složení základního materiálu.....	32
Obr. 15- Plechy materiálu EN AW 5083 ve stavu H111 [15]	33
Obr. 16- Upnutí přídatných drátů do speciálních kladkových čelistí.	35
Obr. 17.- Ukázka ze záznamu pracovního diagramu zkoušky tahem – PM OK Autrod 5183...35	
Obr. 18- Ukázka ze záznamu pracovního diagramu zkoušky tahem- PM OK Autrod 1070	36
Obr. 19- Upnutí základního materiálu pomocí přípravku.	37
Obr. 20- Výsledný vzorek svařeného základního materiálu s vyznačeným směrem svařování.	37
Obr. 21- Průběh proudu a napětí v závislosti na čase při režimu CMT.	38
Obr. 22- Leštění pomocí zařízení Buehler Grinder-Polisher Beta s automatickou hlavou Vector.	39
Obr. 23-Vzorek určený pro analýzu makrostruktury.....	39
Obr. 24- Naměřené charakteristiky při makrostrukturní analýze.	40
Obr. 25- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 5087.	41
Obr. 26- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 5183.	41
Obr. 27- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 5356	41

Obr. 28- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 1070	42
Obr. 29- Makrostrukturní analýza-vzorek OK Autrod 1070- póry ve svarovém kovu.....	42
Obr. 30- Univerzální tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104.....	44
Obr. 31- Umístění vtisků tvrdosti na metalografickém výbrusu.	44
Obr. 32- Grafická závislost hodnot tvrdosti na vzdálenosti ZM-svar-ZM.....	45
Obr. 33- Grafická závislost tvrdosti na vzdálenosti ZM-svar-ZM 2.....	45
Obr. 34- Vzorek určený pro zkoušku tahem.....	46
Obr. 35- Hrubé dělení svařených vzorků pro obrobení do požadovaného tvaru.	47
Obr. 36- Aplikace speciálního rastrového povlaku na zkušební vzorky.	47
Obr. 37- Zkušební zařízení LabTest a upnutí vzorku mezi čelisti.....	48
Obr. 38- Grafické porovnání hodnot meze pevnosti v tahu.....	49
Obr. 39- Grafické znázornění změny tažnosti v závislosti na přídavném materiálu.	50
Obr. 40- Grafické znázornění změny homogenní tažnosti v závislosti na přídavném materiálu.	50
Obr. 41- Grafické znázornění modulu pružnosti na přídavném materiálu.	51
Obr. 42- Vzorky po zkoušce tahem- OK Autrod 4043.	52
Obr. 43- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 1070.	52
Obr. 44- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 5183	53
Obr. 45- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 5356.	54
Obr. 46- Vzorek po zkoušce tahem-OK Autrod 5087.	54
Obr. 47- Vzorek po zkoušce tahem-základní materiál.	55
Obr. 48- Grafické porovnání ze zkoušky tahem jednotlivých vzorků.....	55
Obr. 49- Grafické porovnání hodnot Poissonova čísla.	56
Obr. 50- Grafické porovnání hodnot součinitele plastické anizotropie.	57
Obr. 51- Grafické porovnání hodnot exponentu deformačního zpevnění.....	57
Obr. 52- Porovnání deformací během zkoušky tahem- OK Autrod 5087 vs. OK Autrod 5183	58
Obr. 53- Porovnání deformací během zkoušky tahem- OK Autrod 5356 vs. OK Autrod 4043	58
Obr. 54- Porovnání deformací během zkoušky tahem-OK Autrod 1070 vs. základní materiál	59
Obr. 55- Snímky ze systému Aramis v momentu přetržení zkušební tělesa.	59

Seznam tabulek

Tabulka 1.-Vybrané vlastnosti hliníku.	12
Tabulka 2.-Tabulka číselného značení slévárenských slitin dle ČSN EN 573-1-3. [3]	14
Tabulka 3.-.-Tabulka číselného označení tvářených hliníkových slitin dle ČSN EN 573-1-3. [3]	15
Tabulka 4.-Typické stavy tepelného zpracování hliníkových slitin.....	18
Tabulka 5.-Chemické složení slitiny EN AW 5083.....	32
Tabulka 6.-Zvolené typy přídatných materiálů a jejich chemické složení. [22]	33
Tabulka 7.-Naměřené mechanické vlastnosti jednotlivých typů přídatných drátů.....	34
Tabulka 8.-Tabulka poklesu meze pevnosti tahu v závislosti na přídatném materiálu.	49

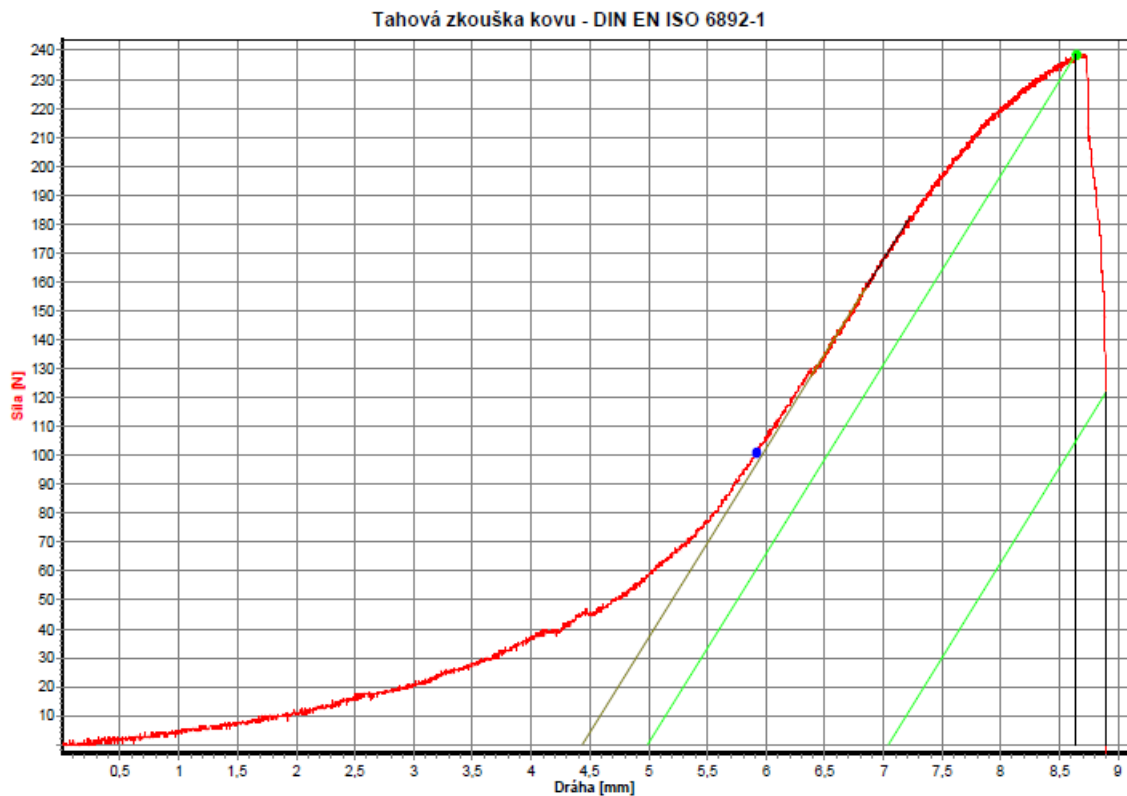
Přílohy

Příloha 1.-Záznam zkoušky tahem drátu OK Autrod 1070.	67
Příloha 2.-Záznam zkoušky tahem drátu OK Autrod 4043.	68
Příloha 3.-Záznam zkoušky tahem drátu OK Autrod 5087.	69
Příloha 4.- Záznam zkoušky tahem drátu-OK Autrod 5183.	70
Příloha 5.-Záznam Zkoušky tahem drátu-OK Autrod 5356.....	71
Příloha 6.-Záznam zkoušky tahem vzorku základního materiálu.	72
Příloha 7.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 5087.	73
Příloha 8.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 5183.	74
Příloha 9.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 5356.	75
Příloha 10.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 4043.	76
Příloha 11.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 1070.	77

Příloha 1.-Záznam zkoušky tahem drátu OK Autrod 1070.

Zkušební parametry

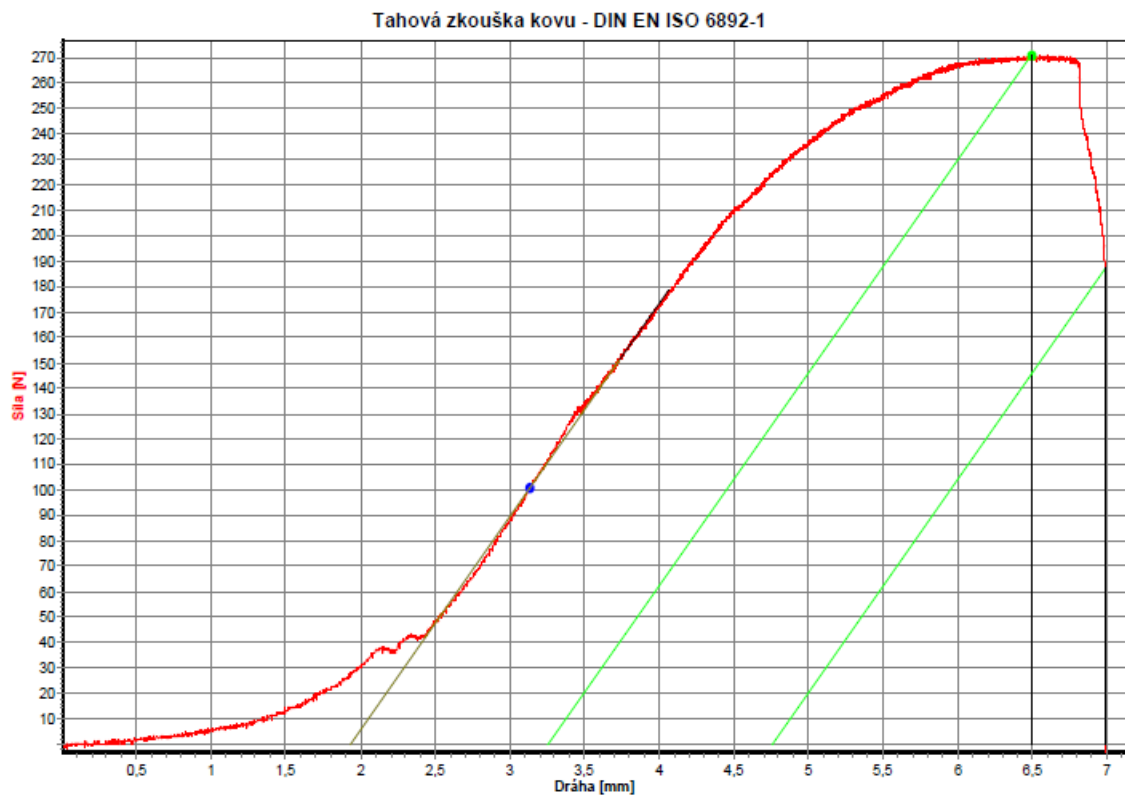
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzometr
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	h = 1 mm; m = 1 g
Zadání délek:	Le = 49,9 mm; Lc = 50 mm; L0 = 100 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 10 mm/min; V1 = 10 mm/min
Přepínací body:	F0 = 100 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 50000 N; dF = 75 %



Příloha 2.-Záznam zkoušky tahem drátu OK Autrod 4043.

Zkušební parametry

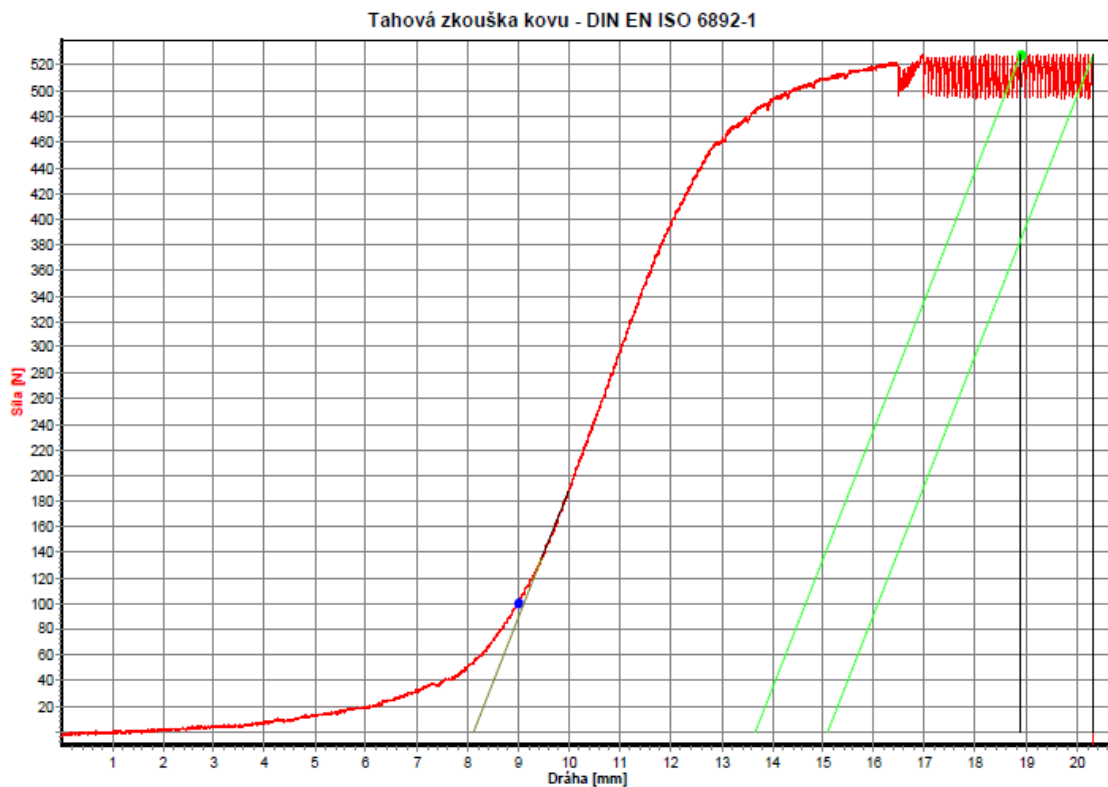
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	h = 1 mm; m = 1 g
Zadáni délek:	Le = 49,9 mm; Lc = 50 mm; L0 = 100 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 10 mm/min; V1 = 10 mm/min
Přepínací body:	F0 = 100 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 50000 N; dF = 75 %



Příloha 3.-Záznam zkoušky tahem drátu OK Autrod 5087.

Zkušební parametry

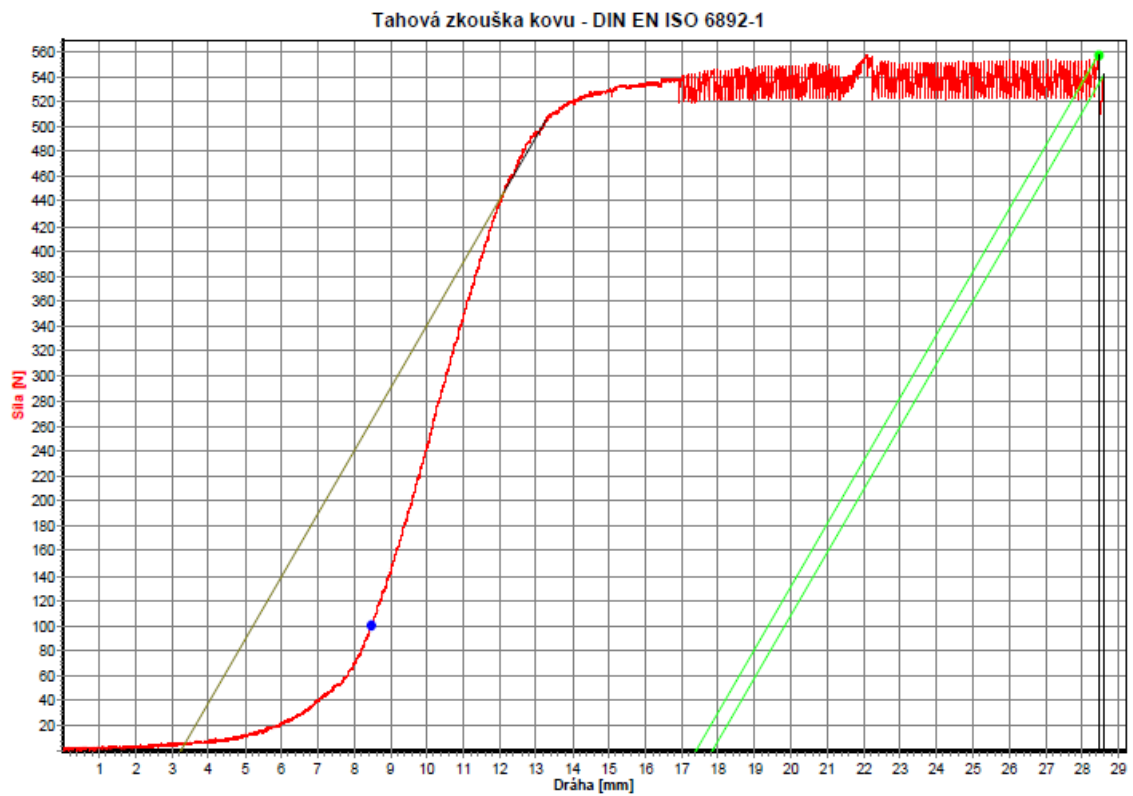
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzometr
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	h = 1 mm; m = 1 g
Zadání délek:	Le = 49,9 mm; Lc = 50 mm; L0 = 100 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 10 mm/min; V1 = 10 mm/min
Přepínací body:	F0 = 100 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 50000 N; dF = 75 %



Příloha 4.- Záznam zkoušky tahem drátu-OK Autrod 5183.

Zkušební parametry

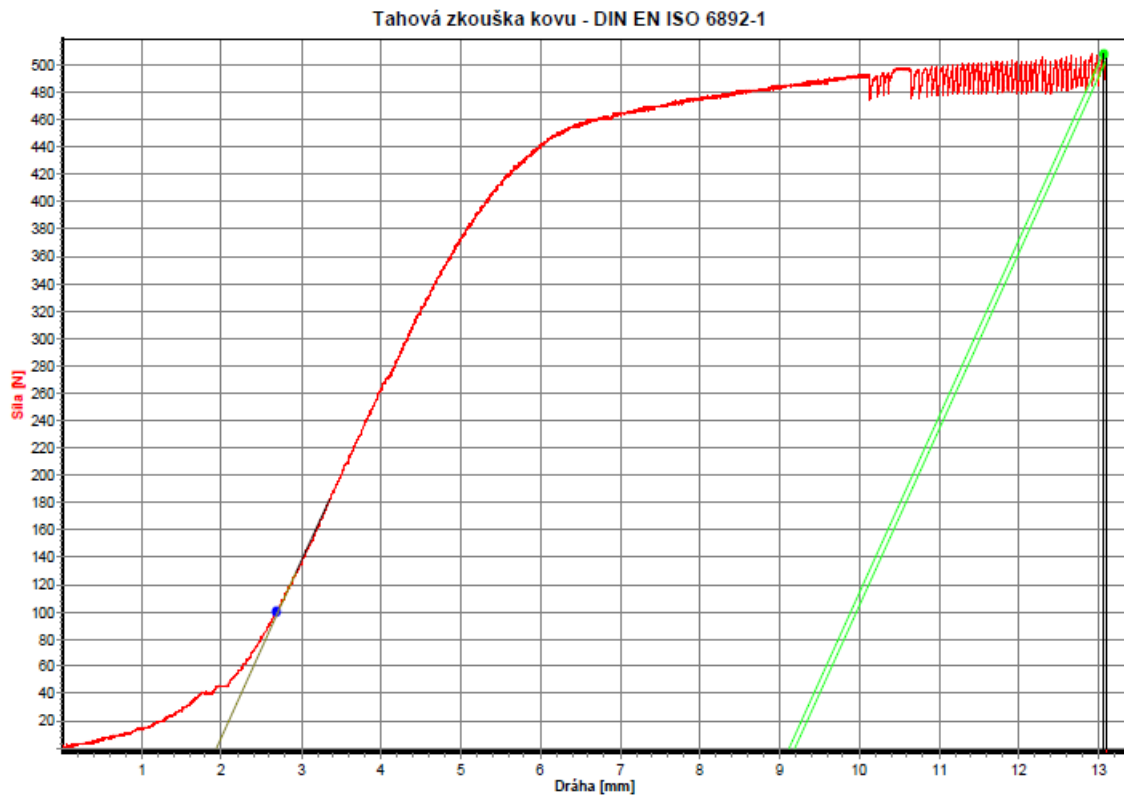
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzometr
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	D = 1,19 mm; h = 1 mm; m = 1 g
Zadáni délek:	Le = 49,9 mm; Lc = 50 mm; L0 = 100 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 5 mm/min; V1 = 5 mm/min
Přepínací body:	F0 = 100 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 50000 N; dF = 75 %



Příloha 5.-Záznam Zkoušky tahem drátu-OK Autrod 5356.

Zkušební parametry

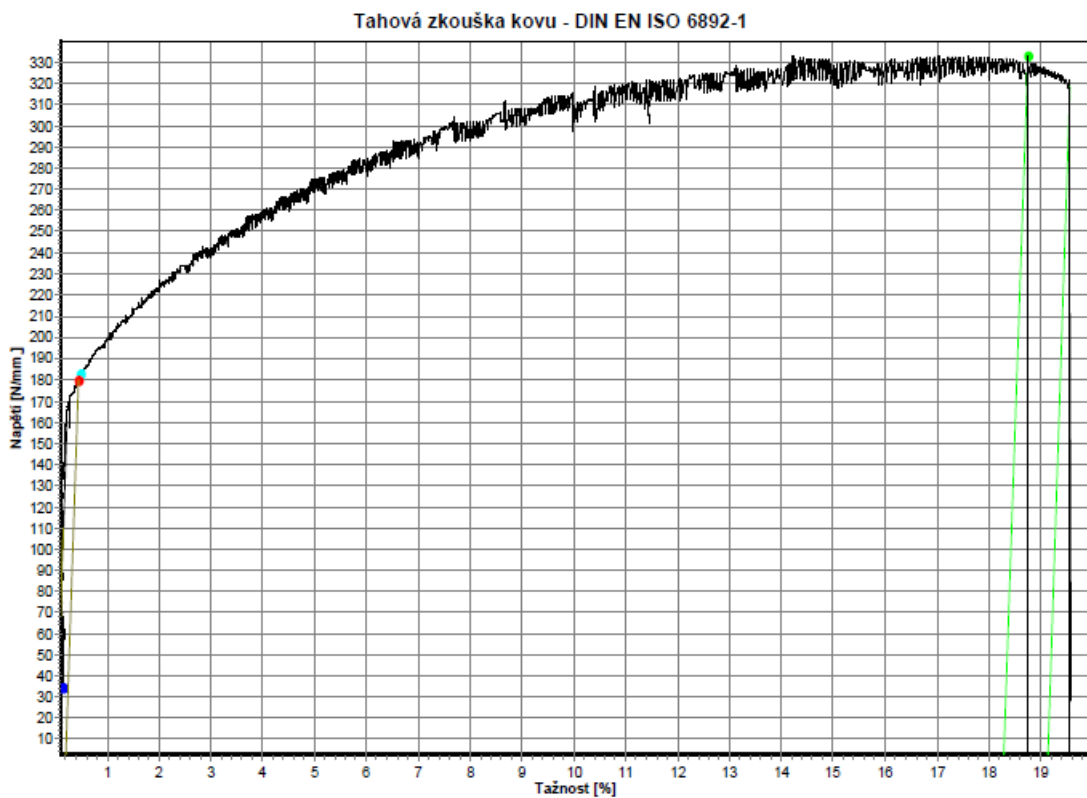
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	h = 1 mm; m = 1 g
Zadání délky:	Le = 49,9 mm; Lc = 50 mm; L0 = 100 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 10 mm/min; V1 = 10 mm/min
Přepínací body:	F0 = 100 N
Kritérium ukončení zkoušky:	Síla = 50000 N; dF = 75 %



Příloha 6.-Záznam zkoušky tahem vzorku základního materiálu.

Zkušební parametry

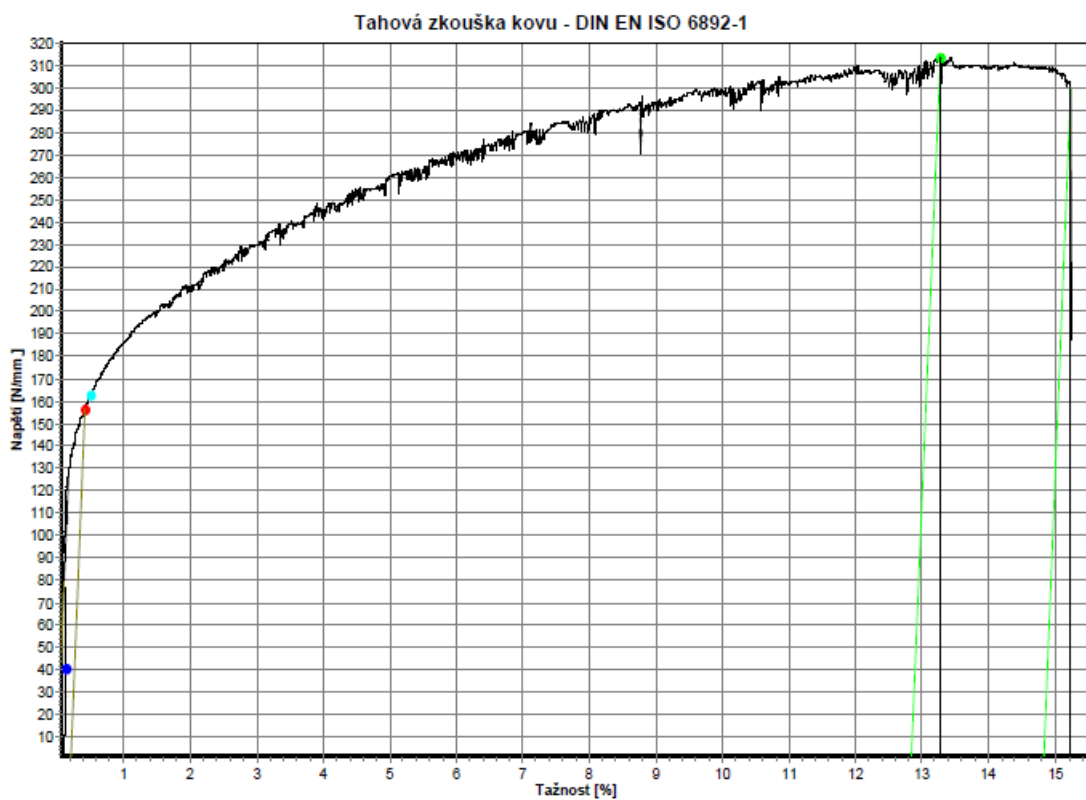
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	
Zadáni délek:	Le = 30,71 mm; Lc = 75 mm; L0 = 60 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 40 %



Příloha 7.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 5087.

Zkušební parametry

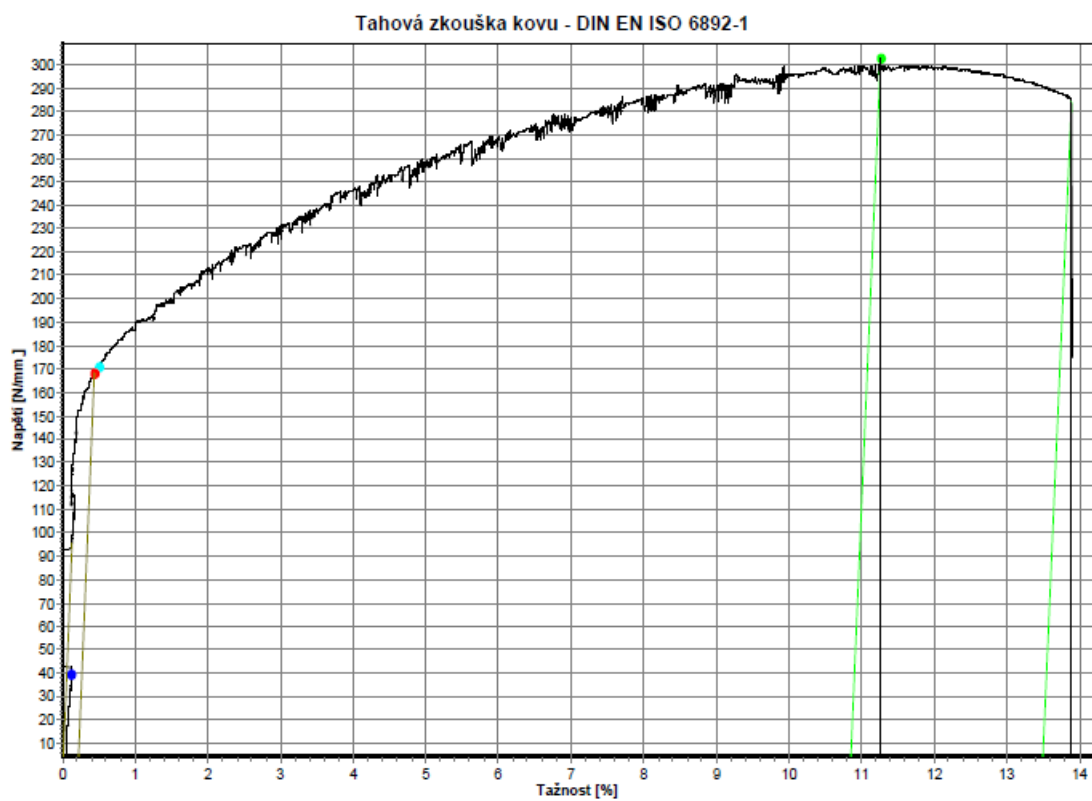
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	
Zadáni délek:	Le = 30,85 mm; Lc = 75 mm; L0 = 60 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 40 %



Příloha 8.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 5183.

Zkušební parametry

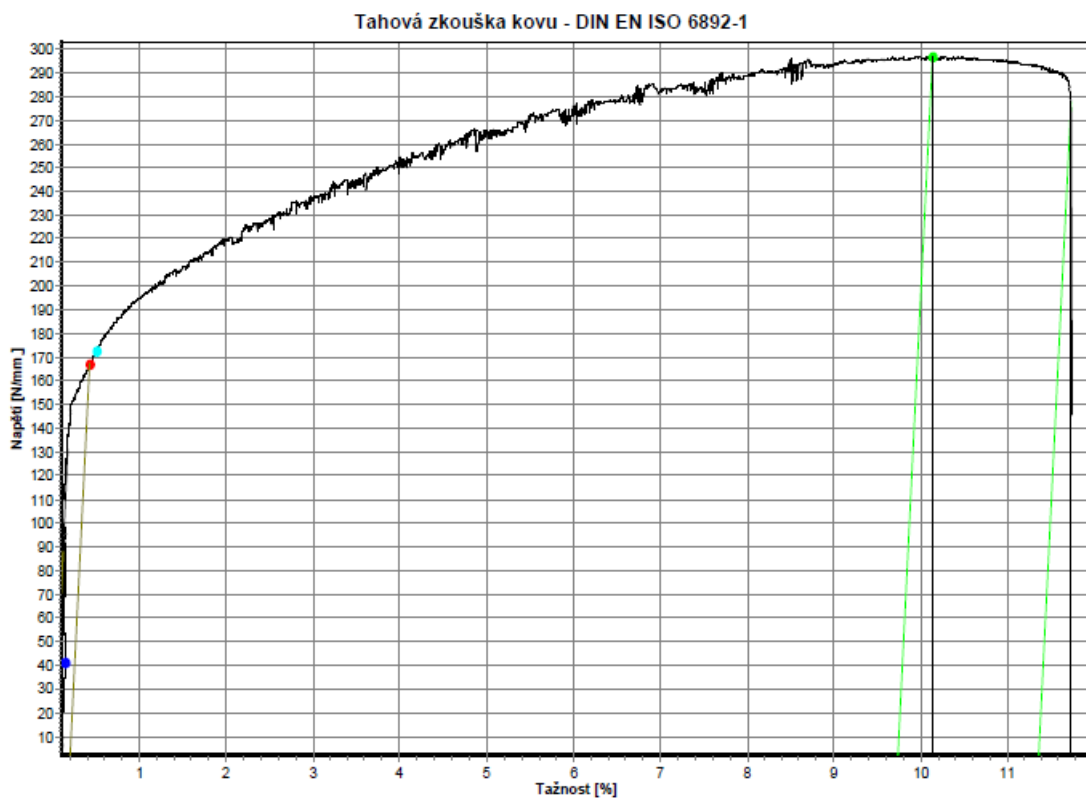
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	
Zadáni délek:	Le = 31,71 mm; Lc = 75 mm; L0 = 60 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 40 %



Příloha 9.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 5356.

Zkušební parametry

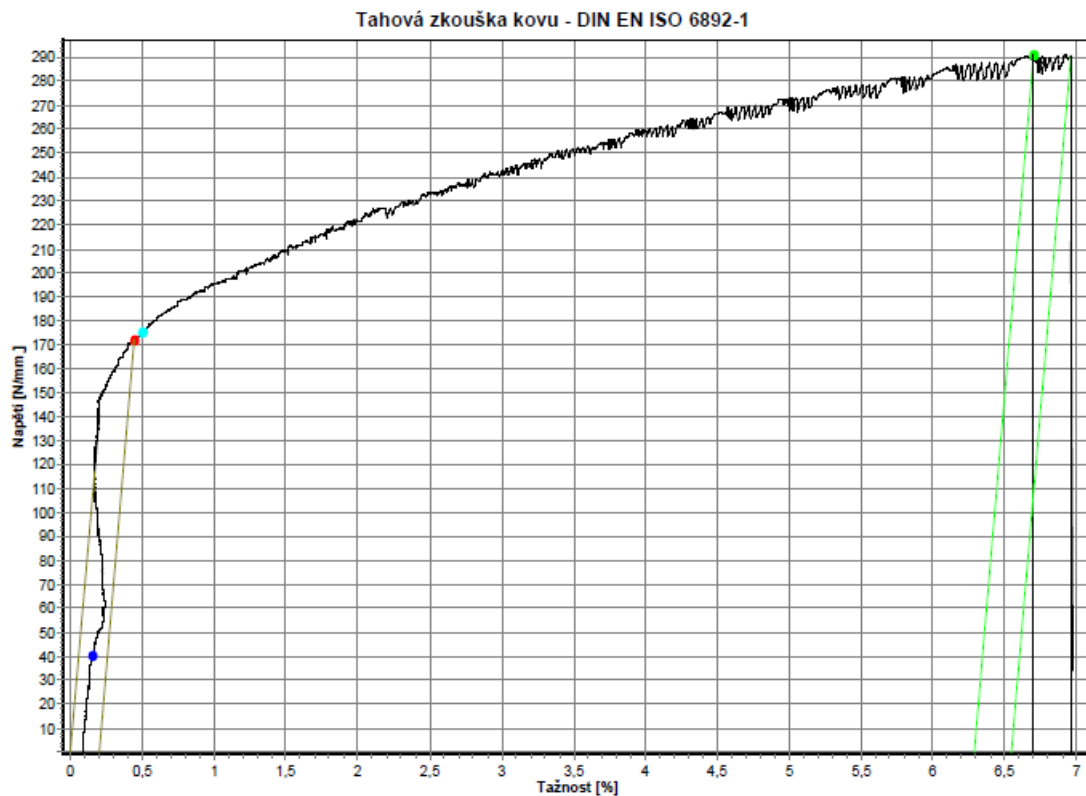
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	
Zadání délek:	Le = 30,3 mm; Lc = 75 mm; L0 = 60 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 40 %



Příloha 10.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 4043.

Zkušební parametry

Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	
Zadáni délek:	Le = 31,35 mm; Lc = 75 mm; L0 = 60 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 40 %



Příloha 11.-Záznam zkoušky tahem vzorku s PM OK Autrod 1070.

Zkušební parametry

Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzometr
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	
Zadáni délek:	Le = 31,62 mm; Lc = 75 mm; L0 = 60 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 40 %

