

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA
KATEDRA DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ
A DIAGNOSTIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Bc. JAN KOPÁČ

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA
KATEDRA DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ A DIAGNOSTIKY

**Studium degradace dynamické pevnosti
svarových spojů opravovaných hliníkových
částí karoserie laserem vs TIG/MIG**

Diplomová práce

2024

Bc. JAN KOPÁČ

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Kopáč**
Osobní číslo: **D22527**
Studijní program: **N0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Provoz a údržba vozidel**
Téma práce: **Studium degradace dynamické pevnosti svarových spojů opravovaných hliníkových částí karosérie laserem vs TIG/MIG**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

Teorie:

1. Al slitiny používané v konstrukci karosérie automobilu a jejich způsob upevnění.
2. Možnosti oprav hliníkových karosérií.
3. Studium vybrané Al slitiny a zhodnocení vhodnosti k svařitelnosti.
4. Popis vybraných svařovacích metod.
5. Statická vs dynamická instrumentovaná tahová zkouška.

Experiment:

1. Příprava vzorků pro tahové zkoušky.
2. Vyhodnocení dat ze statické tahové a dynamické tahové zkoušky.
3. Vyhodnocení získaných informací o jednotlivých metodách svařování k vhodnosti dané aplikace.

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] BALAZS, L., GIJBELS, R., VERTES, A.: Expansion of laser-generated plumes near the plasma ignition threshold. *Analytical Chemistry* 63, 314–320, 1991.
- [2] STAFE, M., NEGUTU, C., POPESCU, I.M.: Theoretical determination of the ablation rate of metals in multiple-nanosecond laser pulses irradiation regime. *Applied Surface Science* 253, 6353–6358, 2007.
- [3] BAUERLE, D.: *Laser Processing and Chemistry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] ALLMEN, M., BLATTER, A.: *Laser-beam interactions with materials: physical principles and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] ŠKEREŇ, M.: Základy optiky. (Přednáška) FJFI CVUT v Praze, zimní semestr 2015.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Hanus, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **9. února 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 9. února 2024

Čestné prohlášení

Práci s názvem **Studium degradace dynamické pevnosti svarových spojů opravovaných hliníkových částí karosérie laserem vs TIG/MIG** jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato diplomové práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 5. února 2024

Jan Kopáč v.r.

Poděkování

Touto cestou bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Petru Hanusovi, Ph.D., za odborný dohled a důležité poznámky při vypracovávání celé práce. Dále poděkování patří paní prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D., za její odborné konzultace a poznatky o dané problematice. Velké poděkování patří i panu Janu Žižkovi za přípravu vzorků pro experiment a předání celoživotních zkušeností s problematikou svařování hliníkových slitin. V neposlední řadě bych velmi rád poděkoval celé své rodině a zaměstnavateli za trpělivost a ohleduplnost během celého průběhu studia.

Anotace

Cílem mé diplomové práce je porovnat metody svařování hliníkových slitin a vybrat nejvhodnější metodu svařování s ohledem na statické a dynamické vlastnosti materiálu po svařování.

V teoretické části jsem se zaměřil na hliníkové slitiny používané v automobilovém průmyslu, možnosti jejich oprav a popisem vybraných metod svařování.

V experimentální části popisuji přípravu vzorků od jednotlivých metod svařování, průběhy statických a dynamických tahových zkoušek a jejich vyhodnocení.

Cílem mé práce bylo vybrat nejvhodnější metodu svařování pro opravy hliníkových karoserií automobilů z hlediska statické a dynamické pevnosti po svařování.

Klíčová slova

hliníkové slitiny, svarové spoje, karoserie automobilů, tahové zkoušky

Title

Study of degradation of dynamic strength of welded joints of repaired aluminum body parts by laser vs TIG/MIG

Annotation

The aim of my thesis is to compare the welding methods of aluminum alloys and to choose the most suitable welding method with regard to the static and dynamic properties of the material after welding.

In the theoretical part, I focused on aluminum alloys used in the automotive industry, their repair options and a description of selected welding methods.

In the experimental part, I describe the preparation of samples from individual welding methods, the course of static and dynamic tensile tests and their evaluation.

The aim of my work is to select the most suitable welding method for repairing aluminum car bodies in terms of static and dynamic strength after welding.

Keywords

aluminum alloys, welded joints, car bodies, tensile tests

Obsah

Čestné prohlášení	4
Poděkování	5
Anotace.....	6
Annotation.....	6
Seznam použitých zkratk.....	9
Seznam použitých veličin.....	10
1. Úvod.....	11
2. Teoretická část	12
2.1. Al slitiny používané v konstrukci karoserie automobilu a jejich způsob upevnění . 16	
2.1.1. Sériově vyráběná celohliníková karoserie:	16
2.2. Možnosti oprav hliníkových karoserí.....	21
2.2.1. Pájení.....	21
2.2.2. Lepení.....	21
2.2.3. Nýtování	22
2.2.4. Svařování.....	22
2.3. Studium vybrané Al slitiny a zhodnocení vhodnosti ke svařitelnosti	23
2.3.1. Základní rozdělení slitin hliníku	23
2.3.2. Tvářené vytvrditelné hliníkové slitiny	24
2.3.3. EN AW 6082 T6 EN 573-3 (AlMgSi1Mn) ČSN 424400.....	25
2.3.4. Svařitelnost hliníkové slitiny EN AW 6082 T6.....	26
2.3.5. Inspekční certifikát EN AW 6082 T6	27
2.4. Popis vybraných svařovacích metod	30
2.4.1. MIG	30
2.4.2. TIG	32
2.4.3. Laser welding	35
2.5. Statická vs dynamická instrumentovaná tahová zkouška	38
2.5.1. Statická tahová zkouška	39
2.5.2. Dynamická tahová zkouška.....	41
3. Experiment.....	43
3.1. Příprava vzorků pro tahové zkoušky	43
3.1.1. Svařování zkušebních vzorků metodou MIG.....	45
3.1.2. Svařování zkušebních vzorků metodou TIG	46
3.1.3. Svařování zkušebních vzorků metodou Laser.....	47

3.2.	Vyhodnocení dat ze statické tahové a dynamické tahové zkoušky	50
3.2.1.	Statická tahová zkouška	50
3.2.1.1.	Referenční vzorky materiálu-naměřená data	51
3.2.1.2.	MIG-naměřená data	52
3.2.1.3.	TIG-naměřená data	53
3.2.1.4.	Laser-naměřená data	54
3.2.2.	Dynamická tahová zkouška.....	55
3.2.2.1.	Referenční vzorky materiálu-naměřená data	55
3.2.2.2.	MIG-naměřená data	56
3.2.2.3.	TIG-naměřená data	57
3.2.2.4.	Laser-naměřená data	58
3.3.	Vyhodnocení získaných informací o jednotlivých metodách svařování k vhodnosti dané aplikace	59
3.3.1.	Statická tahová zkouška	59
3.3.2.	Dynamická tahová zkouška.....	62
4.	Závěr.....	65
	Bibliografie.....	66
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	69
	Seznam grafů.....	69

Seznam použitých zkratek

CO ₂	Oxid uhličitý
EU	Evropská unie
Al	Hliník
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
AlCu4Mg	Duralinium
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
WPS	Zkouška postupu svařování
WPQR	Kvalifikace postupu svařování
MIG	Obloukové svařování s tavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře
MAG	Obloukové svařování s tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře
TIG	Obloukové svařování s netavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře
MMA	Obloukové svařování obalenou elektrodou
VVCD	Výukové a výzkumné centrum v dopravě
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
ZM	Základní materiál
SK	Svarový kov
ND: YAG	Pevnolátkový laser (neodymem dopovaný yttrio-aluminiový granát)
Fe	Železo
Si	Křemík
Cu	Měď
Mn	Mangan
Mg	Hořčík
Cr	Chrom
Zn	Zinek
Ti	Titan
V	Vanad

Seznam použitých veličin

Q	Množství vyvinutého tepla	[J]
R	Odpor	[Ω]
I	Proud	[A]
t	Čas svařování	[s]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
A	Tažnost	[%]
τ	Smykové napětí	[MPa]
π	Ludolfovo číslo	[-]
F	Síla	[N]
i	Počet svarů na zatěžovaném vzorku	-
d	Průměr svarové čocky	[mm]

1. Úvod

V dnešní době je stále větší tlak na ekologii a čistotu životního prostředí, které nás všude obklopuje. Velký podíl na celkovém znečištění ovzduší mají emise z provozu dopravních, přepravních prostředků. Z tohoto důvodu se nám neustále zpřísňují emisní normy.

Jedním z parametrů, kterým lze ovlivnit spotřebu paliva a s tím přímo úměrné množství vyprodukovaných emisí, je hmotnost vozidla. V závislosti na hustotě materiálu se jako vhodná alternativa k oceli nabízí hliník a jeho slitiny, které jsou v porovnání s konstrukční ocelí až trojnásobně lehčí.

Průkopníkem této inovativní myšlenky u sériově vyráběných automobilů je německá společnost Audi, která se zabývá výrobou luxusních automobilů. Na modelu Audi A8, který je sériově vyráběný od roku 1994, využil výrobce 249 kg hliníkových slitin a karoserie tohoto vozu je složena z 334 dílů. Nabyté zkušenosti s hliníkovými slitinami dále využili u modelu A2. Vzhledem k nezanedbatelné úspoře hmotnosti celého vozidla se touto myšlenkou začali zabývat i ostatní výrobci automobilů. Sériově vyráběné celohliníkové karoserie tak dnes vyrábí světové značky jako jsou Audi, Lotus, Honda, Ferrari, Rolls-Royce nebo Lamborghini.

Vzhledem k nárůstu využití hliníkových slitin v konstrukčních prvcích automobilu a jejich ekonomické hodnotě, je nutné řešit možnosti jejich oprav s využitím nejmodernějších technologií, které dnešní doba nabízí a posoudit jejich vhodnost pro danou aplikaci.

V teoretické části této práce jsem se věnoval hliníkovým slitinám používaným v automobilovém průmyslu, možnostem jejich oprav v případě mechanického poškození, rozboru jednotlivých metod svařování a popisu statické a dynamické tahové zkoušky.

V části experimentální jsem shrnul přípravu jednotlivých vzorků pro tahové zkoušky, průběh jednotlivých zkoušek a jejich vyhodnocení.

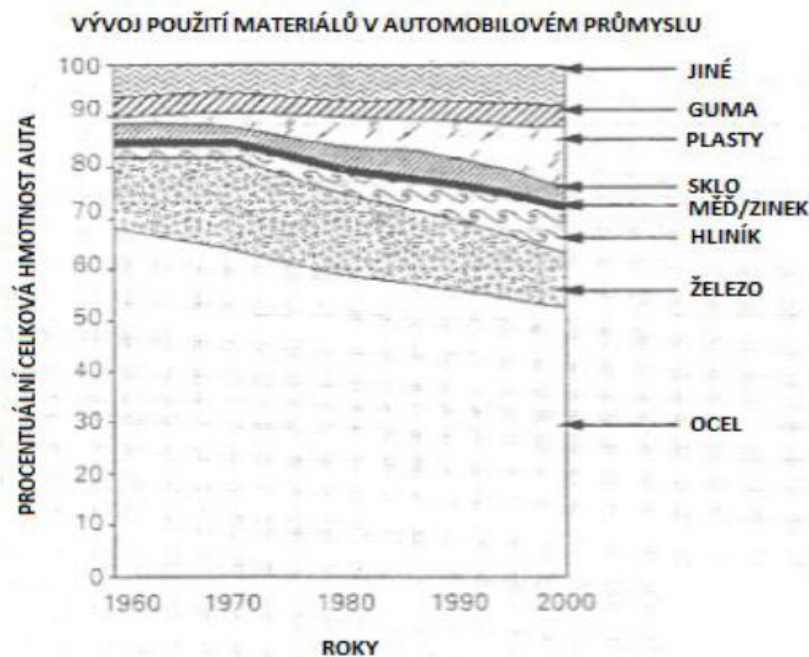
Závěrem jsem na základě vyhodnocených dat z jednotlivých zkoušek porovnal metody svařování a vybral tu nejvhodnější, s ohledem na mechanické vlastnosti materiálu po opravě.

Cílem mé práce bylo zjistit a porovnat mechanické vlastnosti opravované/svařované hliníkové slitiny EN AW 6082 T6, která se používá na výrobu karoserie vozidla, pomocí statické a dynamické tahové zkoušky u vzorků, které budou svařovány konvenčními metodami MIG/TIG, v porovnání s laserovým svařováním.

2. Teoretická část

V důsledku globální ekologie je kladen stále větší důraz na dodržování a snižování emisních limitů. Tento trend se nám výrazně projevuje v automobilovém průmyslu, kde jsou neustále zpřísnovány emisní limity na množství vyprodukovaných výfukových plynů u jednotlivých vozidel. Na základě požadavků Evropské unie by mělo dojít do roku 2030 ke snížení emisí skleníkových plynů o 55 %. Toto opatření by mělo nejvíce postihnout výrobu osobních automobilů a dodávek, které produkují 15 % celkových emisí CO_2 v EU. Tyto kroky by zároveň měly vést k urychlení přechodu na mobilitu s nízkou až nulovou hodnotou vyprodukovaných emisí. Výrobci těchto automobilů již několik let vynakládají nemalé finanční prostředky do vývoje svých produktů, aby byli schopni tyto stále se zpřísnující normy plnit. Jedním ze základních parametrů vozidla, který přímo ovlivňuje spotřebu paliva a sním přímo úměrné množství vyprodukovaných výfukových plynů, je hmotnost vozidla. Hmotnost je dána použitými materiály jednotlivých komponent, ze kterých je vozidlo vyrobeno. Nejčastěji používanými materiály v automobilovém průmyslu jsou oceli, slitiny hliníku a slitiny hořčíku. V posledních letech se nám vlivem velkého důrazu na hmotnost vozidla mění procentuální poměr materiálových vstupů vozidla.

V roce 1996 bylo v automobilu průměrně zakomponováno do 110 kg komponent z hliníkových slitin. V roce 2015 toto číslo vzrostlo na 250 kg bez započítání plechů karoserie, nebo 340 kg se započítáním plechů a konstrukčních prvků. Hlavním důvodem využívání hliníkových slitin v karoserii vozidla je snížení hmotnosti až o 40 % a zvýšení tuhosti o 10-38 % vůči ocelové karoserii. Dále se snižuje náročnost oprav, kdy je možná dobrá kombinace s jinými materiály a v neposlední řadě nepodléhá do takové míry korozním jevům, jako doposud hojně používaná ocel. [1]



Obrázek 1.: Vývoj použitých materiálů v automobilovém průmyslu [1]

Hliník a jeho slitiny

Hliník je lehký kov bílo šedé barvy s vlastnostmi vysoké vodivosti a snadné tvarovatelnosti i recyklace. Díky tomu denně nachází své uplatnění v mnoha oborech, např. v elektrotechnice, a to ve formě slitin nejen v leteckém, ale i automobilovém průmyslu a v mnoha dalších aplikacích. [6]

Základní fyzikálně-chemické vlastnosti

Jedná se o stříbřitě šedý, nestálý a kujný kov, který velmi dobře vede elektrický proud. V přírodě se vyskytuje převážně ve formě sloučenin, nejznámější je bauxit. Hliník je v čistém stavu velice reaktivní a na vzduch se velice rychle pokryje tenkou vrstvou Al_2O_3 , která chrání kov před další oxidací. Hliník a většina jeho slitin jsou velmi dobře svařitelné, téměř všemi dostupnými metodami. Výjimku nám tvoří slitina dural, která je obtížně svařitelná.

Výskyt hliníku v přírodě

Kvůli své reaktivitě se v přírodě vyskytují pouze jeho sloučeniny. Hliník je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v naší zemské kůře, přibližně se jedná o 7,5-8,3 % zemské kůry. Nejběžnější horninou na bázi hliníku je již zmíněný bauxit.

Výroba

Přestože patří hliník mezi tři nejvíce zastoupené prvky v zemské kůře, jeho průmyslová výroba ještě do nedávné doby patřila k velmi složitým a finančně nákladným procesům. Důvodem bylo, že elementární hliník jednoduše nelze metalurgicky vyredukovat z jeho rudy, tak jak se to například dělá u železa ve vysoké peci za pomoci koksu. Celou problematiku vyřešilo až zvládnutí průmyslové elektrolýzy taveniny kovových rud. [7]

Největšími světovými producenty hliníku jsou firmy Rio Tinto Alcan, Rusal a Aluminum Company of America.

Využití kovového hliníku

Hliník nalézá své uplatnění především díky své hmotnosti a poměrně značné chemické odolnosti. Z tohoto důvodu se z jeho slitin vyráběly drobné mince, kuchyňské nádobí či přístroje. Po vyválnování do tenké fólie se s ním můžeme setkat pod názvem alobal. Ve stavebnictví se z něho vyrábí lisované profily, ze kterých se dále skládají okna a dveře. Vzhledem k dobré elektrické vodivosti se hliník využívá jako vodič v elektrotechnice.

Slitiny hliníku

Slitiny hliníku se využívají především z důvodu malé pevnosti čistého hliníku. Nejvýznamnější prvky, které se ve slitinách využívají jsou měď, hořčík, mangan, křemík a zinek. Měď, která může být ve slitině obsažena až do 12 % obsahu, zvyšuje pevnost a tvrdost, ale nepříznivě ovlivňuje odolnost proti korozi a tvárnost. Hořčík do maximálního obsahu 11 % zlepšuje odolnost proti korozi, pevnost a zajišťuje vztvrditelnost. Mangan většinou do 2 % obsahu zvyšuje pevnost, tvárnost, houževnatost a odolnost proti korozi. Křemík do 25 % obsahu u slévárenských slitin a do 1 % obsahu u tvárných slitin zvyšuje pevnost a odolnost proti korozi. Zinek 6-8 % snižuje odolnost proti korozi, ale zvyšuje pevnost. [8]

- **Slitiny s mědí a hořčíkem**

Tyto slitiny používají svůj obchodní název dural, duralminum či superdural. Jedná se o vztvrditelnou slitinu, která se hojně využívá pro tváření v automobilovém a leteckém průmyslu na součásti, které pracují za normálních teplot. Lehká slitina s velkou pevností, ale malou korozní odolností. Využívají se technologie povlakování (Eloxování).

- **Slitiny s mědí a niklem**

Oproti duralu obsahuje navíc přísadu niklu, hořčíku, železa, potažmo křemíku a titanu. Tyto slitiny mají vyšší odolnost vůči teplotám. Použití těchto slitin je u součástí s pracovní teplotou do 300 °C například ve spalovacích motorech.

- **Slitiny se zinkem a hořčíkem**

Jedná se o nejpevnější slitiny hliníku s pevností v tahu až 600 MPa. Současně mají zvýšenou odolnost proti korozi, a proto se používají v lodním, chemickém a potravinářském průmyslu.

- **Slitiny s manganem**

Tyto slitiny nejsou vztvrditelné, obsah manganu je do 1,5 %. Mají vyšší odolnost proti korozi a pevnost, než má čistý hliník.

- **Slitiny s křemíkem**

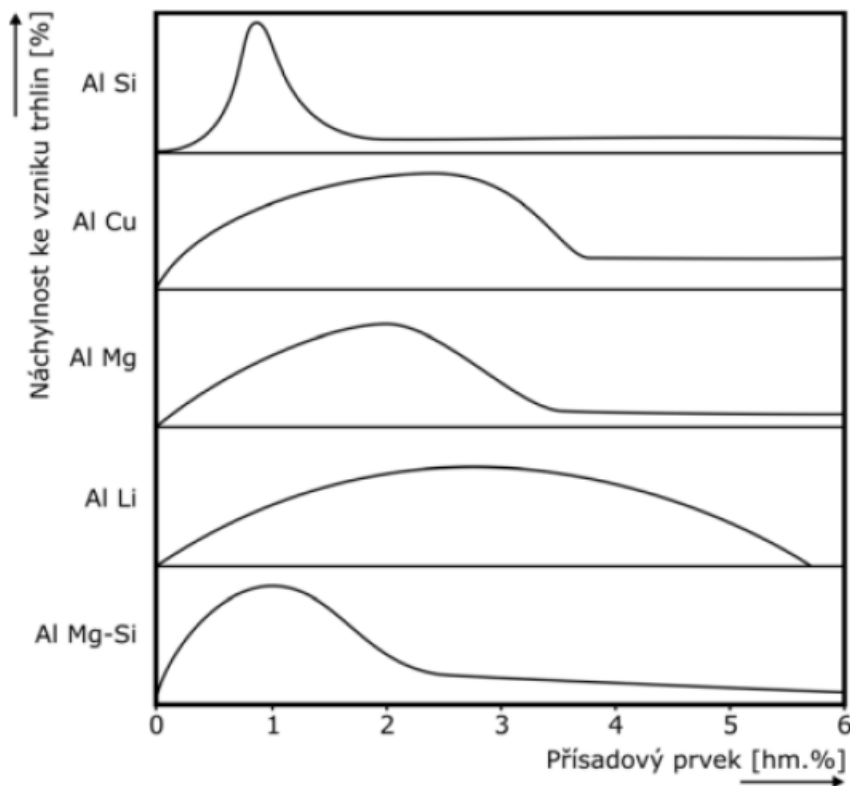
Jedná se o slitiny používané pouze ve slévárství. Nazýváme je siluminy a jejich nejvýznamnějšími vlastnostmi jsou pevnost a dobrá odolnost vůči korozi, které lze podpořit tzv. očkovaním.

Svařování hliníku a jeho slitin

Před samotným zahájením svařování hliníku je nutná pečlivá příprava svarových ploch. Především se jedná o odstranění povrchové oxidační vrstvy Al_2O_3 , která má oproti základnímu materiálu několikanásobně vyšší teplotu tavení. Tato povrchová vrstva vzniká velice rychle, a tak je důležité odstranit tuto vrstvu těsně před zahájením svařování. Primárně se používá chemické čištění a k mechanickému dočištění se používá nerezový kartáč. U metod svařování MIG a TIG se využívá čistící účinek pomocí střídavého proudu. [7]

Vzhledem ke své vysoké teplotní vodivosti, odvádí svařovaný díl velkou část tepla sám. Pokud by toto samochlazení bylo nedostatečné, musíme zajistit chlazení nucené. Vysoká teplota je nežádoucí, jelikož po svařování, kdy je teplota svařovaného dílu okolo 200 °C, může vzniknout pórovitost. Vodík, který se rozpustí v oblasti likvidu, se při ochlazování usazuje na energeticky výhodných místech, kde se v krajních případech mohou vytvářet póry. Tato rozpustnost vodíku v hliníku a jeho slitinách je několikanásobně vyšší, než je tomu u oceli. Z tohoto důvodu je nutné snížit možnost absorpce vodíku do svarové lázně. [8]

Další vadou mohou být trhliny za horka, které se často vyskytují při svařování oceli. Příčinou těchto trhlin je snížená deformační schopnost zrn kovu a pokles soudržnosti na hranicích zrn. Při tuhnutí zde vznikají velká pnutí, která zde v krajních případech mohou vytvořit trhlinu. Podstatný vliv na trhliny za horka mají legující prvky v závislosti na jejich obsahu. Podstatná je tedy technika svařování, její rychlost a příprava svarových ploch. [9]



Obrázek 2.: Vliv legujících prvků na vznik trhlin za horka [10]

2.1. Al slitiny používané v konstrukci karoserie automobilu a jejich způsob upevnění

V prvopočátku se hliníkové slitiny v automobilovém průmyslu používaly jen zřídka. Důvodem byly vysoké náklady spojené s jejich výrobou. V tomto období jsme se s nimi setkávali především u litých kol, hlavic řadících pák, či volantů. Následně se tyto slitiny rozšířily do motorové části vozidla, kde našly své uplatnění jako bloky motoru, písty, ojnice, sací potrubí, nebo chladiče. Vlivem vyššího využití a vzrůstající poptávce po těchto slitinách se snižovaly náklady na jejich výrobu, a s tím se otevřela možnost jejich dalšího využití v samotné karoserii vozidla. Nejprve to byly jednotlivé funkční prvky, které zvyšovaly odolnost proti krutu, ohybu a zlepšovaly deformační zóny. Jednalo se o sloupky, nárazníky, nebo blatníky. Četnost těchto prvků rostla až do roku 1994, kdy německá automobilka Audi představila model A8 s prostorovým rámem AFS, který je brán jako sériově vyráběná celohliníková karoserie.

2.1.1. Sériově vyráběná celohliníková karoserie:

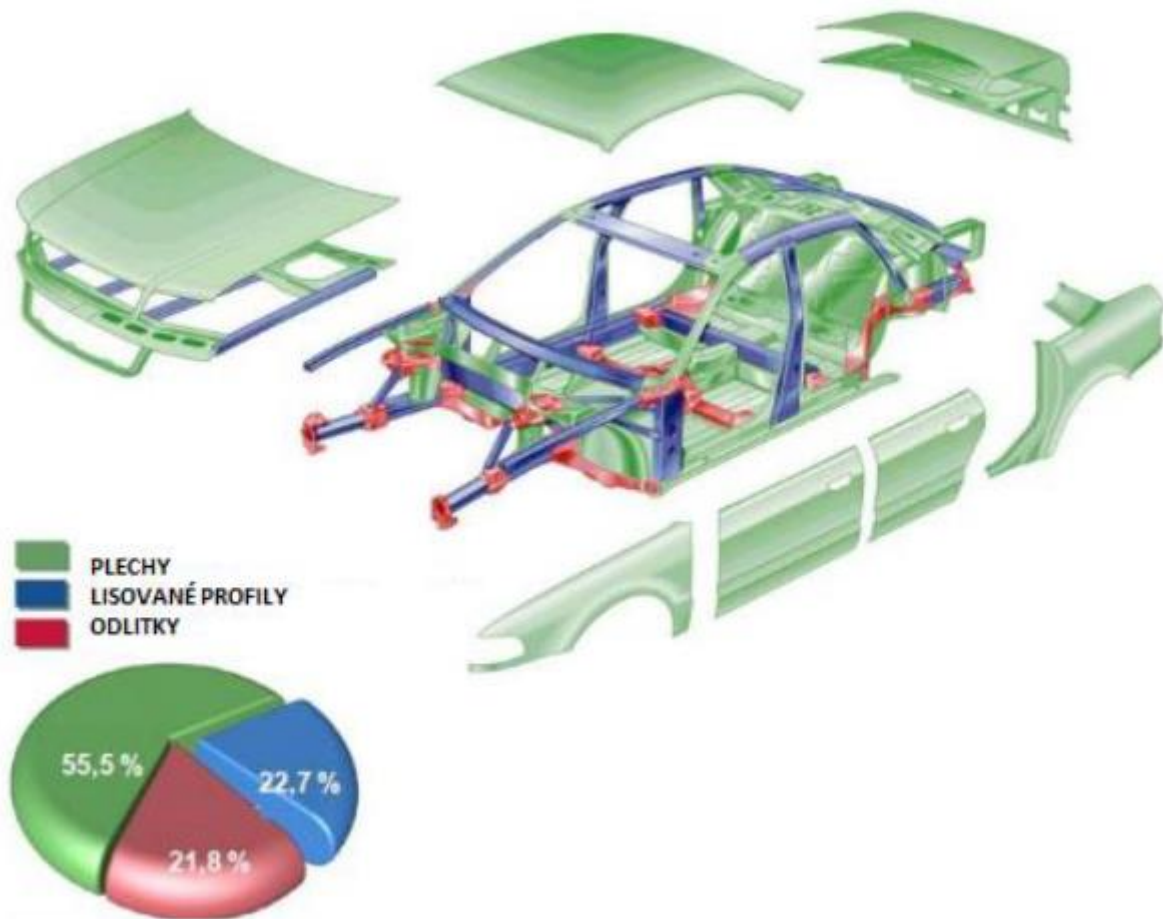
- Audi A8 (1994) – prostorový rám AFS
- Lotus Elise (1996) – hliníkový rám, karoserie plastová
- Audi A2 (1999)
- Honda Insight (1999)
- Ferrari 360 (1999) – rám i karoserie
- Lamborghini Gallardo (2003)
- Rolls-Royce Phantom (2003)



Obrázek 3.: Sériová výroba celohliníkové karoserie [1]

Audi

Německá automobilka Audi vyráběla od roku 1994 do roku 2002 model Audi A8 (D2). U tohoto modelu se automobilka snažila zvýšit podíl komponent z hliníkových slitin. Bez dveří vozidla se tento model skládal z komponent, které byly vyrobeny z 249 kg hliníkových slitin. Karoserie se skládala z 334 komponent (47 hliníkových profilů, 50 odlitků, 237 plechových výlisků). Tyto komponenty byly vyrobeny z hliníkových slitin 6060, 6016, 6009, 2182, A356. Nejprve bylo nutné, aby tato konstrukce prošla tepelným zpracováním o teplotě 210 °C po dobu 30 minut z důvodu umělého stárnutí hliníkových profilů a plechů, což se odrazilo do výrobních nákladů vozidla. Následně se tyto zkušenosti zužitkovaly u karoserie modelu Audi A2. Během procesu výroby se zjistilo, že požadované pevnosti lze dosáhnout i během operace lakování, která zahrnuje kataforetickou namáčecí lázeň s následným zapečením v peci o teplotě 180 °C po dobu 20 minut. [2]



Obrázek 4.: Zobrazení využití hliníkových dílů a procentuální znázornění jejich zpracování (AUDI A8) [2]

Mercedes-Benz

Tato, rovněž německá automobilka použila ve své třídě S Coupé komponenty z oceli, hliníkových slitin a plastů. Komponenty z hliníkových slitin zde vstupují jako odlitky, nebo plechové výlisky. Montují se do částí celého vozidla, vnějšího pláště, blatníků, dveří i klik. Bezpečnost celé posádky zde zajišťují komponenty z ultravysokopevnostní a vysokopevnostní oceli. Současně využívají i hybridní konstrukci z hliníkových slitin, která je perforovaná a potažená plastem. Tato technologie zvyšuje tuhost těchto komponent. Využívá se jako bezpečnostní prvek mezi zavazadlovým prostorem a prostorem pro cestující. Dveře tvoří mimořádně dlouhá konstrukce bez okenních rámců, která je složena z hliníkových komponent spojených pomocí laserového svařování, lepení a nýtování. Z důvodu bezpečnosti je vnitřní strana dveří i výplň konstrukce dveří vyrobena z vysokopevnostních slitin, aby byla co nejvíce chráněna posádka při čelních a bočních nárazech vozidla. V přední části vozu jsou opět zavedeny komponenty z hliníkových slitin s ohledem na hmotnost, aby se dosáhlo optimální rozložení hmotnosti. Těmito změnami vozidlo dosáhlo nejenom lepšího rozložení hmotnosti, ale i zlepšení tuhosti a deformačních zón při nárazu. [3]

Jaguar

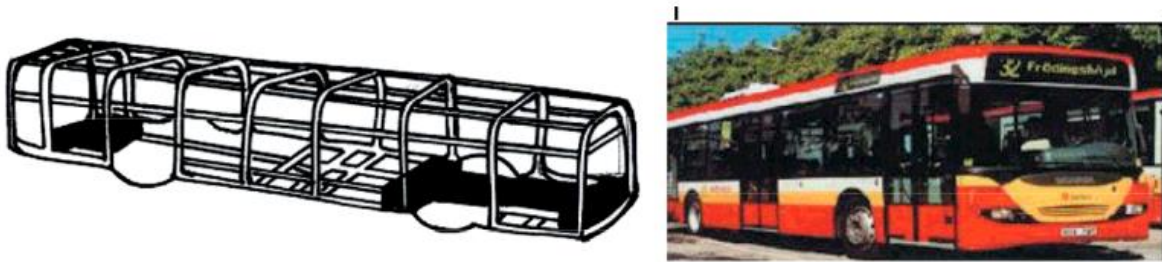
U značky Jaguar se hliníkové slitiny využívají již od roku 1940 převážně pro závodní modely, u kterých je hlavní předností těchto dílů nízká hmotnost. Se snižujícími se výrobními náklady těchto komponent se v roce 2003 prosadili i u modelu XJ, kde se jeho hmotnost snížila o 40 % oproti původnímu modelu. Tato britská automobilka udává ve své studii, že při snížení celkové hmotnosti vozidla o 100 kg, sníží emise CO_2 o 9 g/km. Z důvodu úspory hmotnosti používají plechy o tloušťce 0,9 mm pro vnitřní použití a až 3 mm pro vnější, z důvodu dodržení pevnostních podmínek vozidla. Model F-PACE disponuje postranním panelem o hmotnosti 5,8 kg. Pro spojení komponent podvozku se využívá technologie nýtování a lepení. Panely se nejprve přilepí speciálním lepidlem a poté se pojistí nýty z bórové oceli. Následně se celý podvozek vytvrdí v lakovně za teploty 170 °C. [4]



Obrázek 5.: Karoserie ze slitiny hliníku pro Jaguar XK120 [4]

Hromadná doprava

Problematika s tuhostí a hmotností konstrukce v dopravních prostředcích se netýká pouze osobních vozidel. U prostředků hromadné dopravy se z hliníkových komponent skládá celá rámová konstrukce, která se následně svařuje, lepí či nýtuje.



Obrázek 6.: Autobus Scania Omnicity s hliníkovým skeletem [1]

Dále se hliníkové slitiny využívají k výrobě celé řady komponent, které jsou nedílnou součástí vozidla.

- Litá kola

Ráfky vyrobené z hliníkové slitiny jsou lehčí, což umožňuje výrobu větších průměrů i šířek ráfku. Tyto ráfky nepodléhají korozi, a tak se prodlužuje jejich životnost. Technologie výroby hliníkových kol je pomocí tlakového lití, a nově i tvářením za tepla/kováním. Tyto ráfky jsou vlivem použitého materiálu velmi lehké a díky použité technologii výroby extrémně pevné.

- Bloky motoru a klikové skříně

Technologie výroby těchto komponent je tlakové lití, což nám umožňuje tvarovou rozmanitost a velkou produktivitu. Hlavními výhodami použití hliníkových slitin jako základního materiálu je jeho dobrá obrobiteľnosť a tepelná vodivost. Vzhľadom k jeho nízkej hmotnosti výrazne snížime zaťaženie nápravy, na ktorej je agregát umiestnen.

- Písty
- Ojnice
- Turbodmychadla
- Chladiče

Tabulka 1.: Hliníkové slitiny a jejich využití v automobilovém průmyslu [5]

Mezinárodní označení podle ČSN EN 573-1	Specifické vlastnosti	Použití
EN AW-2014	Velmi pevná slitina používaná pro konstrukční součásti; vzhledem k relativně vyššímu obsahu mědi má nižší odolnost proti korozi	ABS, tlumoče, ojnice
EN AW-5022	Vysoce pevný a vysoce tvárný materiál využívaný pro díly karoserie	kapoty, střechy, dveře, sloupky, podlahové plechy, zadní nárazníky
EN AW-5110 A	Slitina s lesklým povrchem, dobrá tažnost a odolnost proti korozi	lišty, reflexní panely, odstíny žárovek světlometů
EN AW-5154	Vysoká pevnost, dobrá tvářitelnost a odolnost proti korozi při namáhání	kola, součásti podvozku
EN AW-5182	Dobrá tvářitelnost a odolnost proti korozi	protiprachové kryty, rámy sedadel, pouzdra vzduchového filtru
EN AW-6063	Výborné vlastnosti tváření, svařitelná, odolná vůči korozi, elektro-chemicky lze upravit do lesku a anodizovat, pro nejvyšší dekorativní nároky	lišty, rámy sedadel, brány nákladních vozů, střešní zábradlí, potrubí
EN AW-6082	Pevná, zakalená slitina s vysokou tvářitelností	kapoty, zadní nárazníky, přední nárazníky sloupky, kryty kol, střechy, dveře
EN AW-7204	Slitina pro svařované konstrukce; pevnost ve svařované části přirozeným stárnutím se obnovuje téměř stejnou hodnotou, jako původní	součásti řízení, příčnky, brzdové pedály, zvedáky

2.2. Možnosti oprav hliníkových karoserií

Vzhledem ke globálnímu nárůstu dopravy po celém světě a rostoucím cenám nových vozů je stále větší tlak na opravy starších, či poškozených karoserií vozidel, které byly poškozeny vlivem opotřebení, dopravních nehod, nebo se na nich jen podepsal „zub času“. Vzhledem k povaze poškození máme na tyto opravy velké množství dostupných technologií, které můžeme jednoduše aplikovat. Většina z těchto technologií je koncipována na ocelové karoserie, které se v automobilovém průmyslu využívají již řadu let a zkušenosti s nimi jsou tak mnohem větší, než je tomu u již zmiňovaných karoserií z hliníkových slitin.

Při opravování/spojování prvků z hliníkových slitin využíváme převážně technologie:

- Pájení
- Lepení
- Nýtování
- Svařování

2.2.1. Pájení

Technologie pájení hliníku je jedna z nejstarších metod využívaných na výrobu nerozebíratelných spojů komponent z hliníkových slitin. V automobilovém průmyslu se pájení nejprve začalo využívat při spojování prvků chladících systémů, které jsou ze $\frac{3}{4}$ tvořeny těmito prvky. S nárůstem počtu komponent z hliníkových slitin se tento způsob nerozebíratelných spojů rozšířil i do dalších částí vozidla. Nevýhodou těchto spojů byla nutnost demontáže při jejich opravách z důvodu tepla, které bylo nutné k roztavení pájky. Z tohoto důvodu je v některých aplikacích nahradily lepené spoje.

2.2.2. Lepení

Jedná se o technologii, která je v posledních letech hojně využívána a nahrazuje některé nerozebíratelné spoje, které se dříve vyráběly technologií pájením, nebo svařováním. Její hlavní předností je možnost spojování různorodých materiálů a nulové tepelné ovlivnění základního materiálu, s čím jsou úzce spojeny deformace a vnitřní pnutí materiálu. Celá řada firem pracuje na vývoji a výrobě lepidel pro nejrůznější aplikace. Před samotným lepením je důležitá pečlivá příprava povrchů lepeného spoje, na které bude lepidlo aplikováno. Samotné lepení je velice efektivní způsob opravy, který je chráněn proti korozi a zároveň má těsnící účinek.

2.2.3. Nýtování

Nýtování karoserie automobilu bylo hojně využívaná technologie na začátku 20. století. Dnes se tento typ spojování využívá především u nesvařitelných materiálů a na těžce dostupných místech, které jsou obtížně přístupné, nebo nedostupné pro svařovacího robota. Další uplatnění dnes nachází tato technologie při pojištění lepených spojů.

2.2.4. Svařování

Svařování hliníku a jeho slitin může představovat výzvu i pro ty nejzkušenější svářeče. Toto svařování vyžaduje jiné techniky a postupy práce, než je tomu u svařování oceli, a proto je velmi důležité tyto rozdíly znát. Hliník a jeho slitiny mají velkou afinitu ke kyslíku. Čistý hliník se taví při 650 °C a oxid hlinitý, kterým je kov pokrytý, má teplotu tavení 2 037 °C. Protože se oxid hlinitý taví přibližně při trojnásobně vyšší teplotě než samotný hliník, musí být před samotným svařováním z kovu očištěn. Vzhledem ke skutečnosti, že má hliník vyšší tepelnou vodivost a nízký bod tavení, máme menší prostor pro zpracování než u jiných kovů a může dojít k jeho propálení. V kombinaci s tím, že je obtížnější indikovat průběh a kvalitu svaru, než je tomu u oceli, představuje hliník a jeho slitiny náročný materiál pro svařování.

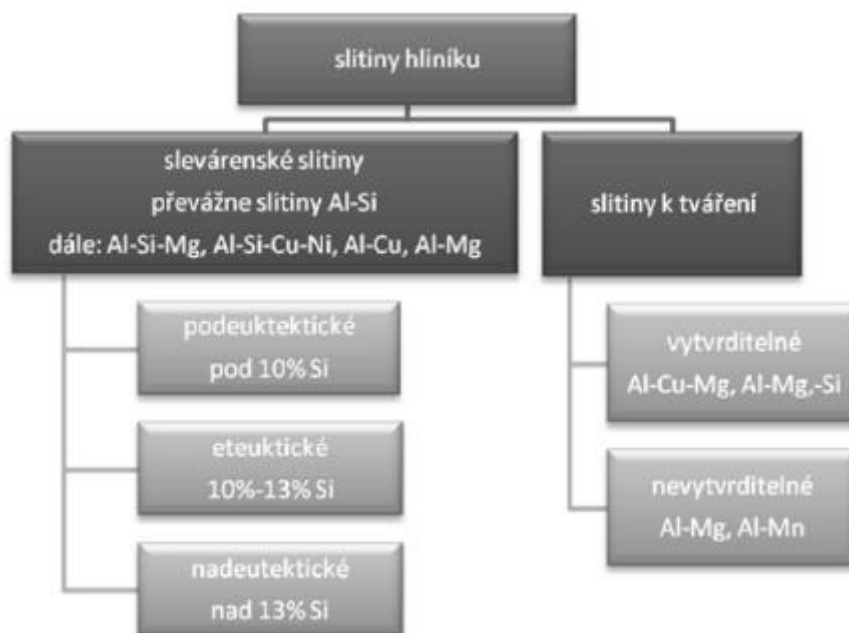
Tabulka 2.: Porovnání vlastností hliníku a železa

Vlastnosti		Al	Fe
Atomová hmotnost	[g/Moll]	26,98	55,84
Krystalová mřížka		Kub.pl.c.	Kub.prost.c.
Hustota	[g/cm ³]	2,70	7,87
Modul pružnosti	[MPa]	67 • 10 ³	210 • 10 ³
Koeficient prodloužení	[1/K]	24 • 10 ⁻⁶	12 • 10 ⁻⁶
R _{p0,2}	[Mpa/mm ²]	≈ 10	≈ 100
R _m	[Mpa/mm ²]	≈ 50	≈ 200
Specifické teplo	[J/kg•K]	≈ 890	≈ 460
Skupenské teplo tání	[J/g]	≈ 390	≈ 272
Teplota tání	[°C]	660	1536
Tepelná vodivost	[W/m•K]	235	75
El. vodivost	[m/Ω•mm ²]	38	≈ 10
Oxidy		Al ₂ O ₃	FeO / Fe ₂ O ₃ / Fe ₃ O ₄
→ Teplota tavení	[°C]	2050	1400 / 1455 / 1600

2.3. Studium vybrané Al slitiny a zhodnocení vhodnosti ke svařitelnosti

Hliník může mít ve své čisté formě omezenou pevnost a tuhost, což výrazně omezuje jeho použití v náročnějších aplikacích. Z tohoto důvodu se jako samotný prvek v automobilovém průmyslu nevyužívá. Přidáním různých prvků do čistého hliníku vznikají slitiny, které se pak svými vlastnostmi liší od čistého hliníku a přináší spousty výhod. Může to být například větší pevnost, tvrdost, korozivzdornost nebo tuhost. Slitiny hliníku jsou, hned po oceli, druhým nejpoužívanějším materiálem na výrobu konstrukčních prvků. První slitina hliníku byla vyvinuta v roce 1906, známá pod názvem Duralinium (AlCu4Mg). Tato slitina započala převrat ve výrobě vzducholodí a letadel. V dnešní době je základní řada nejpoužívanějších slitin hliníku celosvětově unifikována a prakticky dokončena. K hlavním přednostem těchto slitin patří především jejich nízká měrná hmotnost (2470 až 2890 kg/m³) a poměrně dobrá pevnost (R_m 90 až 670 Mpa), z čehož vyplývá, že některé slitiny hliníku mají srovnatelnou pevnost s ocelí. Pokud neobsahují měď, velmi dobře odolávají atmosférické korozi a kyselým látkám. Odolnost vůči alkalickým látkám je naopak malá. Jsou dobře svařitelné v ochranných atmosférách a mají dobrou tepelnou i elektrickou vodivost. Vyrábí se z nich široký sortiment hutních polotovarů a vratný odpad se poměrně jednoduše recykluje. Mezi jejich hlavní nevýhody patří nízká tvrdost, s čím úzce souvisí snadné poškození povrchu součástí, které jsou z těchto slitin vyrobeny. Dále může docházet k elektrochemické korozi při vodivém kontaktu s ostatními kovy a slitinami, mimo kadmia a zinku.[12]

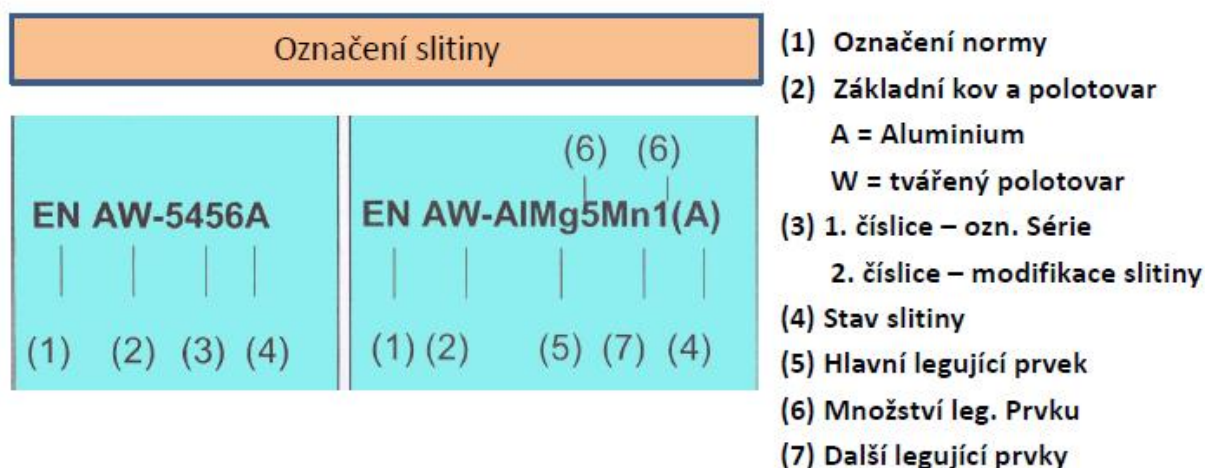
2.3.1. Základní rozdělení slitin hliníku



Obrázek 7.: Rozdělení slitin hliníku [11]

2.3.2. Tvářené vytvrditelné hliníkové slitiny

Jak je uvedeno v zadání, má práce se zaměřuje na opravy hliníkových částí karoserie, která je tvořena nejčastěji prvky z tvářených, vytvrditelných hliníkových slitin. Tyto materiály dosahují ve vytvrzeném stavu velmi dobrých mechanických vlastností, a tak své uplatnění nenašly jen v automobilovém průmyslu, ale i v lodním či leteckém, kde tvoří konstrukce draků letadel, nebo se využívají při výrobě sportovního náčiní.



Obrázek 8.: Systém značení tvářených slitin

Značení hliníku a jeho slitin pro tvářenání se zabývá norma ČSN EN 573-1 až 5. Tyto normy jsou určeny pro tvářené výrobky a ingoty, které jsou určeny ke tvářenání.

Tabulka 3.: Značení tvářených slitin Al podle EN 573-1 až 5

Hlavní legující prvek	Označení série	Slitina	Stav
Hliník čistoty minimálně 99.00 %	1000	Al	Nevytvrditelný
Měď	2000	AlCuMg	Vytvrditelný
Mangan	3000	AlMn	Nevytvrditelný
Křemík	4000	AlSi	Nevytvrditelný
Hořčík	5000	AlMg	Nevytvrditelný
Hořčík a křemík	6000	AlMgSi	Vytvrditelný
Zinek	7000	AlZnMg	Vytvrditelný
Jiné prvky	8000	Al + různé prvky	Vytvrditelný i nevytvrditelný
Nepoužitá skupina	9000		

2.3.3. EN AW 6082 T6 EN 573-3 (AlMgSiMn) ČSN 424400

Z této hliníkové slitiny se v automobilovém průmyslu vyrábí přední/zadní nárazníky, sloupky, kapoty, střechy, dveře i kryty kol. Z tohoto důvodu jsem si ji vybral pro svou experimentální část práce.

Tabulka 4.: Obsah prvků ve slitině EN AW - 6082 (AlMgSiMn) v % hmot. [13]

chemický prvek (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	0,7 - 1,4	0,5	0,1	0,4 - 1	0,7 - 1,2	0,25	0,2	0,1

Tabulka 5.: Mechanické vlastnosti slitiny EN AW - 6082 (AlMgSiMn) [11]

Název vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti Rm	[MPa]	295
Mez kluzu Rp 0,2	[MPa]	250
Tažnost (A)	[%]	8

Stav Materiálu: T6 zpracováno rozpouštěcím žiháním a uměle zestárnuto

Slitiny hliníku ze série 6xxx obsahují legující prvky křemíku a hořčíku. Poměr je takový, že může dojít ke vzniku sloučeniny Mg₂Si, čímž se tyto slitiny stávají vytvrditelnými. (precipitační tvrzení) Slitiny v této skupině mohou být dále po zpracování rozpouštěcím žiháním (stav T4) tvářeny a posléze vytvrzením převedeny do stavu T6, tento postup jim zaručuje vysokou tvrdost. U slitin z této série je z hlediska pevnostních vlastností důležité množství intermetalické fáze Mg₂Si, kvůli které jsou tyto hliníkové slitiny tepelně zpracovatelné a mají určitou analogii se samokalitelnými ocelmi – jsou samokalitelné. Charakteristickou vlastností je jejich výborná schopnost ke tváření, svařitelnost, odolnost vůči atmosférické korozi a mechanická obrobiteľnosť při středních pevnostních vlastnostech.

- Hořčík (Mg)

Napomáhá ke zvýšení mechanické pevnosti a korozivzdornosti, u tvářených slitin můžeme zachytit do 8 % přítomnosti hořčíku ve slitině.

- Mangan (Mn)

Dodává lepší pružnost a korozivzdornost, ve všech případech je obsažen ve slitině do 2 %.

- Křemík (Si)

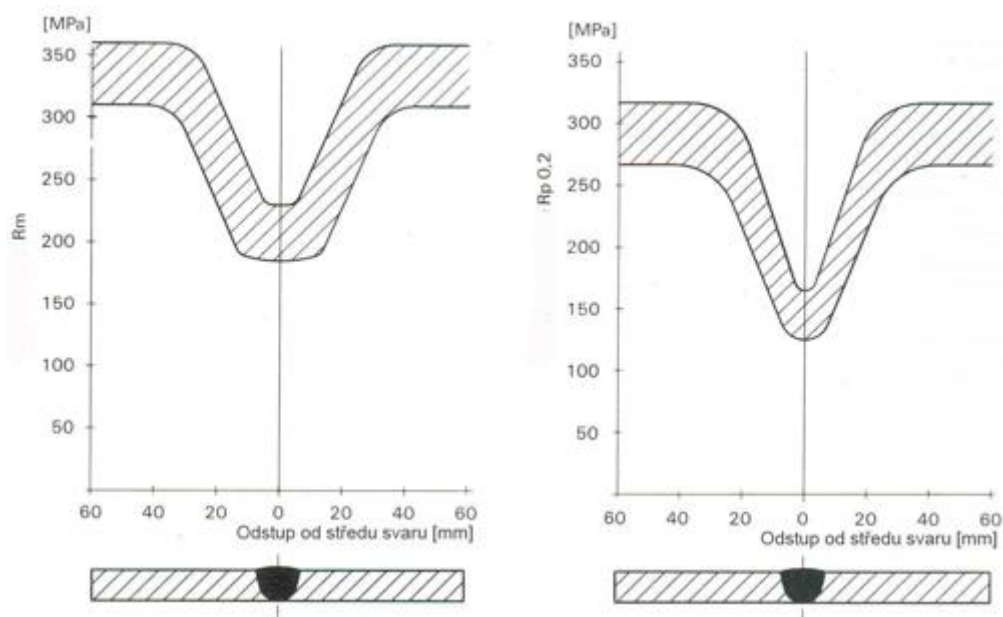
Zajišťuje lepší korozivzdornost, ve větším množství se přidává pouze čistý křemík, který nám zvyšuje křehkost slitiny. U tvářených slitin se pohybuje obsah křemíku do 12 %.

2.3.4. Svařitelnost hliníkové slitiny EN AW 6082 T6

Svařitelnost hliníku a jeho slitin je komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost daného kovu, nebo slitiny pro výrobu svařence, při konstrukční spolehlivosti svarového spoje a technologických možnostech svařování. Při svařování tohoto materiálu představuje největší komplikaci tenká povrchová vrstva oxidu hlinitého, která nám brání v dokonalém natavení svarových ploch. Slitiny na bázi hořčíku jsou většinou dobře svařitelné, ale slitiny na bázi křemíku jsou svařitelné obtížně. Slitiny, ve kterých jsou obsaženy oba zmíněné prvky, jsou taktéž svařitelné obtížně, což je případ naší hliníkové slitiny EN AW 6082 T6. Obecně jde ale říct, že slitiny na bázi křemíku a hořčíku jsou vhodné ke svařování. Z tohoto důvodu je vždy dobré při svařování hliníkových slitin znát jejich složení a pokud je to možné, dodržovat doporučení výrobce za jakých podmínek a s jakým přídavným materiálem danou slitinu svařovat. [14]

Vhodné přídavné materiály pro EN AW 6082 T6

- S Al 5356 (AlMg5Cr(A))
- S Al 5087 (AlMg4,5MnZr)
- S Al 5183 (AlMg4,5Mn0,7)



Obrázek 9.: Tepelně ovlivněná zóna slitiny AlMgSi1 v teplem vytvrzeném stavu

2.3.5. Inspekční certifikát EN AW 6082 T6



Abnahmeprüfzeugnis 3.1 (EN 10204)
Inspection certificate - mill certificate

Nr.: 89297397 **01 / 1**
Rev.: 0

Seite / page: 1 von / of 3
 Datum / date: 2023 05 10

Zertifiziert nach / certified to ISO 9001, IATF 16949, EN/AS 9100, ISO 14001, ISO 50001, NADCAP, EN ISO/IEC 17025

Auftraggeber / customer: Alcom Alval s.r.o. Komerční 531 25101 NUPAKY (PRAHA-VÝCHOD) CZECH REPUBLIC Warenempfänger / consignee: Alcom Alval s.r.o. Krnovska 1397/47 79201 BRUNTAL CZECH REPUBLIC	Bestell Nr. / order no.:	OV 2300083
	Datum / date:	2023 02 15
	Auftragsbest. Nr. / order confirm no.:	224458
	Datum / date:	2023 02 15
	Lieferschein Nr. / delivery note:	89297397
	Datum / date:	2023 05 12

Produkt / product	Bedingungen / terms
Form / form: Sheet Werkstoff / material: EN AW 6082 Zustand / temper: T6 Dim. / dim.: [mm]: 1,00x1000,00x2000,00	Technische Lieferbedingungen / techn. spec.: EN 485-4 : 2020 EN 602 : 2004 Sondervorschrift / special terms:

AB-Pos. ord.-item.	BNr/Los Lot/No.	Teillos Part	Guss Nr. cast no.	Werkstoff material	Kollo packno.	Gewicht netto weight net	Stk. pcs.
04	22348/01	01	36130644	EN AW 6082	2244580033	1002 kg	185
04	22348/01	01	36130644	EN AW 6082	2244580034	1000 kg	185
04	22348/01	01	36130644	EN AW 6082	2244580035	1001 kg	185
04	22348/01	00	36130644	EN AW 6082	2244580043	1004 kg	185
04	22348/01	00	36130644	EN AW 6082	2244580044	998 kg	185
04	22348/01	00	36130644	EN AW 6082	2244580045	772 kg	142

Chemische Zusammensetzung ([%] Gewichtsanteile) / Chemical composition ([%] weight proportion (OES))												
Guss Nr. / cast no.	material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others Each	Others Total	
36130644	EN AW 6082											
	spec. min.	0,7	-	-	0,40	0,6	-	-	-	-	-	
	spec. max.	1,3	0,50	0,10	1,0	1,2	0,25	0,20	0,10	0,05	0,15	
	actual	1,1	0,33	0,10	0,46	0,8	0,02	0,08	0,03	0,01	0,02	



Abnahmeprüfzeugnis 3.1 (EN 10204)
Inspection certificate - mill certificate

Nr.: 89297397 01 / 1

Rev.: 0

Seite / page: 2 von / of 3

Datum / date: 2023 05 10

Zertifiziert nach / certified to ISO 9001, IATF 16949, EN/AS 9100, ISO 14001, ISO 50001, NADCAP, EN ISO/IEC 17025

Zugprüfung L / tensile test L										
BNr/Los	Zustand	Richtung	Tests		Rm	Rp0.2	A50			
Lot/No.	temper	direction			[MPa]	[MPa]	[%]			
				spec.min.	310	260	6			
				spec.max.	-	-	-			
22348/01	T6	L	4	from	350	292	15			
22348/01	T6	L		to	351	296	18			

Zugprüfung LT / tensile test LT										
BNr/Los	Zustand	Richtung	Tests		Rm	Rp0.2	A50			
Lot/No.	temper	direction			[MPa]	[MPa]	[%]			
				spec.min.	310	260	6			
				spec.max.	-	-	-			
22348/01	T6	LT	4	from	344	284	15			
22348/01	T6	LT		to	348	291	16			

Sonstige Prüfungen / other tests
 Maßkontrolle: OK. / Dimensional Check: OK.
 Oberfläche: OK. / Surface inspection: OK.

Bemerkungen / notes

CE
 0036
 11
 EN AW 6082 T6
 CPR Nr.: 0036-CPR-M-46-2011
 DIN EN 15088: 2005
 Verwendung für DIN EN 15088 Tabelle ZA.1 – Produkte, Verwendungszweck und System der Bescheinigung
 /
 0036
 11
 EN AW 6082 T6
 CPR Nr.: 0036-CPR-M-46-2011
 DIN EN 15088: 2005
 use for DIN EN 15088 table ZA.1 – products, structural application and system of certification



Abnahmeprüfzeugnis 3.1 (EN 10204)
Inspection certificate - mill certificate

Nr.: 89297397 01 / 1
Rev.: 0

Seite / page: 3 von / of 3

Datum / date: 2023 05 10

Zertifiziert nach / certified to ISO 9001, IATF 16949, EN/AS 9100, ISO 14001, ISO 50001, NADCAP, EN ISO/IEC 17025

Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei der Bestellung entspricht.
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order contract.

Teile des Zertifikats dürfen nicht ohne die schriftliche Genehmigung des Labors vervielfältigt werden. / Certificate shall not be reproduced except in full without the written approval of the laboratory.

Werksachverständiger / factory specialist	E-Mail / e-mail
Stöger Nico	nico.stoeger@amag.at

Herstellerland: Österreich / goods origin: The goods are of Austrian origin.
Maschinell erstellt - Gültig ohne Unterschrift / Automated - valid without being signed.



2.4. Popis vybraných svařovacích metod

- Metal Inert Gas (MIG)
- Tungsten Inert Gas (TIG)
- Laser welding

2.4.1. MIG

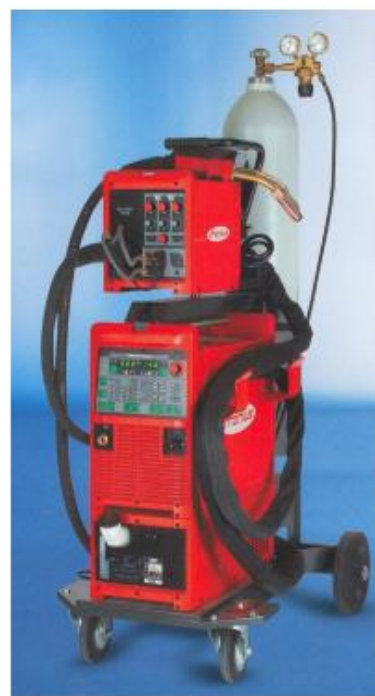
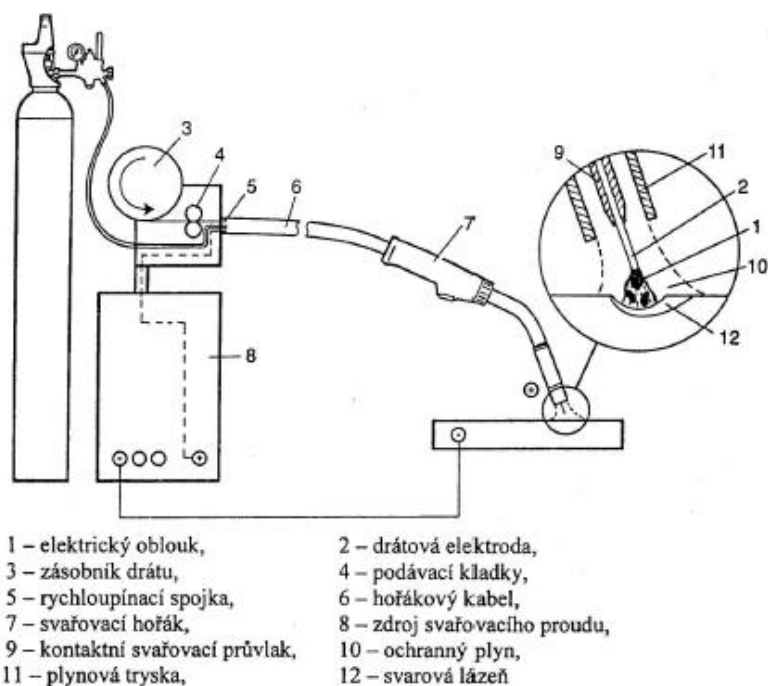
Značení metody dle normy ČSN EN ISO 4063

131 - Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu

Jedná se o tavné obloukové svařování tavící se kovovou elektrodou, kdy jsou elektrický oblouk a oblast svaru chráněny před okolní atmosférou vrstvou ochranného inertního plynu přiváděného z vnějšího zdroje.

Rozsahy základních parametrů metody MIG

Polohy svařování:	všechny
Tloušťka základního materiálu:	0,8 až 40 mm
Druh základního materiálu:	vysoce-legované oceli, Al, Cu, Ni, a jejich slitiny
Přenos kovu:	Zkratový: $I_s = 40$ až 190 A $U_{eo} = 16$ až 21 V
	Sprchový: $I_s = 120$ až 500 A $U_{eo} = 20$ až 36 V
Druh svařovacího proudu:	stejnoseměrný, polarita nepřímá (elektroda na + pólu)
Průměr svařovacích drátů:	0,6 až 2,6 mm (obvykle od 0,8 do 1,2 mm)
Statická charakteristika zdroje:	plochá
Poloautomatický proces	



Obrázek 10.: Princip metody MIG

Svařování hliníku metodou MIG je technologie s vysokou rychlostí růstu aplikací. Stále více jsou využívány výhody hliníku a jeho slitin ve stavbě letadel, lodí (např. největší celohliníkový trajekt je dlouhý 124 m a široký 40 m), kolejových vozidel pro železnice, tramvaje i podzemní dráhy, karoserií osobních automobilů, budov, obydlí na těžebních plošinách atd.

Metoda MIG je při svařování rozměrných hliníkových svařenců nejpoužívanější technologie spojování. Svařuje se v ochranné atmosféře inertních plynů, pulsním nebo konstantním proudem. Vysoká tepelná vodivost zajišťuje rychlé tuhnutí taveniny a umožňuje svařování ve všech polohách. Hořák vedeme vpřed přímočaře, nebo s mírným rozkyvem, svislé svary zdola nahoru.

Plynovou ochranu tvoří především argon, ale z hlediska jeho špatné tepelné vodivosti jsou výhodnější kombinace argonu a helia. Směs Ar-He se používá všude tam, kde jsou zvýšené požadavky na bezpečné snížení pórů a studených spojů. Při svařování větších tlouštěk lze snížit, nebo odstranit předehřev. Využitím helia se zvýší také rychlost svařování a tvar závaru je kulatější a hlubší než při použití čistého argonu. Helium však vyžaduje zvýšit napětí oblouku o 2 až 6 V a z důvodu nízké měrné hmotnosti i průtok plynu.

Svařovací zdroje by měly být vybaveny funkcí horkého startu pro snadnější natavení materiálu na začátku svaru a postupným snižováním proudu při ukončení svaru pro vyplnění koncového kráteru. Podavače se doporučují čtyř kladkové, s oválnými drážkami v podávacích kladkách a bowdeny pro vedení drátové elektrody k hořáku musí mít teflonovou vložku. Pro svařování s delším hořákovým kabelem jak 2,5 m, se doporučuje použít systém PUSH – PULL.

Výhody metody MIG

- Svařování ve všech svařovacích polohách
- Vysoká svařovací rychlost = vyšší produktivita
- Odstranění prostoje na výměnu klasických elektrod (MMA)
- Nižší nároky na čištění strusky
- Eliminace zplodin (kouře) oproti metodě MMA
- Oblouk i svařová lázeň je jasně viditelná
- Při svařování ve zkratovém přenosu – nižší vnesené teplo do svařence

Nevýhody metody MIG

- Svařovací zdroj je náročnější na obsluhu, vyšší pořizovací cena
- Vyšší nároky na údržbu
- Při špatných podmínkách ventilace je riziko odfouknutí ochranného plynu
- Relativně velké vyzářené teplo do prostoru

2.4.2. TIG

Historie metod svařování

1920 – pokusy svařovat v ochranné atmosféře N_2 , H_2 (C, W elektrody)

1926 – patent na svařování v ochranné atmosféře Ar + He (H.M. Hobard, P.K. Devers = předchůdce dnešního TIG svařování)

1941 – patent na svařování v He (Heliarc welding) Russell Meredith – Al, Mg, korozivzdorné oceli

následně byl vyvinut i první TIG hořák a jeho patent prodán společnosti Linde Division of Union Carbide

1949 – patent na MIG svařování (Glen Gibson)

1953 – MAG svařování v CO_2 (Ljubavskij, Novošilov)

Značení metody dle normy ČSN EN ISO 4063

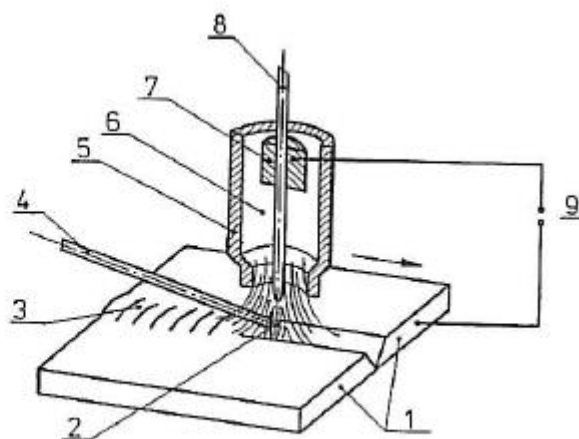
141 - Obloukové svařování wolframovou netavící se elektrodou v inertním plynu (TIG)

Jedná se o tavné svařování, při kterém se používá netavící se elektroda čistě wolframová, nebo s aktivující přísadou. Elektrický oblouk a oblast svaru je chráněna inertní atmosférou argonu, helia nebo jejich kombinací. Podle potřeby můžeme použít přídavný materiál.

Rozsahy základních parametrů metody TIG

Polohy svařování:	všechny
Tloušťka základního materiálu:	0,5 až 10 mm
Druh základního materiálu:	leg. oceli, Al, Mg, Cu, Ni, Ti, Ag, a jejich slitiny
Druh svařovacího proudu:	stejnosměrný (polarita přímá i nepřímá) i střídavý
Rozsah svařovacích proudů:	10 až 500 A
Průměry wolframových elektrod:	1 až 8 mm (obvykle od 2 do 4 mm)
Průměry přídavného materiálu:	0,8 – 4 mm (délka 1 m) plně/plněné 0,6 – 2,4 mm (cívky)
Používané ochranné plyny:	inertní (Argon, Helium)
Statická charakteristika zdroje:	strmá

1. svařovaný materiál
2. elektrický oblouk
3. svar
4. přídavný materiál
5. plynová hubice
6. ochranný plyn
7. kontaktní kleštiny
8. wolframová elektroda
9. zdroj proudu

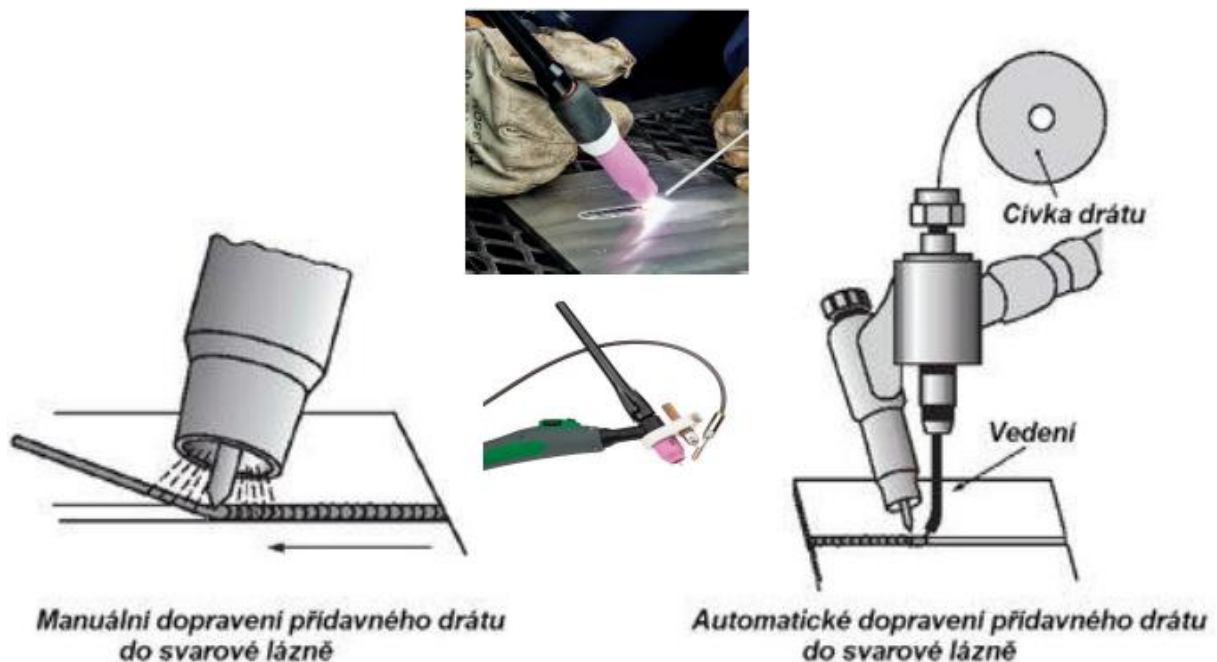


Obrázek 11.: Princip svařování netavící se elektrodou v inertním plynu-TIG

Při svařování metodou TIG hoří oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Ochranu tavné lázně i elektrody před okolní atmosférou zajišťuje inertní plyn o vysoké čistotě, nejčastěji argon nebo helium, případně jejich kombinace. Inertní plyn je nutné používat především kvůli ochraně wolframové elektrody a svarové lázně vysoce aktivních kovů proti působení vzdušného kyslíku. Svařování můžeme realizovat ručním způsobem s přídavným materiálem ve formě kusového drátu, nebo automatickým způsobem za pomoci podavače drátu s konstantní, či proměnnou rychlostí podávání drátu, který je u této aplikace navinutý na cívce.

Obecně lze svařování rozdělit dle druhu proudu na svařování střídavým proudem pro hliník, hořčík + jejich slitiny a svařování stejnosměrným proudem pro středně legovanou/vysoce legovanou ocel, měď, nikl, molybden a další kovy. Pro svařování uhlíkové oceli se metoda TIG používá jen výjimečně, z důvodu produktivity a vzniku vad ve svaru (póry). Svařování netavící se wolframovou elektrodou se používá i pro spojování obtížně svařitelných materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku, jako jsou např. titan a zirkon.

Touto metodou můžeme svařovat i různorodé materiály, jako jsou ocel s mědí, bronzem či niklovými slitinami a návary v oblasti renovací (nástrojové oceli, niklové a kobaltové tvrdonávary). Aplikace svařování metodou TIG má vzrůstající tendenci, což se připisuje kvalitě takto zhotovených spojů, operativnosti řízení procesu svařování a vysokému stupni robotizace, automatizace.



Obrázek 12.: Možnosti svařování metodou TIG

Výhody metody TIG

- Lze svařovat malé tloušťky materiálu
- Dobrá „čitelnost“ tavné lázně pro svářeče
- Ruční svařování se využívá v opravárenství, mechanizované svařování se používá v sériové výrobě, univerzální metoda svařování pro většinu druhů materiálů
- Velmi dobré ovládání svarové lázně v nucených polohách
- Možnost svařovat s i bez přídavného materiálu
- Nevzniká struska ani rozstřík svarového kovu

Nevýhody metody TIG

- Malý odtavovací výkon
- Nízká rychlost svařování
- Omezená tloušťka svařovaných materiálů
- Snížená možnost montážního svařování z důvodu použití ochranného plynu
- Vyšší cena svařovacího zdroje AC/DC
- Vyšší požadavky na svářeče (manuální zručnost + dodržování technologické kázně)

2.4.3. Laser welding

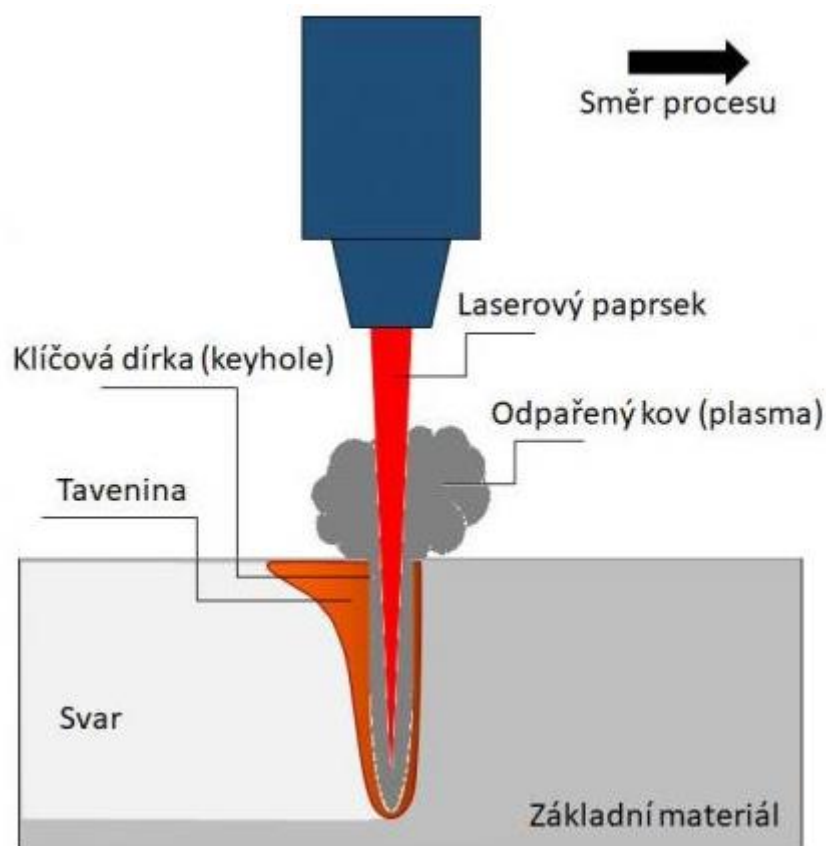
Značení metody dle normy ČSN EN ISO 4063

521 – Svařování pevnolátkovým laserem

Jedná se o svařování průchozím paprskem (keyhole welding). Hustoty výkonu laseru jsou větší než $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, část materiálu v ohnisku se vypaří, vznik plazmatu usnadňuje absorpci tepla – skokové zvýšení absorpce. V místě svaru vzniká jehlovitá štěrbina. Absorpce energie až 95 %.

Ruční laserové svařování

Jde o jednoznačný posun v oblasti spojování materiálů. Efektivita laserového svařování ve strojovém provedení je známa již desítky let. Laser má při svařování tenkých materiálů v porovnání s metodou TIG daleko lepší výsledky. Největší rozdíl je v rychlosti svařování u tenkých materiálů do 2 mm, kde lze dosáhnout i 10x vyšší rychlosti. Nezbytnou součástí laserové technologie je bezpečnost práce.



Obrázek 13.: Princip metody laserového svařování průchozím paprskem (keyhole)

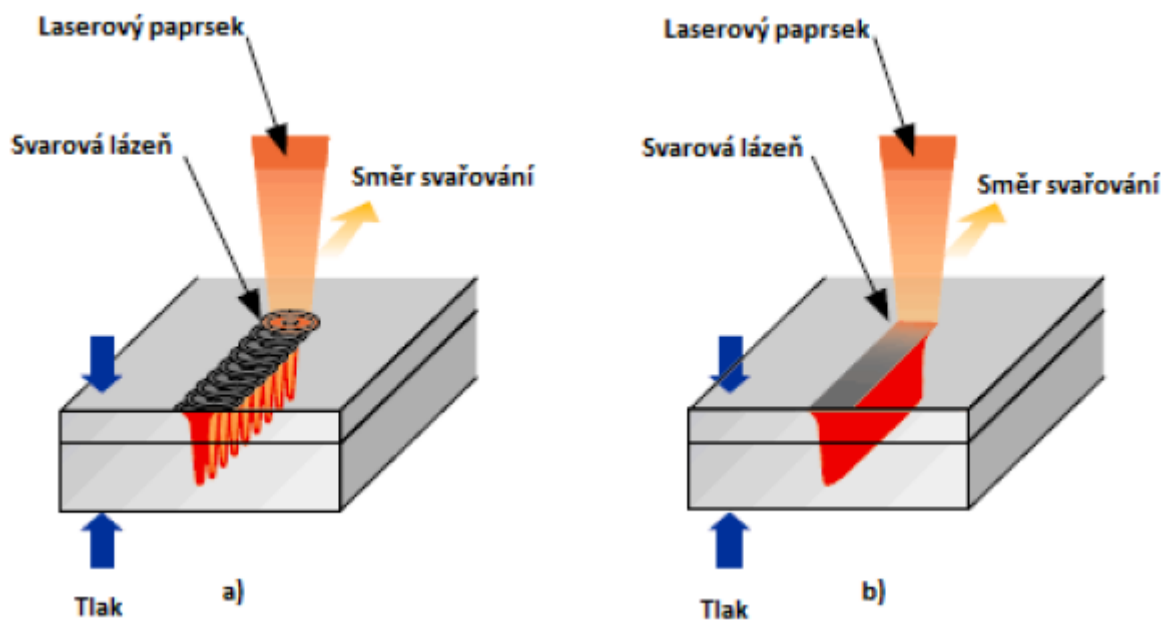
Rozsahy základních parametrů ručního svařování laserem

Tloušťka základního materiálu:	0,1 až 5 mm
Druh základního materiálu:	nerez, hliník, uhlíkaté oceli, mosaz
Výkon:	60-2000 W
Vlnová délka:	1070 nm \pm 10
Frekvence:	1-300 Hz
Modulace pulsu:	1-50 kHz
Šířka svaru:	0,2-5 mm
Příkon/max:	4,8 kW
Podavač drátu:	1-40 mm/s

Laserové svařování využívá technologii nazývanou Keyhole, neboli klíčová dírka, kdy je svařovaný materiál taven po stranách dopadajícího paprsku laseru a ve středu vzniká při sublimaci kapsa s výpary. S pohybem paprsku laseru se posouvá i tato kapsa a její stopa je zalévána tavnou lázní. [15]

Metoda pulzního laserového svařování, paprsek laseru pracuje s vysokofrekvenčními pulzy, kdy každý tento pulz vytváří svařovanou oblast a poté následuje další pulz. V celku tyto pulzy vytváří souvislou čočku, ale vnesené teplo do svařence je menší, což má omezit vznik vad ve svaru.

Kontinuální laserové svařování se využívá pro zhotovení hlubokých svarů u slitin, které jsou více citlivé na trhliny. [16]



Obrázek 14.: Znázornění pulzního (a) a kontinuálního (b) laserového svařování [16]

Výhody ruční metody svařování laserem

- Vysoká produktivita práce
- Minimální vnesené teplo (velmi malá tepelně ovlivněná oblast, malé deformace)
- Skvělé výsledky při svařování materiálů od 0,2 mm
- Jednoduché nastavení parametrů
- Snadné bodování (mikrobodování) materiálů
- Nastavitelná šířka svaru a hloubka průvaru
- Možnost čištění svaru laserem

Nevýhody ruční metody svařování laserem

- Bezpečnost práce
- Vysoké pořizovací náklady zdroje
- Nutnost precizního sesazení svařovaných dílů
- Omezená hloubka svaru

2.5. Statická vs dynamická instrumentovaná tahová zkouška

Tahová zkouška je celosvětově nejdůležitější a nejčastěji používanou mechanicko-technologickou zkouškou. Slouží ke stanovení pevnostních a deformačních charakteristik materiálů, které mají zásadní význam při navrhování a konstrukci součástí, strojů, zboží, vozidel i staveb.

Cílem této zkoušky je spolehlivě a opakovaně stanovit charakteristické materiálové vlastnosti v tahu a dosáhnout celosvětové srovnatelnosti.

Jednoosá zkouška tahem je metoda, která umožňuje stanovení charakteristických hodnot, jako je mez kluzu, smluvní mez kluzu, pevnost v tahu, či tažnost. Pro některé oceli může stanovit i dolní mez kluzu, prodloužení na bodě kluzu a prodloužení při maximální síle.

Tahové zkoušky se provádí dle mezinárodně uznávaných norem.

- **EN ISO 6892-1** Kovové materiály – Zkouška tahových vlastností za pokojové teploty
- **EN ISO 6892-2** Kovové materiály – Zkouška tahových vlastností za pokojové teploty
- **EN ISO 6892-3** Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 3: za nízké teploty
- **EN ISO 6892-4** Kovové materiály – Zkouška tahem v kapalném hélíu

Kromě těchto norem ISO se používají také národní normy, včetně evropské normy EN, americké normy ASTM, japonské normy JIS a čínské normy GB/T. Ve specializovaných oblastech jako je letectví mohou být důležité, nebo dokonce vyžadovány i další specifické normy.

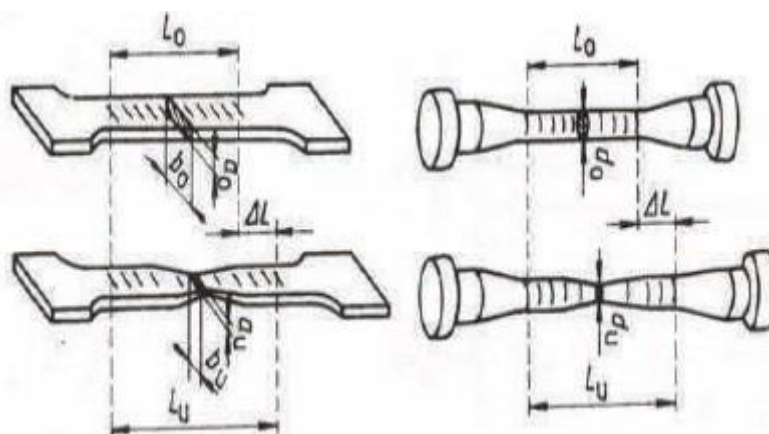
Tahová zkouška kovových materiálů vychází především z norem EN ISO 6892-1 a ASTM E8. Obě tyto normy specifikují tvary zkušebních vzorků i zkušební postup. Cílem těchto norem je definovat a zavést zkušební postup tak, aby i při použití různých zkušebních metodik zůstaly vyhodnocované charakteristické hodnoty opakovatelné a správné.

Klíčové charakteristické hodnoty zkoušek tahem kovových materiálů podle ISO 6892-1:

- **Mez kluzu** – horní a dolní mez kluzu (R_{eH} a R_{eL})
- **Prodloužení na mezi kluzu** – prodloužení na výrazné mezi kluzu měřené průtahoměrem, protože jej lze určit pouze pomocí průtahoměru ($R_{p0,2}$)
- **Prodloužení na mezi kluzu** – prodloužení na výrazné mezi kluzu měřené průtahoměrem, protože jej lze určit pouze pomocí průtahoměru (A_e)
- **Mez pevnosti v tahu** (R_m)
- **Plastické prodloužení při maximálním zatížení** (A_g)
- **Tažnost po přetržení** (A), přičemž významnou roli hrají normativní specifikace týkající se měřené délky

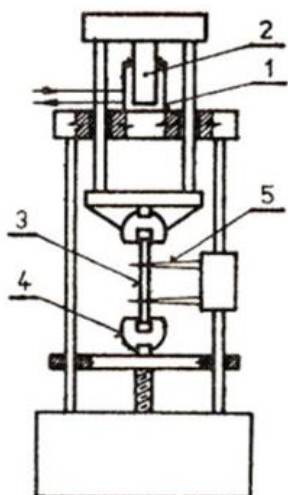
2.5.1. Statická tahová zkouška

Jedná se o jednu z nejzákladnějších mechanických zkoušek, ze které jsme schopni zjistit základní mechanické vlastnosti daného materiálu. Principem statické tahové zkoušky je zjištění závislosti působící síly na poměrném prodloužení zkušební vzorku. Průběh zkoušky spočívá v pozorování chování zkušební vzorku o počátečním průřezu S_0 a délce L_0 . V průběhu zkoušky vzorek podléhá plynule se měnícímu zatížení síly F , čímž dochází k jeho deformaci až do jeho přetržení. V důsledku tohoto silového působení vzniká v materiálu napětí, které je charakterizováno základním vztahem popisujícím závislost deformace a síly. Tento vztah je známý pod názvem Hookův zákon. V průběhu zkoušky jsou veličiny zaznamenávány do grafu, ze kterého lze vyčíst důležité charakteristické vlastnosti daného materiálu. Jedná se o mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, či kontrakce. Zkušební vzorky mají nejčastěji kruhový, nebo obdélníkový průřez a jsou normalizovány.



Obrázek 15.: Tvar zkušební vzorků pro tahovou zkoušku [18]

Trhací stroje pro tahovou zkoušku jsou jednoúčelové, nebo univerzální pro realizaci zkoušek ohybem či tlakem. Trhací síla u těchto strojů je většinou vyvozena hydraulickým válcem. Stroj dále disponuje záznamovým zařízením (počítačem), který zaznamenává závislost zatěžující síly s poměrným prodloužením zkušební vzorku do tzv. diagramu tahové zkoušky. [19]



Hydraulický univerzální zkušební stroj

- 1 – hydraulický válec
- 2 – píst
- 3 – zkušební těleso
- 4 – upínací hlava
- 5 – snímač prodloužení zkušebního tělesa

Obrázek 16.: Schéma hydraulického univerzálního zkušebního stroje [19]

Tahová zkouška pro kovové materiály je normalizována dle ČSN EN 10002-1. Na zkušební vzorek se působí stále se zvětšující silou ve směru jeho podélné osy až do okamžiku, kdy dojde k jeho přetržení. Trhací zkouška je nejrozšířenější statickou zkouškou. Je požadována u téměř všech technických materiálů, jelikož jejím provedením získáme základní parametry potřebné pro výpočet konstrukčních prvků, abychom byli schopni vhodně zvolit základní materiál pro výrobu dané součásti. Tahové zkoušky se neprovádí na hotových dílech, ale na zkušebních vzorcích, které jsou taktéž rozměrově i tvarově normalizovány. Vlastní měřená délka L_0 závisí na průřezu zkušební vzorku a je při kruhovém průřezu vzorku u dlouhé tyče $10 \cdot d_0$ a u krátké tyče $5 \cdot d_0$ (d_0 = průměr zkušební tyče). [21]

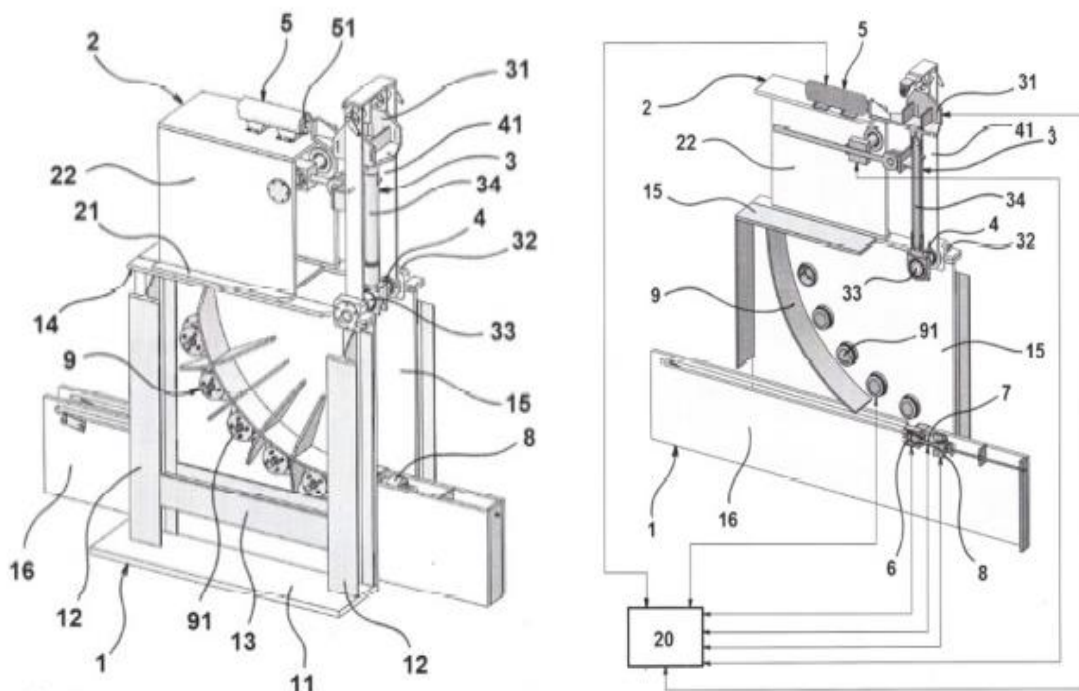
Tahovou zkouškou zjistíme pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a zúžení zkoušeného materiálu. Při všech statických zkouškách vzniká ve zkušebních vzorcích napětí, což je míra vnitřních sil vznikajících v materiálu působením sil vnějších. Toto napětí dělíme na normálové a tečné. Podíl síly se skutečnou plochou průřezu v průběhu zkoušky nazýváme skutečné napětí. Běžně však používáme hodnoty smluvních napětí, jelikož nepočítáme se změnou průřezu vzorku v průběhu zkoušky a zatížení vztahujeme k původnímu S_0 . Během celé zkoušky se zaznamenává zatěžující síla a prodloužení vzorku. V protokolu musí být vždy uvedena rychlost deformace, teplota a vlhkost okolí.

2.5.2. Dynamická tahová zkouška

Dynamická tahová zkouška se provádí na rychlých trhacích strojích např. Perkusní kyvadlové rázové kladivo, kde snímáme průběh zatěžovací síly a prodloužení pomocí snímačů. Touto metodou můžeme jednoduše získat dynamické materiálové charakteristiky.

Zkušební vzorky na dynamickou tahovou zkoušku jsou prakticky totožné se vzorky na statickou tahovou zkoušku, přizpůsobují se možnostem zkušebního stroje.

Zkouška spočívá v tom, že upnutý plochý materiálový vzorek je nárazníkovou hlavici kyvadla přetržen. [22]



Obrázek 17.: Schéma Perkusního kyvadlového rázového kladiva [22]

Jedná se o modulově stavěnou konstrukci, skládající se z rozebíratelně spojitelného spodního rámu 1 a horního rámu 2, v nichž jsou nainstalovány a upevněny konstrukční a funkční uzly, kterými jsou: kyvadlo 3 s nárazovou hlavici 31, aretační zařízení 4 pro ustavení kyvadla 3 ve výchozí poloze, startovací (odpalovací) zařízení 5, upínací mechanismus 6 zkušební vzorku 7, propojeného s měřícím systémem 8 a brzdící zařízení 9 pro zajištění zastavení kyvadla 3 po nárazu na zkušební vzorek 7. Všechny tyto konstrukční uzly jsou elektronicky spojeny s řídicím a vyhodnocovacím blokem 20, realizovaným formou PC vybaveného speciálním software. Řídicí a vyhodnocovací blok 20 pak zejména zajišťuje řízení velikosti

tlaku ve startovacím zařízení 5, kontrolu a řízení polohy kyvadla 3, ovládání aretačního zařízení 4, řízení tlaku v brzdícím zařízení 9, záznam rychlosti kyvadla 3 při nárazu na zkušební vzorek 7, záznam síly v průběhu destrukce zkušební vzorku 7, kontrolu předpětí v upnutí zkušební vzorku 7 a záznam deformace zkušební vzorku 7 v průběhu jeho destrukce. Po přetržení materiálového vzorku vstupuje do činnosti brzdící zařízení 9, jehož činnost je založena na funkci soustavy brzdících vzduchových válců 91 umístěných podél trajektorie pohybu hlavice 31 kyvadla 3 po nárazu na zkušební vzorek 7. Mezi vnějšími bočnicemi 15 spodního rámu 1 jsou v jejich spodní části upevněny vnitřní bočnice 16, v nichž jsou ukotveny upínací mechanismus 6 zkušební vzorku 7 propojeného s měřícím systémem 8. Ustavení výchozí polohy hlavice 31 kyvadla 3 nejen v základní vertikální poloze, ale podle druhu a velikosti zkušební vzorku 7 a požadovaného typu zkoušky v různých pozicích s možností volby úhlového intervalu o velikosti $0,5^\circ$ umožňuje polohovací mechanismus, který je umístěn v horní části rámu 1 na úrovni jeho horní příruby 14, kde je upevněn nosný kozlík 32 středové otočné hřídele 33 kyvadla 3 opatřený aretačním zařízením 4. Spodní rám 1 je vybaven standardním zvedacím zařízením, pomocí něhož je hlavice 31 kyvadla 3 zvedána po ukončení zkoušky do výchozí polohy. Fixace kyvadla 3 ve výchozí, tedy startovací poloze je na začátku zkoušky zajištěna aretačním mechanismem 4 připevněným v horním rámu 2. Pro zajištění ustavení kyvadla 3 do výchozí polohy je aretační zařízení 4 propojeno s třmenem 41, jehož boční ramena jsou vedena podél nosného ramena 34 kyvadla 3, přičemž aretační zařízení 4 je dále vybaveno standardním odjišťovacím mechanismem 42, který zabezpečuje uvolnění hlavice 31 kyvadla 3 po spuštění zkoušky. Na horní stěně krytu 22 je upevněno hydro-pneumatické startovací zařízení 5 ustavené tak, že 5 jeho výstupní nárazníkový člen 51 pro dodání prvotního pohybového impulsu kyvadlu 3 je umístěn na úrovni hlavice 31 kyvadla 3, pokud je kyvadlo 3 ustaveno v horní úvrati, tedy ve výchozí spouštěcí poloze. Při zkoušce se dle známých parametrů zkušební vzorku 7 nastaví pomocí aretačního zařízení 4 a dle výpočtů provedených řídicím a vyhodnocovacím blokem 20 výchozí poloha kyvadla 3 a ve startovacím zařízení 5 a v brzdícím zařízení 9 se nastaví a seřídí tlaky provozních médií. Poté se ustaví zkušební vzorek 7 v upínacím mechanismu 6, čímž je zkouška připravena k odstartování. Po vydání pokynu z řídicího a vyhodnocovacího bloku 20 se pomocí odjišťovacího mechanismu 42 uvolní kyvadlo 3, kterému je současně dodán nárazníkovým členem 51 startovacího zařízení 5 rychlostní pohybový impuls, a tím dojde k jeho uvedení do činnosti nikoliv pouze gravitačním efektem, čímž je dosaženo jeho řádově vyšších rychlostí při dopadu na zkušební vzorek 7. Po nárazu na zkušební vzorek 7 je pohyb kyvadla 3 zastaven pomocí brzdícího zařízení 9, čímž je zkouška ukončena a v řídicím a vyhodnocovacím bloku 20 je možno prověřit veškeré hodnoty získané měřícím systémem 8. Poté je možné přistoupit k přípravě další zkoušky. [22]

3. Experiment

Pro zhotovení zkušebních vzorků v této práci jsem zvolil jakost hliníkové slitiny EN AW 6082, která se v automobilovém průmyslu využívá k výrobě komponent karoserie, předního i zadního nárazníku, kapoty nebo střechy vozidla. Tyto mechanické části vozidla jsou při dopravní nehodě nejčastěji poškozeny. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně těchto komponent se stále častěji hledají možnosti jejich oprav než samotná výměna celého prvku.

Jakost přídavného materiálu pro všechny níže popsané metody svařování je OK 5183 AlMg4.5Mn. Tento přídavný materiál je mezi konstruktéry při svařování hliníkových slitin velice oblíbený z důvodu vysoké pevnosti svaru, kvůli svému vysokému obsahu hořčíku. Nevýhodou tohoto přídavného materiálu je vyšší křehkost svaru při dynamickém namáhání. Z tohoto důvodu jsem zvažoval použití jakosti OK 4043 AlSi5, který nám nabízí vyšší plasticitu svaru, ale nižší pevnost díky absenci hořčíku. Toto hodnocení nebylo cílem mé práce, a tak jsem zůstal u jakosti OK 5183 AlMg4.5Mn, který je dostupný v modifikaci pro všechny zvolené metody svařování z důvodu objektivního posuzování při laboratorních testech.

Jako ochranný plyn pro všechny metody svařování jsem zvolil technický argon v čistotě 4.8 (99,998 %), který lze využít i při svařování nekonvenčními metodami, mezi které laser bezpochyby patří, aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot v porovnání s ostatními metodami svařování.

3.1. Příprava vzorků pro tahové zkoušky

Dělení materiálu

První operace, která byla společná pro všechny metody svařování, bylo rozdělení vstupního materiálu. Tento materiál byl zakoupen u fi. Alcom Alval s.r.o. ve formátu 1000 x 2000 mm včetně inspekčního certifikátu, který je zobrazen v kapitole **2.3.5.** této práce. Následovalo jeho dělení na předem definované rozměry dle možností zkušebních strojů pro statickou a dynamickou tahovou zkoušku na tabulových nůžkách od fi. Digep viz. **obr. 18.** Po nastříhání vstupního materiálu na požadované rozměry následovalo mechanické odstranění otřepů za pomoci pásové brusky, aby nedošlo k poranění při manipulaci. Následně byly tyto polotovary distribuovány na jednotlivá pracoviště dle zvolené metody svařování.



Obrázek 18.: Tabulové nůžky od fi. Digep – příprava vzorků pro svařování

Před zahájením samotné operace svařování, bez ohledu na zvolenou metodu svařování, bylo nezbytné připravit svarové plochy a odstranit tenkou vrstvu oxidu hlinitého (Al_2O_3), který se tvoří na povrchu součástí z hliníkových slitin kvůli své vysoké afinitě ke kyslíku. Vzhledem k velmi malé tloušťce zkušebních vzorků (1 mm) není nutné na svarových plochách připravit úkos, nebo předehřívat, jak je uvedeno v příslušných normách pro větší tloušťky základních materiálů z hliníkových slitin. Tenkou vrstvu Al_2O_3 je nutné odstranit těsně před zahájením samotné operace svařování, jelikož se začíná téměř okamžitě tvořit znovu a pokud by nedošlo k jejímu odstranění, mohla by díky své nerozpustnosti v hliníku zásadně ovlivnit kvalitu svarového spoje vlivem oxidických vměstků. Tato vrstva byla odstraněna mechanicky, pomocí nerezového kartáče. Další způsob, který se hojně využívá k odstranění oxidu hlinitého z povrchu svařovaných součástí je chemické moření, kdy se polotovary namáčí do lázně na bázi hydroxidu sodného, který tuto vrstvu také rozpouští. Po očištění následovalo svařování požadovanými metodami.

3.1.1. Svařování zkušebních vzorků metodou MIG

Pro zhotovení zkušebních vzorků metodou MIG, byl využit svařovací zdroj od rakouské firmy Fronius typu TPS 400i, který obsluhoval zkušený státní svářeč s platnou kvalifikací dle normy ČSN EN ISO 9606-2 131 T BW 23 S t2 D40,0 PA ss nb.

Parametry svařování metodou MIG

- | | |
|------------------------------------|-----|
| • Druh svařovacího proudu | AC |
| • Svařovací proud [A] | 40 |
| • Svařovací napětí [V] | 10 |
| • Průměr přídatného materiálu [mm] | 1,2 |
| • Svařovací rychlost [cm/min] | 50 |
| • Průtok ochranného plynu [l/min] | 10 |



Obrázek 19.: Svařovací zdroj Fronius TPS 400i

3.1.2. Svařování zkušebních vzorků metodou TIG

Pro zhotovení zkušebních vzorků metodou TIG, byl využit svařovací zdroj od rakouské firmy Fronius typu TPS 400i, který obsluhoval zkušený státní svářeč s platnou kvalifikací dle normy ČSN EN ISO 9606-2 141 T BW 23 S t2 D40,0 PA ss nb.

Parametry svařování metodou TIG

- | | |
|------------------------------------|-----|
| • Druh svařovacího proudu | AC |
| • Svařovací proud [A] | 40 |
| • Svařovací napětí [V] | 10 |
| • Průměr přídavného materiálu [mm] | 1,2 |
| • Svařovací rychlost [cm/min] | 20 |
| • Průtok ochranného plynu [l/min] | 10 |



Obrázek 20.: Svařovací zdroj Fronius iWave 400i

3.1.3. Svařování zkušebních vzorků metodou Laser

Pro zhotovení zkušebních vzorků metodou Laser, byl využit ruční svařovací zdroj od firmy DXTECH typu MCCW1500 Fiber laser machine, který obsluhoval zkušený státní svářeč s platnou kvalifikací dle normy ČSN EN ISO 9606-2 521 P BW 23 S t2 PA ss nb.

Parametry svařování ruční metodou Laser

- | | |
|------------------------------------|----------------|
| • Svařovací výkon [W] | 800 |
| • Typ laseru | kontinuální |
| • Laserový zdroj | vláknový laser |
| • Průměr přídatného materiálu [mm] | 1,2 |
| • Svařovací rychlost [cm/min] | 80 |
| • Průtok ochranného plynu [l/min] | 10 |



Obrázek 21.: Svařovací zdroj DXTECH-MCCW1500 Fiber laser machine

Po zhotovení zkušebních vzorků na jednotlivých svařovacích pracovištích bylo nutné svařence díky své vysoké tepelné vodivosti nechat dostatečně vychladnout, aby bylo možné provést vizuální kontrolu svarových spojů. Tato kontrola je nezbytnou součástí, která následuje po operaci svařování, abychom předešli nepřesnostem při samotné realizaci tahových zkoušek vlivem špatného provedení operace svařování a následných povrchových vad svaru. Vizuální kontrola svarových spojů byla provedena dle příslušné normy ČSN EN ISO 10042. Provedl ji kvalifikovaný personál s platnou kvalifikací dle ČSN EN ISO 9712:2013.

Tato kontrola odhalila vady na počátku a konci svaru v podobě koncových kráterů. Tyto oblasti svarového spoje byly při následné operaci frézování odstraněny, a tak nebylo nutné svarové spoje nijak dále opravovat, abychom zbytečně nevnášeli další teplo do svařenců a neovlivňovali tak znovu základní materiál. V praxi se běžně používají nájezdové/dojezdové příložky, na kterých začíná/končí svarový spoj, aby nedošlo k těmto vadám. Následně se tyto příložky odříznou a nejsou součástí svařence.



Obrázek 22.: Svařené zkušební vzorky metodami TIG, MIG, Laser

Porovnání jednotlivých metod svařování

U všech metod svařování byl použit přídavný materiál i ochranný plyn stejné jakosti, aby byly výsledky tahových zkoušek objektivní. Při porovnání parametrů svařování jednotlivých metod z časového hlediska, je jednoznačně nejrychlejší metoda svařování Laser s rychlostí svařování až 80 cm/min, která je až čtyřnásobně vyšší oproti konvenční metodě TIG s ručním podáváním drátu.

Obrábění zkušebních vzorků



Obrázek 23.: Obráběcí centrum Kovosvit Mas typu MCV1400 Quick

Následně bylo nutné upravit konturu zkušebních vzorků dle příslušné normy ČSN EN ISO 4136 a možnostem zkušebních strojů pro statickou a dynamickou tahovou zkoušku. K tomuto účelu bylo využito obráběcí centrum od české firmy Kovosvit Mas typu MCV1400 Quick s řídicím systémem od německé firmy Heidenhain typu TNC 620. V CAD programu jsem vytvořil modely zkušebních vzorků pro jednotlivé zkoušky, které jsem následně nahrál do CAM programu, kde jsem vytvořil programy pro obrobení svařenců. Tyto programy se nahrály do výše uvedeného obráběcího centra a následovalo samotné obrobení. Výsledkem těchto operací byly hotové zkušební vzorky dle výše uvedené normy v požadovaných přesnostech, kompatibilní s možnostmi zkušebních strojů pro statickou a dynamickou tahovou zkoušku v laboratoři VVCD v Doubravících. Zároveň došlo k odstranění nepřijatelných vad svaru ve formě koncových kráterů, které nám odhalila vizuální kontrola po svařování.



Obrázek 24.: Zkušební vzorky pro tahové zkoušky

3.2. Vyhodnocení dat ze statické tahové a dynamické tahové zkoušky

Statické i dynamické tahové zkoušky byly prováděny v laboratořích VVCD v Doubravících za asistence kolegů z Univerzity Pardubice a vedoucího mé diplomové práce pana Ing. Petra Hanuse, Ph.D.

3.2.1. Statická tahová zkouška

Statické tahové zkoušky byly provedeny na stroji od firmy Zwick/Roell typu Z030. Před zahájením testování svařovaných zkušebních vzorků jsme nejprve otestovali referenční vzorky materiálu, které nebyly svařovány ze dvou polotovarů, ale pouze obrobeny z celistvého základního materiálu, za účelem ověření a porovnání mechanických vlastností základního materiálu, které jsou uvedeny na inspekčním certifikátu. Na 3 ks referenčních vzorků jsme naměřili průměrnou mez pevnosti $R_m = 337,24 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ a smluvní meze kluzu $R_{p0,2} = 283,07 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Inspekční certifikát udává minimální hodnoty meze pevnosti $R_m = 310 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ a smluvní meze kluzu $R_{p0,2} = 260 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Tímto způsobem jsme si ověřili správnost jakosti základního materiálu pro výrobu testovacích vzorků.



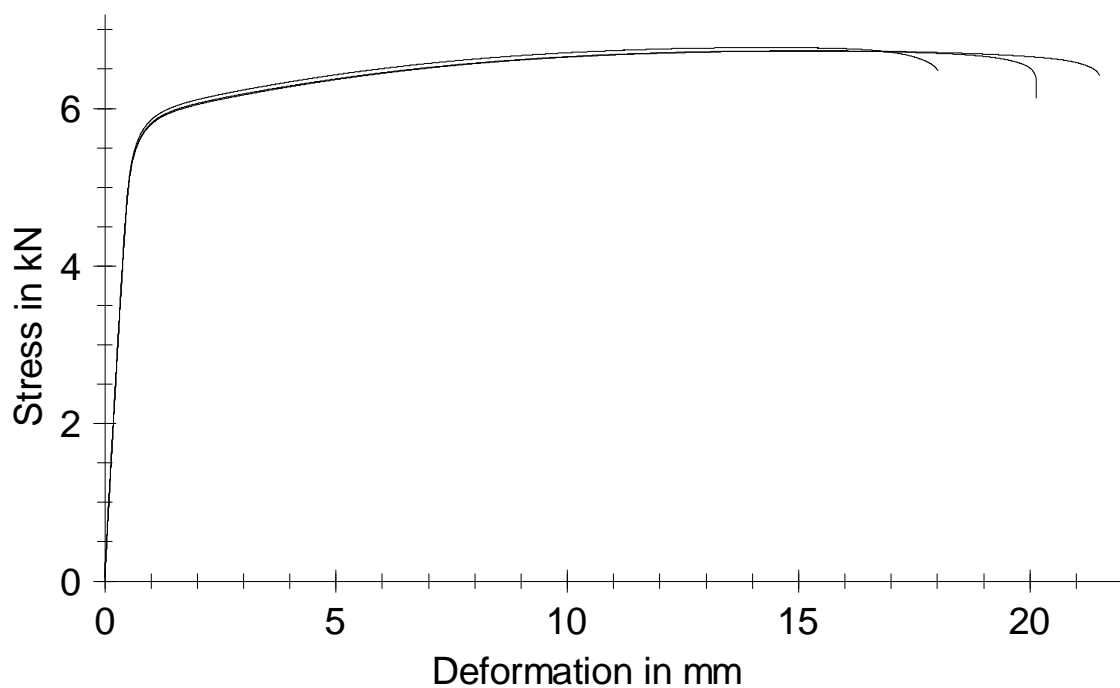
Obrázek 25.: Zkušební stroj Zwick/Roell typu Z030

3.2.1.1. Referenční vzorky materiálu-naměřená data

Výsledky testů:

	Rp 0,1	Rp 0,2	Rm
vzorek	N/mm²	N/mm²	N/mm²
1	274,62	285,26	338,67
2	269,91	281,72	336,59
3	271,51	282,22	336,45

Graf:



Statistika:

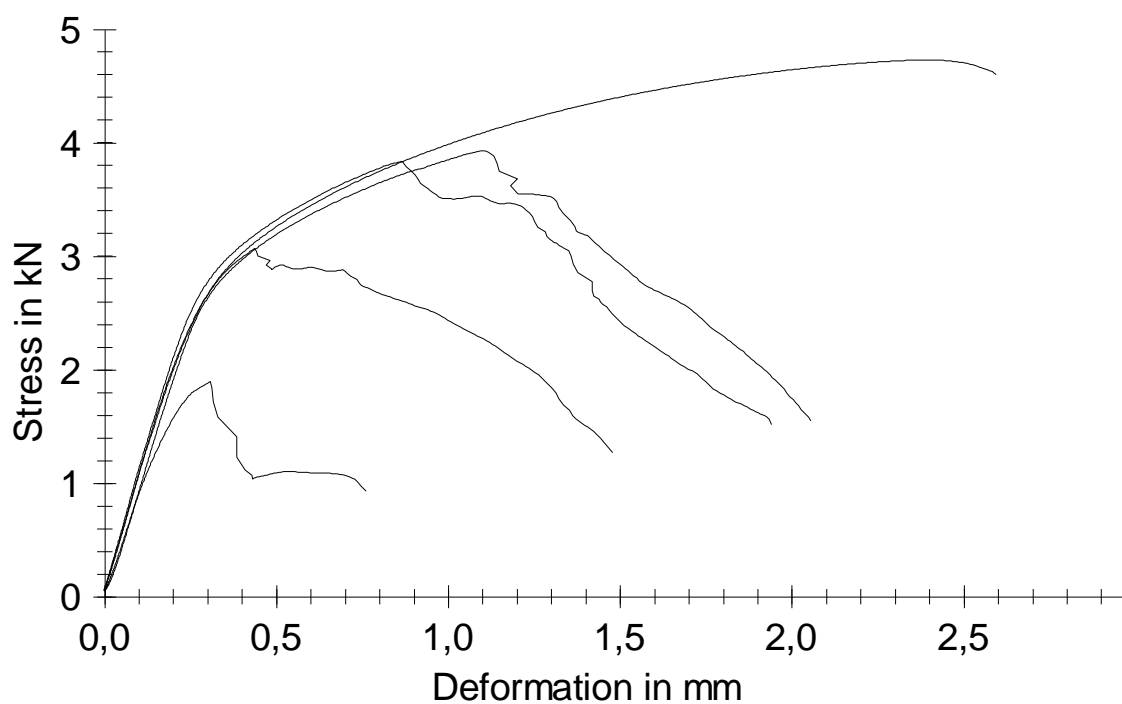
	Rp 0,1	Rp 0,2	Rm
n = 3	N/mm²	N/mm²	N/mm²
x	272,01	283,07	337,24

3.2.1.2. MIG-naměřená data

Výsledky testů:

vzorek	Rp 0,1 N/mm ²	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²
1	152,18	144,91	-
2	157,78	173,44	191,72
3	154,49	171,27	236,54
4	83,75	59,40	-
5	153,69	168,62	196,49

Graf:



Statistika:

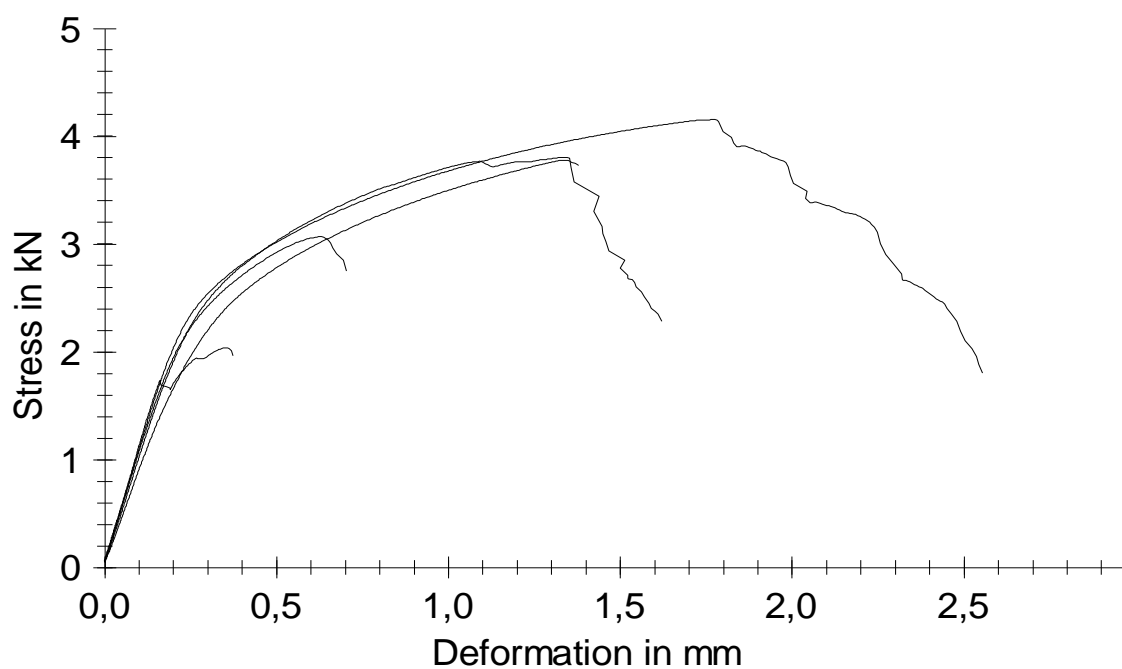
n = 5	Rp 0,1 N/mm ²	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²
x	140,38	143,53	208,25

3.2.1.3. TIG-naměřená data

Výsledky testů:

vzorek	Rp 0,1 N/mm ²	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²
1	130,82	148,20	188,94
2	139,71	155,51	207,69
3	134,52	150,28	153,43
4	99,21	-	101,85
5	141,29	158,91	190,24

Graf:



Statistika:

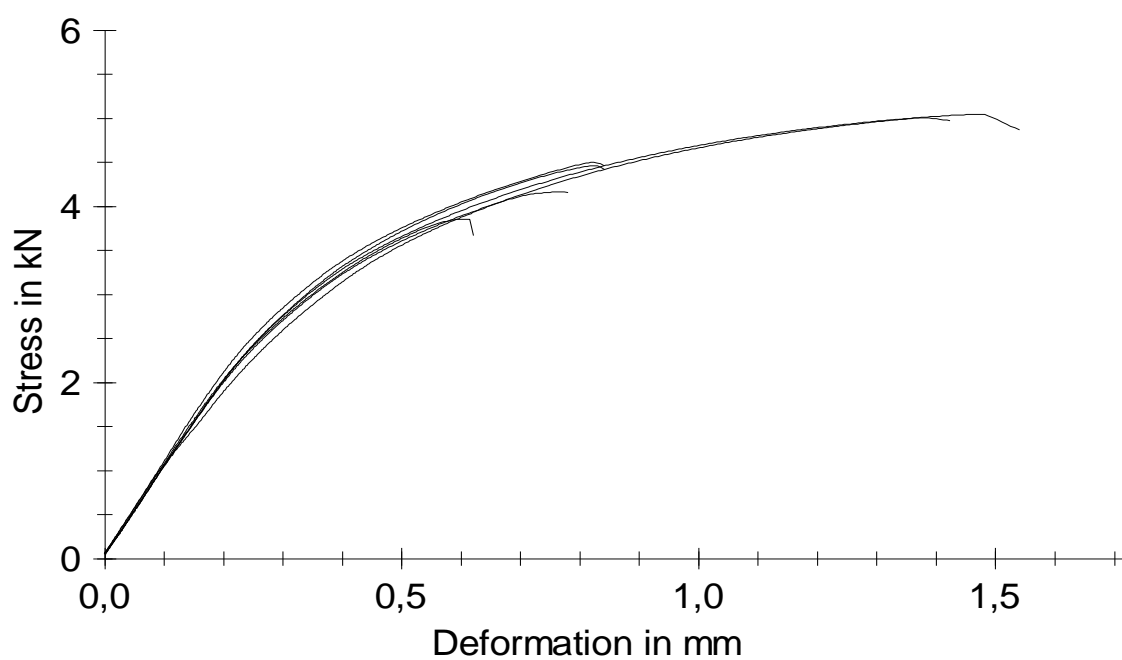
n = 5	Rp 0,1 N/mm ²	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²
x	129,11	153,22	168,43

3.2.1.4. Laser-naměřená data

Výsledky testů:

	Rp 0,1	Rp 0,2	Rm
vzorek	N/mm²	N/mm²	N/mm²
1	183,24	209,69	223,08
2	174,71	189,16	192,74
3	175,67	200,71	208,22
4	182,75	208,47	224,82
5	176,85	204,24	250,36

Graf:



Statistika:

	Rp 0,1	Rp 0,2	Rm
n = 5	N/mm²	N/mm²	N/mm²
x	179,05	203,04	225,26

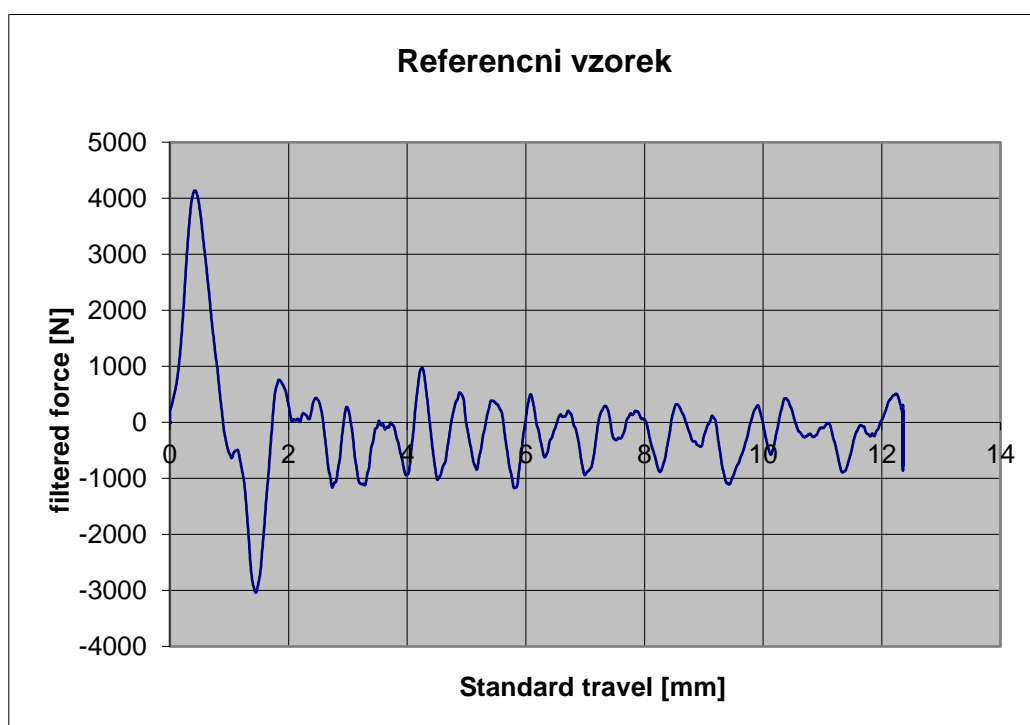
3.2.2. Dynamická tahová zkouška

Dynamické tahové zkoušky byly provedeny na stroji od firmy Zwick/Roell typu RKP450.



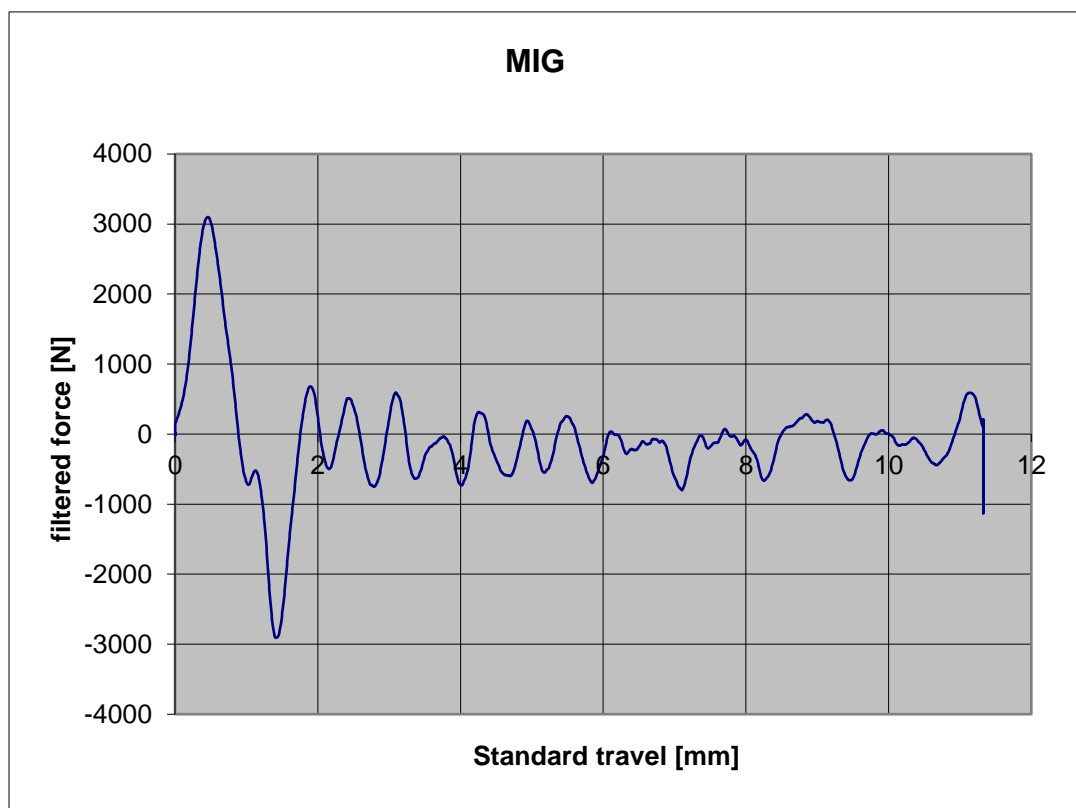
Obrázek 26.: Zkušební stroj Zwick/Roell typu RKP450

3.2.2.1. Referenční vzorky materiálu-naměřená data



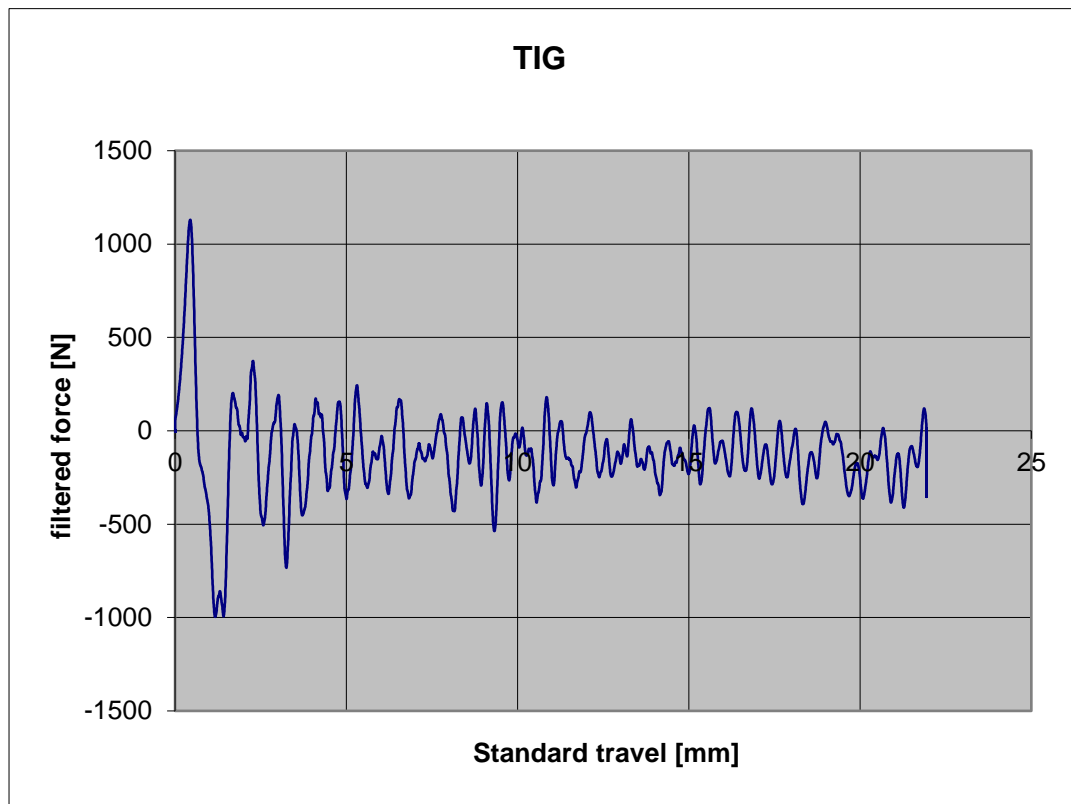
	Teoretická nárazová rychlost	Celková hmotnost	Pracovní kapacita	Fmax	Sm
n = 3	m/s	kg	J	N	mm
x	5,24	32,85	450,18	4141,64	0,42

3.2.2.2. MIG-naměřená data



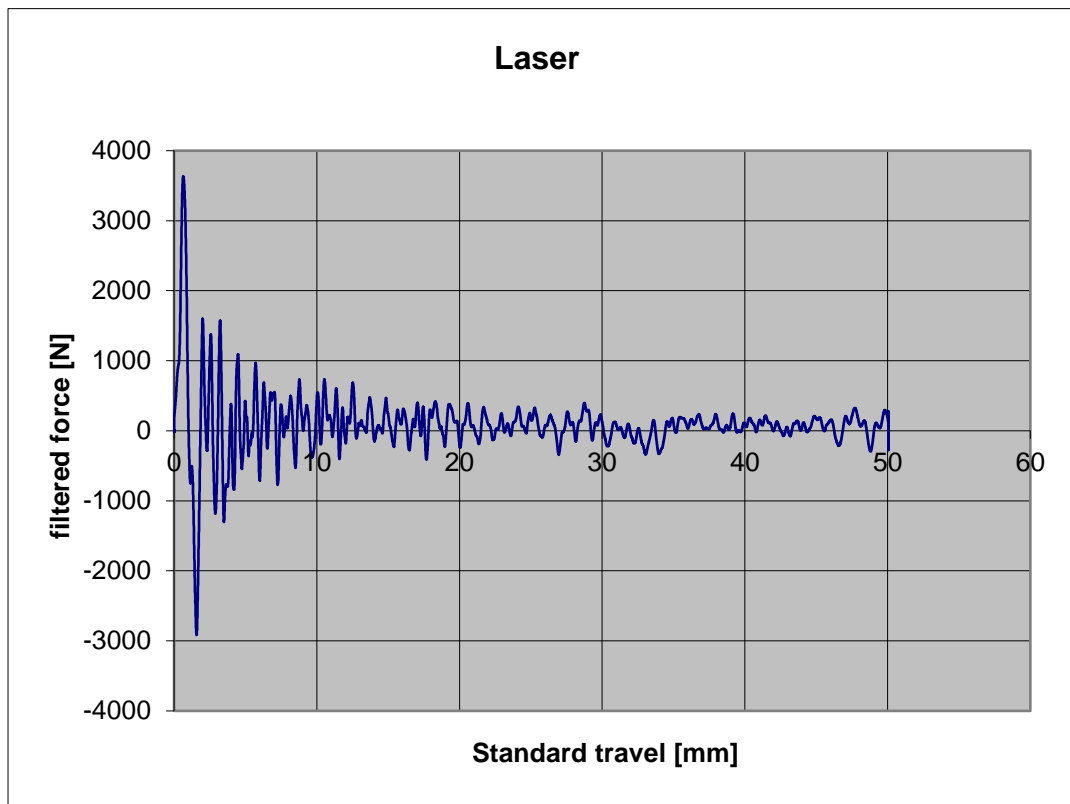
	Teoretická nárazová rychlost	Celková hmotnost	Pracovní kapacita	Fmax	Sm
n = 5	m/s	kg	J	N	mm
x	5,24	32,85	450,18	3100,50	0,46

3.2.2.3. TIG-naměřená data



	Teoretická nárazová rychlost	Celková hmotnost	Pracovní kapacita	Fmax	Sm
n = 5	m/s	kg	J	N	mm
x	5,24	32,85	450,18	1129,01	0,44

3.2.2.4. Laser-naměřená data



	Teoretická nárazová rychlost	Celková hmotnost	Pracovní kapacita	Fmax	Sm
n = 5	m/s	kg	J	N	mm
x	5,24	32,85	450,18	3635,56	0,64

3.3. Vyhodnocení získaných informací o jednotlivých metodách svařování k vhodnosti dané aplikace

3.3.1. Statická tahová zkouška

Pro statickou tahovou zkoušku jsem dle příslušné normy zvolil deformační rychlost $\varepsilon = 0,002 [s^{-1}]$ a frekvenci záznamu 50 Hz.

$$\varepsilon = \frac{\text{rychlost pohybu příčnicku}}{\text{redukovaná deformační délka}}$$

Před zahájením testování svařovaných zkušebních vzorků jsme nejprve ověřili mez pevnosti základního materiálu na referenčních vzorcích, které jsem porovnal s hodnotami uvedenými na inspekčním certifikátu, abych měl jistotu, že nedošlo k záměně základního materiálu při výrobě zkušebních vzorků. Naměřené hodnoty meze pevnosti a smluvní meze kluzu na referenčních vzorcích byly vyšší než minimální hodnoty uvedené na inspekčním certifikátu, což mi potvrdilo správnost použitého materiálu.



Obrázek 27.: Zkouška tahem na stroji Zwick/Roell typu Z030

Tabulka 6.: Vyhodnocení statické tahové zkoušky

	S0	Rp 0,2	Rm
	mm²	N/mm²	N/mm²
Základní materiál	20,00	283,07	337,24
MIG	20,00	143,53	208,25
TIG	20,00	153,22	168,43
LASER	20,00	203,04	225,26

Z tabulky 6, kde jsem porovnal průměrné hodnoty smluvní meze kluzu a meze pevnosti, které byly naměřeny vždy na 5 zkušebních vzorcích, vyšla nejlépe nekonvenční metoda svařování pomocí ručního Laseru. Tato metoda svařování byla nejen jednoznačně nejrychlejší z hlediska provedení svaru, ale i jednoduše opakovatelná bez znatelného vlivu na kvalitu provedeného svaru, což je znázorněno na tahovém diagramu v kapitole 3.2.1.4 mé práce. Nevýhodou této metody svařování jsou vyšší pořizovací náklady na svařovací zdroj a bezpečnostní rizika s laserovým zdrojem spojena.

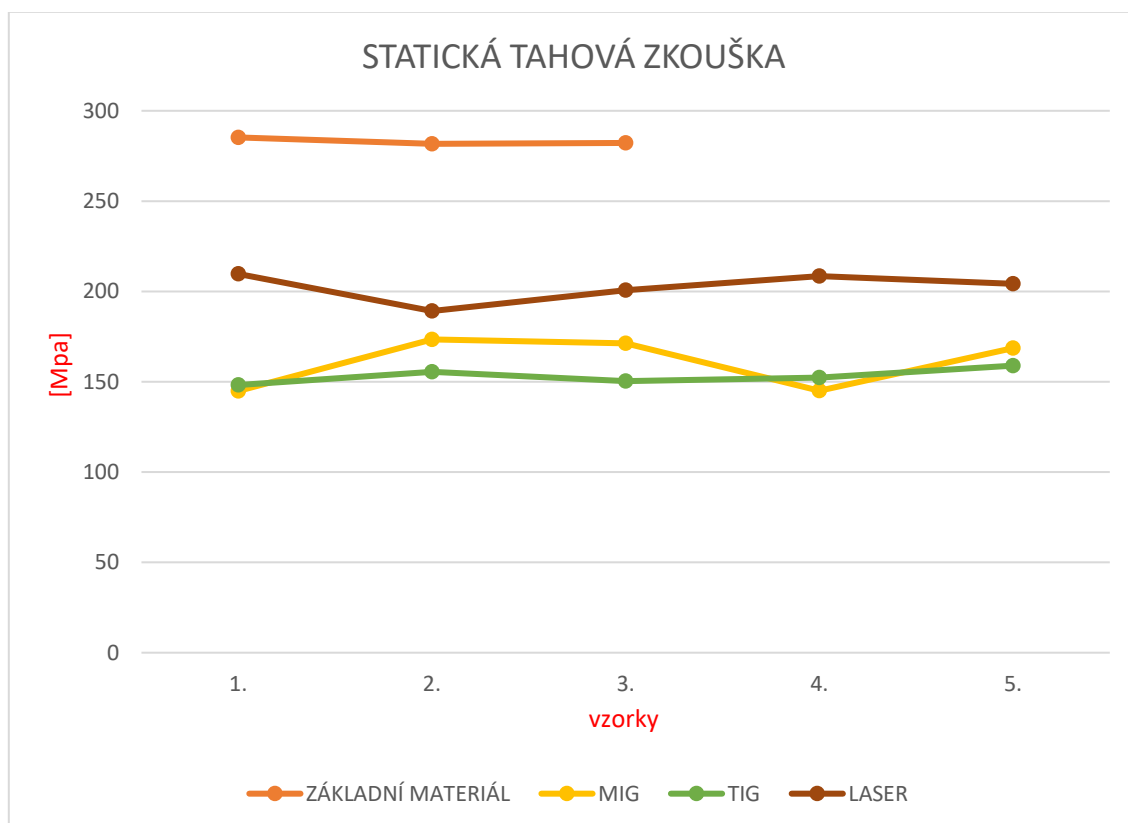
Zajímavostí při statických tahových zkouškách byl vzorek č.3 u metody svařování MIG, kde došlo k přetržení vzorku mimo TOO viz. **obr.28**. Na tomto vzorku byla naměřena mez pevnosti $R_m = 236,54 [N/mm^2]$ a smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 171,27 [N/mm^2]$. Tento vzorek mi kvůli své vysoké naměřené hodnotě meze pevnosti ovlivnil průměrné hodnoty R_m , jak je vidět v **tab.6**. Bohužel se tyto hodnoty, ani přetržení zkušební vzorku svařovaného metodou MIG mimo TOO neopakovali.



Obrázek 28.: Zkušební vzorek č. 3 – metoda svařování MIG

Tabulka 7.: Statická tahová zkouška – naměřená data

STATICKÁ TAHOVÁ ZKOUŠKA				
	Rp 0,2 - Smluvní mez kluzu [N/mm ²]			
VZOREK	ZÁKLADNÍ MATERIÁL	MIG	TIG	LASER
1.	285,26	144,91	148,20	209,69
2.	281,72	173,44	155,51	189,16
3.	282,22	171,27	150,28	200,71
4.		145,00	152,36	208,47
5.		168,62	158,91	204,24



Graf 1.: Statická tahová zkouška

3.3.2. Dynamická tahová zkouška

Pro všechny zkušební vzorky při dynamické tahové zkoušce byla na Perkusním kyvadlovém rázovém kladivu nárazová rychlost 5,24 m/s, celková hmotnost kyvadla 32,85kg a pracovní kapacita 450,18 J.

Před zahájením testování svařovaných vzorků jsme nejprve provedli dynamickou tahovou zkoušku na referenčním vzorku zkušebního materiálu, kde byla naměřena síla potřebná k jejich přetržení o velikosti 4141,64 N. Tato zkouška byla následně dvakrát zopakována, přičemž byl výsledek +/- 20 N stejný.



Obrázek 29.: Zkušební vzorek v kleštině před a po dynamické tahové zkoušce

Tabulka 8.: Vyhodnocení dynamické tahové zkoušky

	Teoretická nárazová rychlost	Celková hmotnost	Pracovní kapacita	Fmax	Sm
n = 5	m/s	kg	J	N	mm
Základní materiál	5,24	32,85	450,18	4141,64	0,42
MIG	5,24	32,85	450,18	3100,5	0,46
TIG	5,24	32,85	450,18	1129,01	0,44
Laser	5,24	32,85	450,18	3635,56	0,64

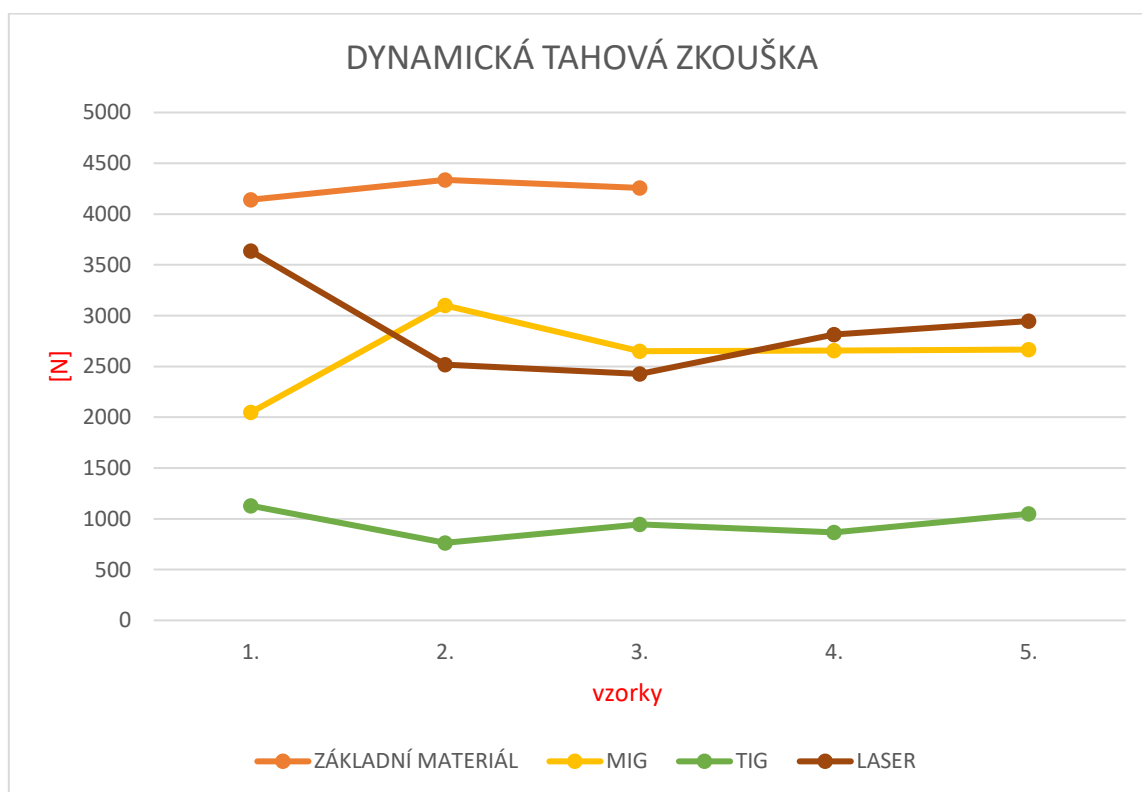
V tabulce 7, kde jsem porovnal průměrné hodnoty maximálních sil potřebných k přetržení zkušebních vzorků, je patrné, že nejlepších výsledků při dynamických tahových zkouškách dosáhly znovu vzorky, které byly svařovány pomocí ručního laserového zdroje. Jedním z možných důvodů, proč tyto vzorky dopadly nejlépe, bylo množství vneseného tepla. Tato metoda se kvůli své vysoké rychlosti provedení svarového spoje vyznačuje nízkým množstvím vneseného tepla do svařence.



Obrázek 30.: Zkušební vzorek před a po dynamické tahové zkoušce

Tabulka 9.: Dynamická tahová zkouška – naměřená data

DYNAMICKÁ TAHOVÁ ZKOUŠKA				
	F max-maximální síla [N]			
VZOREK	ZÁKLADNÍ MATERIÁL	MIG	TIG	LASER
1.	4142	2048	1129	3636
2.	4337	3101	764	2517
3.	4258	2650	946	2427
4.		2656	865	2815
5.		2666	1050	2945



Graf 2.: Dynamická tahová zkouška

4. Závěr

Cílem mé práce bylo zjistit a porovnat mechanické vlastnosti opravované/svařované hliníkové slitiny EN AW 6082 T6, která se používá na výrobu karoserie vozidla, pomocí statické a dynamické tahové zkoušky u vzorků, které budou svařovány konvenčními metodami svařování MIG/TIG, v porovnání s laserovým ručním svařováním. V praxi se díky neustálému zpříšňování emisních norem snažíme vyrábět vozidla pomocí moderních technologií s využitím inovativních materiálů. Abychom byli schopni tyto normy plnit, snažíme se neustále snižovat celkovou hmotnost vozidla. Za tímto účelem nám stále častěji vstupují do karoserie a celého vozidla prvky, které jsou vyrobeny z hliníkových slitin. Tyto komponenty jsou časem opotřebené ať už vlivem dopravní nehody nebo běžným provozem. Vysoké pořizovací ceny těchto komponent nás často vedou k jejich opravě a nikoliv výměně. V této práci jsem porovnal konvenční metody svařování těchto komponent metodami MIG/TIG s nekonvenční metodou svařování pomocí ručního laseru. Vyhodnocení proběhlo na základě výsledků statických a dynamických tahových zkoušek, kde jsem porovnal mechanické vlastnosti jednotlivých zkušebních vzorků.

V teoretické části této práce jsem se věnoval hliníkovým slitinám používaným v automobilovém průmyslu a možnostem jejich oprav v případě mechanického poškození, rozboru jednotlivých metod svařování a popisu statické a dynamické tahové zkoušky.

V experimentální část jsem shrnul přípravu jednotlivých vzorků pro tahové zkoušky, průběh jednotlivých zkoušek a jejich vyhodnocení.

Po vyhodnocení všech vzorků jsem zjistil, že nejlepší naměřené hodnoty jak u statické tahové zkoušky, tak u dynamické tahové zkoušky, byly u vzorků, které byly svařovány nekonvenční metodou pomocí ručního laseru. To nám potvrzuje skutečnost, že se moderní technologie ubírají správným směrem, jelikož jsme dosáhli nejen nejlepších mechanických vlastností po svařování v porovnání s ostatními konvenčními metodami, ale i rychlosti svařování neboli nejvyšší produktivity práce, což je v dnešní době velmi sledovaný parametr výroby. Jedinou nevýhodou u této nekonvenční metody svařování je vyšší pořizovací cena svařovacího zdroje a bezpečnostní rizika spojená s jeho používáním, ale to jsou všechno jednoduše řešitelné problémy, které neovlivní rozmach této moderní technologie v následujících letech do praxe.

Dále by bylo zajímavé porovnat výsledky tahových zkoušek při použití přídavného materiálu různé jakosti, nebo realizovat makroskopické/mikroskopické zkoušky za účelem sledování průvaru, TOO nebo odhalení vnitřních vad ve svaru. Mohl by to být zajímavý námět pro další práci v oblasti svařování, který by šel popsat.

Bibliografie

1. Šimková, Vendula. Vývoj použití materiálů v automobilovém průmyslu. *docplayer.cz*. [Online] 2016. [Citace: 22. 02 2023.] <https://docplayer.cz/9186887-Vyvoj-pouziti-materialu-v-automobilovem-prumyslu.html>.
2. Audi A8: aluminum and steel-Aluminium Guide. Aluminium Guide-ПОНИМАНИЕ АЛЮМИНИЙ-Научно. Технически. Популярно. [Online] 2013. [Citace: 07. 02 2023.] Dostupné z: <https://aluminium-guide.com/en/alyuminievjy-audi-a8/>.
3. Die Karosserie: Intelligent Materialmix-Mercedes-Benz Group Media. 302 Found [online]. Copyright © 2023 Mercedes [Online] [cit. 22.02.2023]. Dostupné z: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Die-Karosserie-Intelligenter-Materialmix>.
4. About Jaguar | Lehká hliníková konstrukce | Jaguar CZ. [online]. Copyright © JAGUAR LAND ROVER LIMITED 2023 [cit. 22.02.2023]. Dostupné z: <https://www.jaguar.cz/about-jaguar/reliability/aluminium.html>. [Online]
5. Fit for 55: why the EU is toughening CO2 emission standards for cars and vans. [Online] 2022. [Citace: 06. 02 2023.] <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/>.
6. Piromalli, Dario. Weldability of a cold forming AA5754 using laser, capacitor discharge and resistance technologies. Torino: Politecnico di Torino, 2022.
7. Davis, Joseph R. Aluminum and Aluminum Alloys (Asm Speciality Handbook). místo neznámé: ASM International, 1993. ISBN-10: 087170496X.
8. Luijendijk, T. Welding of dissimilar aluminium alloys. [Volume 103, Issue 1] Delft: Journal of Materials Processing Technology, 2000. ISSN: 0924-0136.
9. A review on resistance spot welding of aluminum alloys. S. M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh, M. Fadzil, Z. Luo, S. Ao. 90:605-634, [Online]: Springer-Verlag London, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-9225-9.
10. Investigation on Transient Thermal Responses« Health Science Journals. Health Science Journals [online]. [Citace: 2023.03.14] Dostupné z: <https://healthjournals.wordpress.com/2016/08/19/investigation-on-transient-thermal-responses/>. [Online]
11. ČSN EN 573-3. Hliník a slitiny hliníku: Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2009. [online]. [cit. 2014-4-14]. Dostupné z: <http://ulozto.cz/xMa5BuQ/csdn-en-573-3-hlinik-a-slitiny-hliniku-chemicke-slozeni-a-druhy-vyrobku-pdf>

12. ROBERTS, Philip. Industrial brazing practice. Boca Raton, Fl.: CRC Press, 2003, 383 p. ISBN 08-493-2112-3.
13. Hliník a jeho slitiny. 41 s. [online]. [cit. 2014-4-14]. Dostupné z: <http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf>
14. VIK R., Bakalářská práce, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, 2014.
15. Piromalli, Dario. Weldability of a cold forming AA5754 using laser, capacitor discharge and resistance technologies. Torino: Politecnico di Torino, 2022.
16. Investigation on Transient Thermal Responses« Health Science Journals. Health Science Journals [online]. [Citace: 2023.03.14] Dostupné z: <https://healthjournals.wordpress.com/2016/08/19/investigation-on-transient-thermal-responses/>. [Online]
17. SISMILICH, Vladimír. Dynamická tahová zkouška – určení materiálových parametrů. Online, Bakalářská práce, vedoucí Martin Severa. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství, 2008. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/3272>. [cit. 2024-06-17].
18. Strojirenstvi.wz.cz [online]. 2005-2007 [cit. 2011-04-11]. Vlastnosti materiálů. Dostupné z WWW: <http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php>.
19. Lícování čelných ozubených kol, kontrola a měření: Seminář Praha 1989, Dům techniky ČSVTS: Sborník. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1989. ISBN 80-02-99513-9.
20. ŠULC, Jan. Technologická a strojnická měření pro SPŠ strojnické: učební text pro 3. a 4. ročník středních průmyslových škol strojnických. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
21. KAŠTÁNEK, Otakar. Strojírenské materiály a technologie. Brno: Ediční středisko VUT, 1980.
22. Culek Bohumil, Schmidová Eva. Dynamická tahová zkouška materiálů používaných při stavbě drážních vozidel [online]. Certifikované metodiky a postupy, UPCE. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/Dokumenty/Veda-a-vyzkum/Certifikovane-metodiky/Zeleznicni-metodiky/Dynamicka-tahova-zkouska-materialu-pouzivanych-pri>
23. American Welding Society (AWS). Welding Handbook. Danvers: autor neznámý. ISBN: 978-0-87171-053-6.
24. Types and applications of aluminum alloys for vehicles-Aluminum Automobile Technology. Aluminum Automobile Technology [online]. Copyright © [cit. 06.03.2023]. Dostupné z: https://uacj-automobile.com/types_and_applications.html. [Online]

25. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. [Online] Ostrava: ZEROSS, 2001. [citace 2023.03.06] ISBN 80-85771-81-0.
26. Přehled svařování.: [online]. Copyright © [cit. 29.04.2023]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf.
27. KOAL, Johannes, Martin BAUMGARTEN, Stefan HEILMANN, Jörg ZSCHETZSCHE, Uwe FÜSSEL. Performing an Indirect Coupled Numerical Simulation for Capacitor Discharge Welding of Aluminium Components. doi: 10.3390/pr8111330.
28. MUSIL, Miloslav a MORAVEC, Jaromír. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT. Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
29. WorldAutoSteel. Ahssinsights.org. AHSS Application Guidelines. [Online] 2020. [Citace: 03. 05 2023.] <https://ahssinsights.org/joining/resistance-welding-processes/resistance-spot-welding/rsw-modelling-and-performance/welding-simulation-for-ahss-lme-during-resistance-spot-welding/>.
30. Technické normy-ČSN normy-Technické normy [online]. Copyright © EUROPEAN STANDARD. Všechna práva vyhrazena, [cit.10.04.2023]. Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/tridv-norem-csn/>

Seznam obrázků

Obrázek 1.: Vývoj použitých materiálů v automobilovém průmyslu [1].....	12
Obrázek 2.: Vliv legujících prvků na vznik trhlin za horka [10]	15
Obrázek 3.: Sériová výroba celohliníkové karoserie [1].....	16
Obrázek 4.: Zobrazení využití hliníkových dílů a procentuální znázornění jejich zpracování (AUDI A8) [2]	17
Obrázek 5.: Karoserie ze slitiny hliníku pro Jaguar XK120 [4].....	18
Obrázek 6.: Autobus Scania Omnicity s hliníkovým skeletem [1]	19
Obrázek 7.: Rozdělení slitin hliníku [11]	23
Obrázek 8.: Systém značení tvářených slitin	24
Obrázek 9.: Tepelně ovlivněná zóna slitiny AlMgSi1 v teplem vytvrzeném stavu	26
Obrázek 10.: Princip metody MIG	31
Obrázek 11.: Princip svařování netavící se elektrodou v inertním plynu-TIG.....	33
Obrázek 12.: Možnosti svařování metodou TIG	34
Obrázek 13.: Princip metody laserového svařování průchozím paprskem (keyhole).....	36
Obrázek 14.: Znázornění pulzního (a) a kontinuálního (b) laserového svařování [16] ...	37

Obrázek 15.: Tvar zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku [18]	39
Obrázek 16.: Schéma hydraulického univerzálního zkušebního stroje [19].....	40
Obrázek 17.: Schéma Perkusního kyvadlového rázového kladiva [22].....	41
Obrázek 18.: Tabulové nůžky od fi. Digep – příprava vzorků pro svařování	44
Obrázek 19.: Svařovací zdroj Fronius TPS 400i.....	45
Obrázek 20.: Svařovací zdroj Fronius iWave 400i.....	46
Obrázek 21.: Svařovací zdroj DXTECH-MCCW1500 Fiber laser machine	47
Obrázek 22.: Svařené zkušební vzorky metodami TIG, MIG, Laser.....	48
Obrázek 23.: Obráběcí centrum Kovosvit Mas typu MCV1400 Quick.....	49
Obrázek 24.: Zkušební vzorky pro tahové zkoušky	49
Obrázek 25.: Zkušební stroj Zwick/Roell typu Z030.....	50
Obrázek 26.: Zkušební stroj Zwick/Roell typu RKP450	55
Obrázek 27.: Zkouška tahem na stroji Zwick/Roell typu Z030	59
Obrázek 28.: Zkušební vzorek č. 3 – metoda svařování MIG.....	60
Obrázek 29.: Zkušební vzorek v kleštině před a po dynamické tahové zkoušce	62
Obrázek 30.: Zkušební vzorek před a po dynamické tahové zkoušce	63

Seznam tabulek

Tabulka 1.: Hliníkové slitiny a jejich využití v automobilovém průmyslu [5]	20
Tabulka 2.: Porovnání vlastností hliníku a železa	22
Tabulka 3.: Značení tvářených slitin Al podle EN 573-1 až 5	24
Tabulka 4.: Obsah prvků ve slitině EN AW - 6082 (AlMgSi1Mn) v % hmot. [13].	25
Tabulka 5.: Mechanické vlastnosti slitiny EN AW - 6082 (AlMgSi1Mn) [11].....	25
Tabulka 6.: Vyhodnocení statické tahové zkoušky.....	60
Tabulka 7.: Statická tahová zkouška – naměřená data	61
Tabulka 8.: Vyhodnocení dynamické tahové zkoušky	63
Tabulka 9.: Dynamická tahová zkouška – naměřená data.....	64

Seznam grafů

Graf 1.: Statická tahová zkouška.....	61
Graf 2.: Dynamická tahová zkouška	64