



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

# Vliv režimu aditivní výroby obloukovým navařováním na mechanické vlastnosti hliníkových komponentů

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Bc. Matyáš Bursa

**VEDOUCÍ PRÁCE:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**STUDIJNÍ PROGRAM:** (NVI) Výrobní inženýrství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bursa** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **487133**  
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:

**Vliv režimu aditivní výroby obloukovým navařováním na mechanické vlastnosti hliníkových komponentů**

Název diplomové práce anglicky:

**The influence of the additive manufacturing mode by arc welding on the mechanical properties of aluminum components**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analýza současného stavu problematiky v oblasti navařování metodou WAAM
- 2) Rozbor možných režimů navařování metodou CMT
- 3) Návrh experimentu tvorby návarů – vytvoření zkušebních vzorků
- 4) Vyhodnocení vytvořených zkušebních návarů z hlediska mechanických vlastností
- 5) Závěrečné zhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolařík, L., Kovanda, K., Gurčík, T. Využití metody robotického navařování - WAAM a porovnání s 3D tiskem kovových materiálů, Dny svařovací techniky 2019, Rychnov nad Kněžnou, 2019
- [2] Chen, J.: Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012
- [3] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.: A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), Robotics And Computer-Integrated Manufacturing, 31, pp 101-110

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: **26.04.2023**

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 děkana(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., IWE, 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**

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE za odborné vedení a cenné rady, které zásadním způsobem pomohly k tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavu Sahulovi, Ph.D. a všem jeho kolegům za odbornou pomoc při realizaci experimentální části. Rád bych vyzdvihl významnou roli, kterou rodina, partnerka a přátelé sehráli během mého studia tím, že mi poskytli podporu a vytvořili komfortní prostředí, které bylo pro mé studium klíčové.

## Anotace

Tato práce zkoumá vliv režimu aditivní výroby obloukovým navařováním, metodou WAAM pomocí MIG CMT, na mechanické vlastnosti hliníkových návarů ze slitiny EN AW 5087. Experiment zahrnuje výrobu vzorků, zkoušky mechanických vlastností a analýzu výsledků. Cílem je zjistit korelaci mechanických vlastností hliníkových komponentů a nastaveného navařovacího režimu.

<b>Název diplomové práce:</b>	Vliv režimu aditivní výroby obloukovým navařováním na mechanické vlastnosti hliníkových komponentů
<b>Autor práce:</b>	Bc. Matyáš Bursa
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Konzultant:</b>	Ing. Miroslav Sahul, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2022/2023
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	U12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	80 stránek, 8 tabulek, 34 obrázků

**Klíčová slova:** WAAM, Aditivní výroba, Mechanické vlastnosti, CMT, Hliníkové slitiny

## Annotation

This thesis examines the influence of the additive manufacturing process of arc welding on the mechanical properties of aluminum components. The experiment includes sample fabrication, mechanical testing, and result analysis. The aim is to determine the correlation between the mechanical properties of aluminum components and the selected welding mode.

<b>Title of the final thesis:</b>	The influence of the additive arc welding mode on the mechanical properties of aluminum components
<b>Author:</b>	Bc. Bursa Matyas
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolarik, Ph.D., IWE
<b>Consultant:</b>	Ing. Miroslav Sahul, Ph.D.
<b>Academic year:</b>	2022/2023
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	U12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolarik, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	80 pages, 8 tables, 34 pictures
<b>Keywords:</b>	WAAM, Additive manufacturing, Mechanical properties, CMT, Aluminium alloys

# Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE .....	11
2. Aditivní výroba .....	12
2.1. Rozdělení aditivních technologií.....	13
2.1.1 Laser Additive Manufacturing (LAM) .....	14
2.1.2. Electron Beam Melting (EBM) .....	15
2.1.3. Shaped Metal Deposition (SMD) .....	16
2.2. WAAM (Wire and arc additive manufacturing).....	17
2.2.1. Popis metody WAAM .....	17
2.2.2. Parametr BTF (Buy – To – Fly) .....	19
2.2.3. Hodnocení kvality struktur vyrobených pomocí WAAM.....	20
3. Svařovací metoda MIG/MAG .....	22
3.1 Popis metody MIG/MAG.....	22
3.1.1. Základní princip a parametry metody MIG/MAG.....	22
3.1.2. Přídavné materiály pro MIG/MAG .....	23
3.1.3 Ochranné atmosféry pro MIG/MAG svařování .....	24
3.1.3. Výhody a nevýhody svařování MIG/MAG .....	25
3.2 Vnesené teplo .....	26
3.2.1. Vliv vneseného tepla na mechanické vlastnosti materiálu .....	27
4. Svařovací režim CMT (Cold Metal Transfer).....	28
5. Hliník.....	31
5.1. Hliníkové slitiny .....	33
5.1.1. Tepelné zpracování hliníkových slitin .....	33
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	37
6.1. Popis pracoviště.....	37

6.2. Výroba hliníkové stěny .....	38
6.3. Zkouška tahem.....	41
6.3.1. Systém ARAMIS.....	42
6.3. SEM (Skenovací Elektronová Mikroskopie) .....	45
6.4. Výsledky zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 6892-1 .....	49
7. Závěr.....	53
Seznam Obrázků .....	59
Seznam Tabulek.....	61
Seznam Příloh .....	62
Přílohy:.....	63



## Seznam zkratek

WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing (Aditivní obloukové navařování)
Resp.	Respektive
AM	Additive Manufacturing (Aditivní výroba)
CAD	Computer Aided-Design (Počítačem podporované projektování)
SLS	Selective Laser Sintering (Laserové spékání)
SLM	Selective Laser Melting (Laserové tavení)
LMD	Laser Metal Deposition (Laserové navařování)
PM	Powder Material (Práškový materiál)
MIG	Metal Inert Gas (Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním ochranném plynu)
MAG	Metal Active Gas (Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu)
EBM	Electron Beam Melting (Tavení elektronovým svazkem)
LAM	Laser Additive Manufacturing (Laserová aditivní výroba)
SMD	Shaped Metal Deposition (Tvarové navařování kovu)
MMA	Manual Metal Arc (Ruční obloukové svařování obalenými elektrodami)
Ar	Chemická značka argonu
Al	Aluminium (Latinsky) - Hliník
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
TIG	Tungsten Inert Gas (Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu)
CMT	Cold Metal Transfer - (Modifikace metody MIG/MAG svařování se sníženým tepelným příkonem – „přenos studeného kovu“)

CMT-P	Kombinace procesu Cold Metal Transfer a pulsního svařování
CMT-CS	Kombinace procesů Cold Metal Transfer a Cycle Step
BTF	Buy-To-Fly - poměr „vstupního“ výrobního materiálu k materiálu „výstupnímu“
EWT	Effective Wall Thickness (Efektivní tloušťka stěny)
SW	Surface Waviness (Vlnitost povrchu)
Fe	Ferrum (latinsky) - Železo
Cu	Cuprum (latinsky) - Měď
Si	Silicium (latinsky) - Křemík
Mg	Magnesium (latinsky) - Hořčík
Mn	Manganum (latinsky) - Mangan
Zn	Zincum (latinsky) - Zinek
$R_m$	Mez pevnosti v tahu [ $N \cdot mm^{-2}$ ]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu [ $N \cdot mm^{-2}$ ]
A	Tažnost, ampér
I	Proud [A]
V	Napětí [V]
$\varepsilon$	Relativní prodloužení [%]
DIC	Digital Image Correlation (Digitální korelace obrazu)
SEM	Scanning Electron Microscope (Skenovací elektronová mikroskopie)
GP	Guinier-Prestonovy zóny

# 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Diplomová práce se zaměřuje na vliv režimu aditivní výroby obloukovým navařováním (tzv. metodou WAAM viz kapitola 2.2.) na mechanické vlastnosti hliníkových komponentů. Aditivní výroba získává stále větší důležitost v průmyslu, jelikož umožňuje výrobu složitých geometrií a struktur. Přestože aditivní výroba přináší mnoho výhod, je nezbytné provádět podrobné studie zaměřené na vliv výrobních parametrů na vlastnosti výrobků.

Cílem této práce je analyzovat vliv různých režimů aditivní výroby obloukovým navařováním na mechanické vlastnosti výtisků (resp. návarů) z vybrané slitiny hliníku. Výzkum se zaměřuje na testování vzorků vyrobených pomocí aditivní výroby obloukovým navařováním s různým nastavením výrobních parametrů. Mechanické vlastnosti vzorků budou zkoumány z hlediska pevnostních a plastických vlastností pomocí tahových zkoušek.

Výsledky diplomové práce budou sloužit jako základ pro optimalizaci režimu aditivní výroby obloukovým navařováním hliníkových slitin. Zlepšení mechanických vlastností komponentů může významně přispět k vyšší kvalitě výroby a snížení výrobních nákladů. Tato práce přináší potenciál k dalšímu rozvoji aditivní výroby a zlepšení kvality výroby hliníkových komponentů v průmyslové praxi.

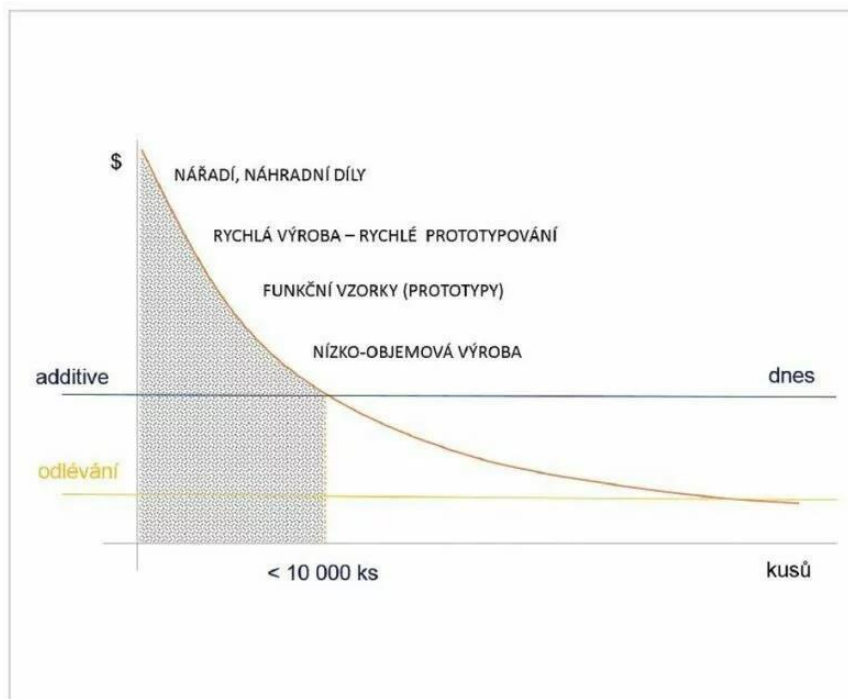
## 2. Aditivní výroba

Aditivní výroba (AM), také známá jako „3D tisk“, je inovativní výrobní proces, který umožňuje vytváření trojrozměrných objektů postupným skládáním vrstvy po vrstvě specifického materiálu. Proces je založen na principu přidávání materiálu, na rozdíl od tradičních metod výroby (jako je např. obrábění), které odstraňují nadbytečný materiál. Tímto způsobem lze vytvářet rozmanité finální tvary podle předem vytvořeného návrhu v počítačovém softwaru (CAD).

Aditivní výroba je v současnosti široce využívána především v oblasti prototypové výroby a výroby součástí a konstrukcí pro stroje a zařízení. Otevírá nové možnosti využití různých materiálů a umožňuje vytvářet složité geometrické tvary, které by byly nevyrobitelné nebo obtížně dosažitelné pomocí tradičních výrobních metod. Tento průmyslový sektor je v současné době intenzivně rozvíjen a přináší nové inovace a technologické pokroky.

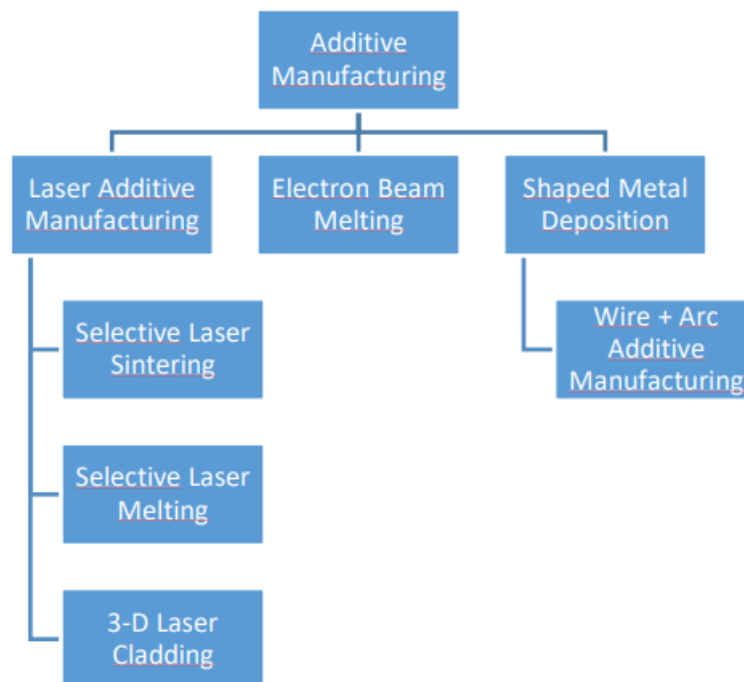
V rámci aditivní výroby existuje řada různých metod a technologií. Jednou z nich je metoda nazývaná Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) viz kapitola 2.2, která využívá proces navařování k vytváření kovových 3D součástí a komponent. Tato metoda je zvláště vhodná pro výrobu relativně jednoduchých geometrických tvarů a větších rozměrů, které by jinak byly náročné nebo neekonomické vyrábět pomocí tradičních postupů. WAAM nachází uplatnění především v leteckém průmyslu a dalších odvětvích, kde je vyžadována vysoká přesnost a pevnost výsledných součástí.

Aditivní výroba se stává klíčovou technologií pro budoucnost výrobního průmyslu a přináší nové možnosti a výhody ve flexibilitě, rychlosti a přesnosti výroby. S jejím dalším rozvojem a zdokonalováním se očekává rozšíření využití do dalších oblastí a zvýšení efektivity a konkurenceschopnosti průmyslového sektoru. [1]



obr. 1 - Ekonomicky výhodného užití aditivní výroby [2]

## 2.1. Rozdělení aditivních technologií



obr. 2 - Možné dělení aditivní technologie [3]

### 2.1.1 Laser Additive Manufacturing (LAM)

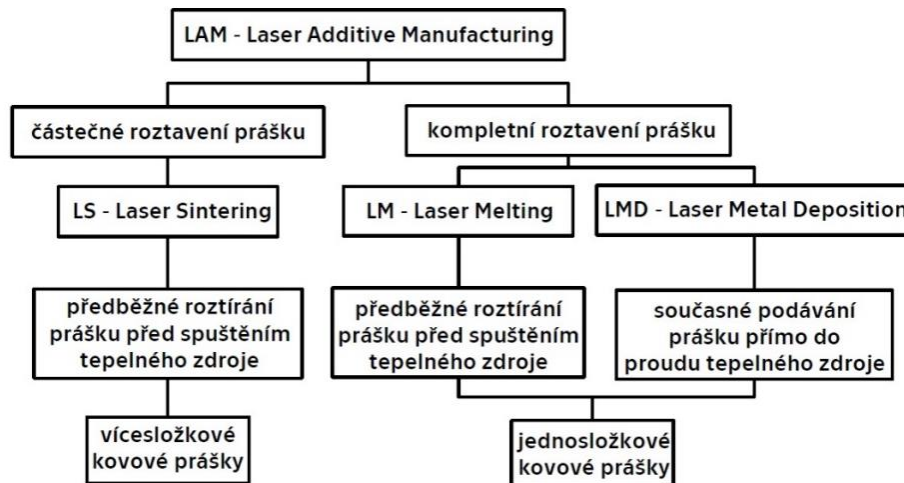
Jedná se o metody aditivní výroby využívající laserový paprsek, které lze rozdělit na tři základní typy: Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM) a Laser Metal Deposition (LMD). Tyto metody jsou charakteristické pro aditivní výrobu kovových materiálů.

SLS, také nazývané "laserové spékání", "sintrování" nebo "slinování", je jedním z typických procesů aditivní výroby. Tento proces se používá jak pro kovové, tak pro nekovové materiály, jako jsou plasty, nylon a keramika. Principem SLS je spékání tenkých vrstev prášku pomocí laserového paprsku. Laser zahřívá prášek těsně pod teplotu tavení, čímž dochází k jeho spékání. Nepoužitý prášek slouží jako podpora pro model a je odstraněn po dokončení procesu. Tímto způsobem se postupně vytvářejí jednotlivé vrstvy, až je dosaženo požadovaného tvaru součásti. [4]

SLM, zkráceně nazývané "laserové tavení", sdílí s technologií SLS stejný princip a zařízení. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma metodami je, že zatímco u SLS nedochází k úplnému roztavení prášku, který je pouze slinován, u technologie SLM dochází k úplnému roztavení přídavného materiálu a vytvoření homogenní struktury na molekulární úrovni (při ohřevu těsně nad teplotou tavení). Tento rozdíl je především důvodem, proč se laserové tavení uplatňuje při použití homogenních (čistých) přídavných materiálů, jelikož předpokládáme jednu tavící teplotu. Naopak technologie SLS umožňuje použití heterogenních PM - kovových prášků (v podstatě slitin - směsi prášků s různými teplotami tavení), přičemž není dosaženo materiálové homogenity ve finální struktuře. Hlavním rozdílem mezi SLS a SLM je tedy skutečnost, že metoda SLM využívá vyšší hustotu energie pro dosažení plného roztavení materiálu.

Oproti metodám SLS a SLM se u metody LMD, konkrétně 3D Laserového navařování, práškový přídavný materiál přivádí do pracovního prostoru pomocí proudu plynu. Při technologii LMD je také vhodné používat čisté materiály, aby byly úplně roztaveny. Hlavní výhodou technologie LMD je absence potřeby rozměrného zařízení pro stírání a nanášení kovového prášku nebo nutnost vyplňovat pracovní komoru inertní atmosférou. Prášek je totiž přímo nanášen na místo navařování skrze speciální hlavu, která ho směřuje do proudu

laserového paprsku. Během tohoto procesu proudí ochranný plyn skrze stejnou hlavu (podobně jako při technologii svařování MIG/MAG), a proto se tato metoda často nazývá jednoduše "Laserové navařování" nebo také "Laser cladding". [1], [5], [6]



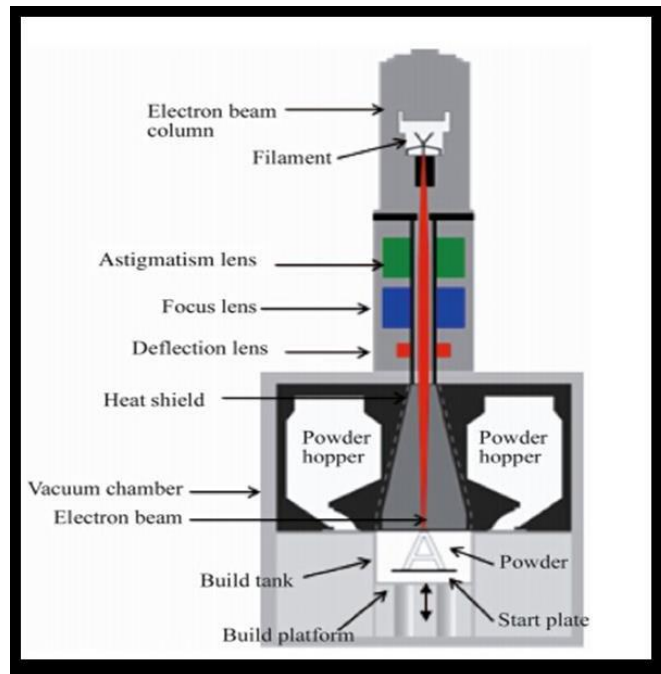
obr. 3 - Schéma technologie LAM [7]

### 2.1.2. Electron Beam Melting (EBM)

Metoda EBM, známá také jako Electron Beam Melting, je dalším příkladem aditivního výrobního procesu, který využívá práškový nebo drátový přídavný materiál. Nicméně, oproti předchozím laserovým technologiím, používá elektronový svazek namísto laseru. V tomto případě není nutné vytvářet inertní ochrannou atmosféru, místo toho se v pracovním prostoru vytváří vakuum, aby se elektrony neodrážely od částic ve vzduchu a nezpomalovaly se. Tato specifika přispívají k vyšší kvalitě výsledné struktury, která obsahuje méně nečistot, zejména kyslíku a dusíku, a je také méně náchylná k mikroporozitě. Výrobky získané pomocí metody EBM vykazují jemnou a homogenní mikrostrukturu a konzistentní mechanické vlastnosti materiálu. Proto se tato technologie uplatňuje především v oblasti lékařství a leteckého průmyslu pro výrobu titanových součástí, například kostních implantátů, náhrad dolní čelisti nebo komponentů leteckých motorů. Běžné velikosti těchto součástí se pohybují v rozmezí 5 až 10 cm.

Stejně jako v případě LAM (Laser Additive Manufacturing) i systém EBM (Electron Beam Melting) využívá práškový přídavný materiál a je charakterizován nákladným, složitým

a rozměrným zařízením. Povrchová kvalita kovových dílů získaných pomocí EBM systému je poměrně nízká. Nicméně EBM systémy se vyznačují vysokou rychlostí nanášení a výsledné součásti dosahují dobrých mechanických vlastností. [1]



obr. 4 – Schéma zařízení EBM [8]

### 2.1.3. Shaped Metal Deposition (SMD)

SMD (Shaped Metal Deposition) je technika, která umožňuje rychlou výrobu prototypů „vrstva po vrstvě“ pomocí svařovacího procesu a nanášení kovového drátu jako přídavného materiálu. Tento proces byl vyvinut na Cranfield University pro společnost Rolls Royce v období let 1994 až 1999 pro výrobu motorových součástí. Metoda SMD umožňuje použití různých svařitelných materiálů, avšak nejčastěji se uplatňují materiály jako nikl, titan a jejich slitiny, které jsou drahé a obtížně zpracovatelné konvenčními metodami a slouží k výrobě speciálně tvarovaných dílů.

Přesnost a kvalita povrchu při použití SMD jsou nižší než u metod, které využívají laser nebo elektronový svazek. Nicméně rychlost nanášení materiálu je výrazně vyšší, až o 1 kg/h. Jako zdroj tepla lze opět použít laserový paprsek nebo elektronový svazek. Alternativně je možné využít i elektrický oblouk, což přináší významný ekonomický efekt. [6], [5], [9]





obr. 5 - Výrobky vyrobené metodou SMD [5]

## 2.2. WAAM (Wire and arc additive manufacturing)

Metoda Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) byla vyvinuta v 90. letech 20. století na Cranfield University ve Velké Británii, která se nadále věnuje výzkumu a vývoji v této oblasti. Přestože první patent spojený s touto metodou byl podán již v roce 1925. Vznik WAAM byl motivován několika faktory, mezi něž patří obtíže nebo neefektivita výroby některých relativně jednoduchých součástí prostřednictvím tradičních metod. Dalším faktorem byl rozvoj technologických odvětví, zejména robotického svařování a jeho programování, které ovlivnilo rozvoj metody WAAM. Při programování pro WAAM se využívají osvědčené principy a parametry klasického svařování.

WAAM, neboli Wire and Arc Additive Manufacturing, je speciální technologie známá jako SMD (Shaped Metal Deposition), která spojuje elektrický oblouk s použitím přídavného materiálu ve formě kovového drátu. Jako přídavný materiál se používají běžné svařovací dráty používané pro metodu MIG/MAG. WAAM metoda je ideálním procesem pro efektivní výrobu velkých komponentů. [3], [7], [10]

### 2.2.1. Popis metody WAAM

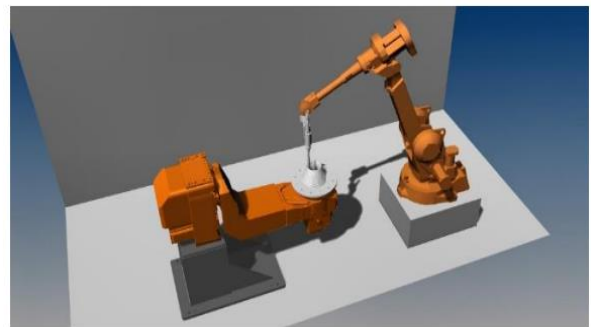
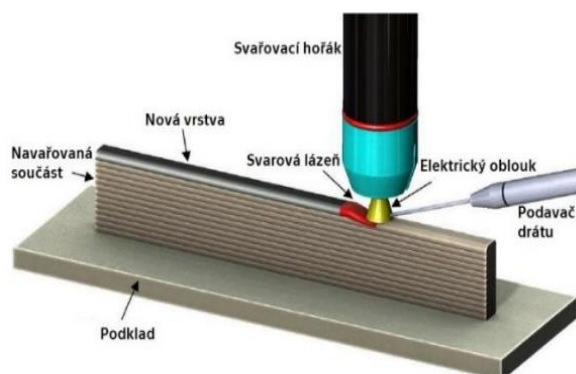
Additivní výroba pomocí obloukového navařování (WAAM - Wire and Arc Additive Manufacturing ) je inovativní a perspektivní technika výroby, která získává stále větší popularitu v průmyslu. Tato metoda umožňuje postupné vytváření součástí „vrstva po vrstvě“, kdy se jednotlivé návarové housenky navařují na sebe. Důležitým faktorem pro dosažení

vysoké kvality povrchu a přesnosti rozměrů hotových výrobků je přesné modelování geometrie těchto housenek a vrstev.

WAAM využívá elektrický oblouk a kovový drát jako přídavný materiál pro navařování. Výhodou tohoto procesu je použití běžného svařovacího drátu, což přináší ekonomické výhody. Na rozdíl od jiných technik, jako je laserové nebo elektronové svařování s práškovým materiálem, WAAM umožňuje efektivní výrobu velkých komponent za relativně nízké náklady a s vysokou rychlostí výroby.

Automatizace procesu hraje klíčovou roli při efektivním využití WAAM. K tomuto účelu se využívají robotická pracoviště nebo počítačem řízené portály, které zajišťují pohyb svařovacího zařízení. Tím je možné snížit potřebu manuální práce a zvýšit přesnost a opakovatelnost výrobního procesu.

WAAM má široké uplatnění v různých odvětvích průmyslu, jako je automotive, letecký průmysl, biomedicína, strojírenství a robotika. Tato technologie umožňuje rychlé prototypování a výrobu složitých komponent s vysokou přesností. Poskytuje také významné úspory času a nákladů ve srovnání s tradičními metodami výroby. [7]



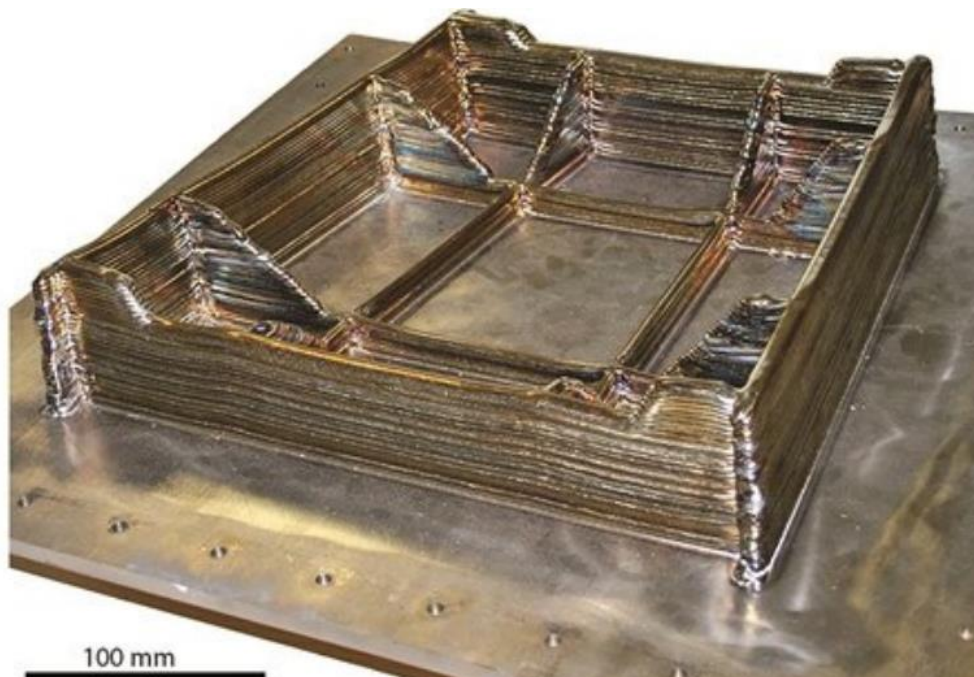
obr. 6 - Schéma metody WAAM s TIG technologií (vlevo) [11] a typické uspořádání pracoviště (vpravo) [12]

### 2.2.2. Parametr BTF (Buy – To – Fly)

Metoda WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) je aditivní výrobní metoda, která vznikla jako reakce na potřeby různých technologických odvětví. Jejím cílem je kombinovat vhodné technologické parametry svařování, robotického programování a znalostí termální analýzy pro dosažení požadovaných mechanických vlastností výrobku.

Hlavním důvodem použití WAAM metody je přístup BTF (buy-to-fly), který se zaměřuje na optimalizaci poměru mezi vstupním výrobním materiálem a výstupním materiálem hotového výrobku. Tento přístup minimalizuje odpad, což je výhodné v porovnání s tradičními obráběcími postupy. Zejména v leteckém průmyslu, kde je toto technologické odvětví významné, má WAAM potenciál snížit odpad a zvýšit efektivitu výroby.

Konvenční výrobní metody obvykle dosahují poměru BTF v rozmezí 10-20:1. S použitím WAAM metody je možné tento poměr snížit až na 35-45%. Studie naznačují, že využití WAAM technologie v leteckém průmyslu může vést k úsporám až 60% nákladů na letadlo a snížení hmotnosti až o 30%. To naznačuje, že aditivní výroba je slibnou alternativou pro výrobu součástí z drahých materiálů, jako je titan a nikl, které jsou často využívány v leteckém průmyslu. Konvenční obráběcí metody často vedou k vysokému poměru BTF, což znamená značnou ztrátu materiálu. WAAM metoda umožňuje efektivnější využití těchto materiálů a přináší potenciál pro snížení nákladů a hmotnosti výrobků. [3]



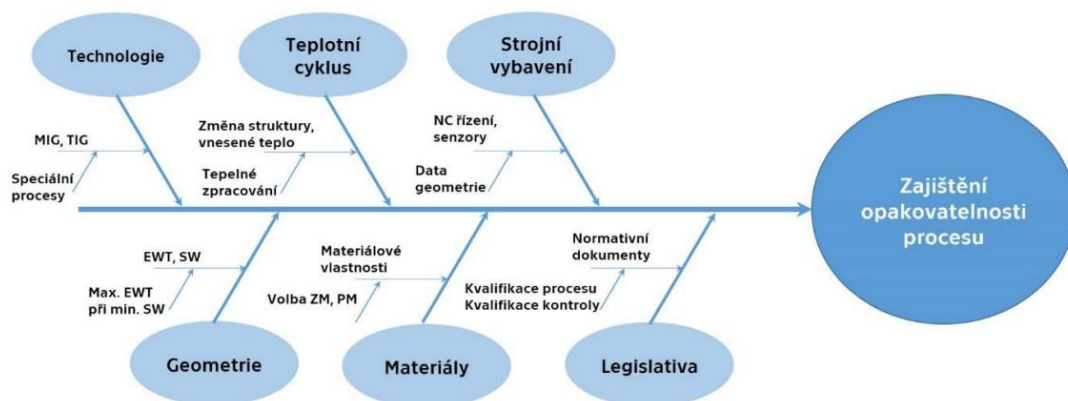
obr. 7 - Součást letadlového podvozku z titanové slitiny [7]

Tabulka 1 – Porovnání parametru BTF pro součást z obr. 7 [7]

Technologie	Hmotnost vstupního materiálu	Hmotnost součásti	BTF	Odpad
WAAM	24 kg	21 kg	1,14	13%
Obrábění	240 kg	21 kg	11,4	91%

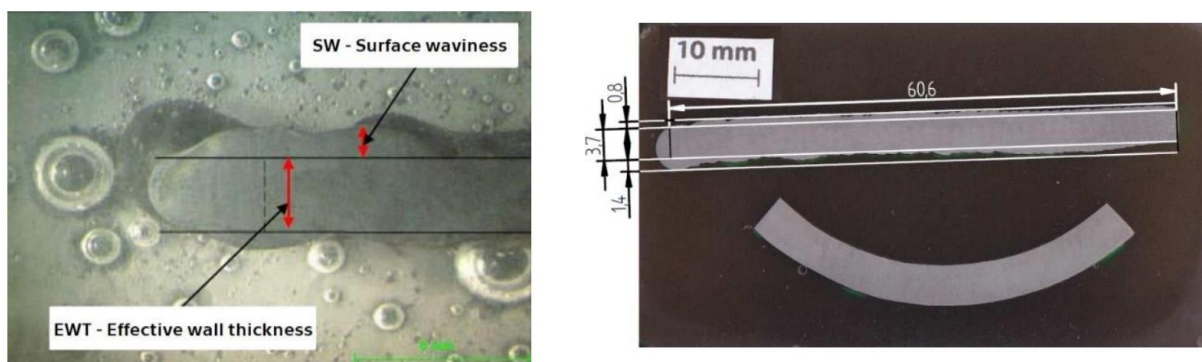
### 2.2.3. Hodnocení kvality struktur vyrobených pomocí WAAM

Kvalita výsledného návaru je ovlivněna širokou škálou faktorů, které zahrnují počáteční volbu materiálů a technologie navařování, způsob řízení a pohybu strojního vybavení, až po konkrétní nastavení parametrů procesu. Tyto faktory mají významný vliv na množství dodaného tepla a tím i na strukturní a mechanické vlastnosti návaru. Zásadní roli hrají také rozměry, tvar a celková geometrie navařovaných výrobků. [3]



obr. 8 - Faktory ovlivňující kvalitu WAAM procesu [3]

Pro posouzení vlastní kvality návarů vytvořených pomocí WAAM se nejčastěji využívají dva hlavní geometrické parametry, které slouží k jejich hodnocení. Konkrétně se jedná o efektivní tloušťku stěny (EWT - effective wall thickness) a vlnitost povrchu (SW - surface waviness) – viz obrázek 9. [3]



obr. 9 - Hodnocení pomocí SW a EWT (vlevo) [5] [1] hodnocení reálného vzorku (vpravo) [13]

Typem přenosu kovu je možné ovlivnit tvar a kvalitu navařené housenky, stabilitu elektrického oblouku a výsledné vlastnosti a geometrii návaru. Přenos kovu nejvíce záleží na nastavených svařovacích parametrech, ale přenos ovlivňuje i složení ochranné atmosféry, přídatný materiál a technika svařování. [14]

## 3. Svařovací metoda MIG/MAG

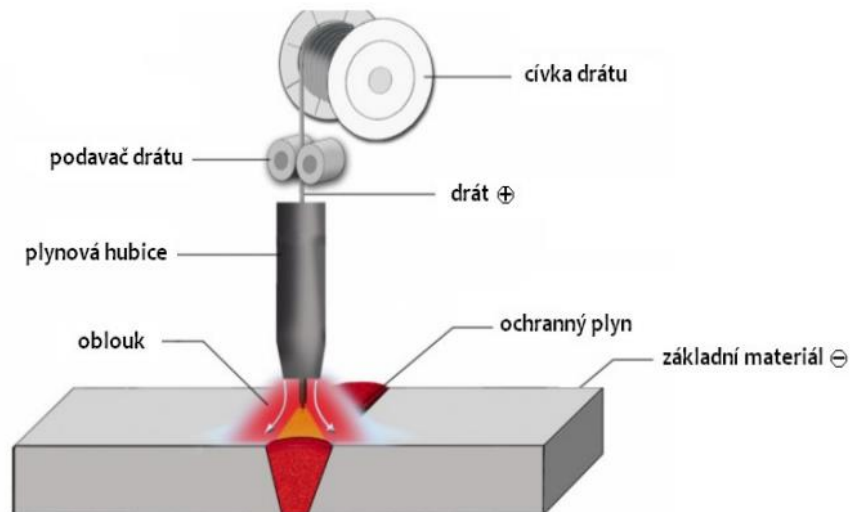
### 3.1 Popis metody MIG/MAG

Metody MIG a MAG jsou dnes nejpoužívanější způsoby svařování (a navařování) v průmyslové praxi. Jedná se o metody využívající elektrický oblouk jako tepelný zdroj a k ochraně svarové lázně používají ochranné atmosféry. Označují se číselným kódem 131 (MIG) a 135 (MAG) podle normy EN ISO 4063. Na rozdíl od MMA, MIG/MAG neprodukuje struskotvornou ochranu na povrchu svarového spoje a používá čistý kovový drát, což vytváří čistou kovovou svarovou housenku. [15]

#### 3.1.1. Základní princip a parametry metody MIG/MAG

Principem technologie obloukového svařování v ochranné atmosféře je vytvoření svarové lázně tavící se elektrodou (obvykle o průměru okolo 1 mm) a roztaveným základním materiálem za přítomnosti aktivního nebo inertního plynu. Elektroda ve formě svařovacího drátu je většinou vedena z cívky za pomoci automatického podavače (podávacích kladek) až do svařovacího hořáku, kde je pomocí třecího kontaktu zajištěno napájení drátu svařovacím proudem (standardně ze stejnosměrného) svařovacího zdroje.

Proudová hustota má u metody MIG/MAG velmi vysoké hodnoty. Dosahuje až hodnot  $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$  a hodnoty svařovacího proudu se většinou pohybují v rozmezí 30 až 800 A. Teplota odtavené elektrody se pohybuje mezi 1700 až 2500 °C a teplota svařovací lázně je závislá na svařovacích parametrech a pohybuje se mezi 1600 až 2100 °C. Výhodou těchto parametrů je, že můžeme dosahovat vysokých rychlostí svařování, což oceníme především u automatizovaného robotizovaného pracoviště. [15]



Obr. 10 - Schéma svařovacího procesu MIG/MAG [15]

### 3.1.2. Přídavné materiály pro MIG/MAG

Při svařování metodou MIG/MAG je volba přídavného materiálu důležitá a závisí na vlastnostech svařovaného (tzv. základního) materiálu. Pro tuto metodu se nejčastěji používají dráty plného průřezu nebo plněné elektrody, které jsou vyrobeny ve formě tenkostěnné kovové trubičky naplněné tavidlem. Tyto přídavné materiály jsou ukládány na cívkách o hmotnosti 7 kg, což je běžná hmotnost pro přídavný drát z Al-slitiny.

Plněné elektrody - Patří při svařování MAG k nejproduktivnějšímu výběru přídavného materiálu. Výhodou je vysoká proudová hustota procházející trubičkovým drátem, která napomáhá k rychlému odtavování drátu a tím i vysokému odtavnému výkonu. Plněné elektrody mají různé varianty, lišící se formou svého náplně (struskotvorná přísada), který ochraňuje svarový kov, v takovém případě není nutné použít ochranu atmosféru, neboť množství uvolněného ochranného plynu, při tavení náplně je dostatečné. Mohou obsahovat bazické, rutilové nebo kyselé struskotvorné přísady, které fungují jako prvotní ochrana svarového kovu před vlivy okolní atmosféry a ovlivňují formování svarové housenky. Při experimentech diplomové práce byl jako přídavný materiál použit pouze drát s plným průřezem.



**Drát s plným průřezem** - Drát s plným průřezem je typ přídavného materiálu používaného při svařování ocelí a neželezných kovů. Tento drát je vyráběn v průměrech od 0,6 mm do 1,6 mm pro svařování ocelí a do průměru 2,4 mm pro neželezné kovy. Na rozdíl od plněných elektrod neobsahuje drát s plným průřezem žádnou trubičku a je vyplněn jedním materiálem, který slouží jako přídavný materiál pro svařování. Tyto dráty jsou obvykle pokryty tenkou měděnou vrstvou, která chrání drát před korozí a zlepšuje elektrickou vodivost pro přívod proudu v kontaktní špičce hubice. [16]



Obr. 11 - Příklad plněné elektrody (vlevo, uprostřed) a drát plného průřezu (vpravo) [16]

### 3.1.3 Ochranné atmosféry pro MIG/MAG svařování

Ochranné atmosféry důkladně popisuje norma ČSN EN ISO 14175. Úlohou ochranného atmosféry je především ochrana svarového kovu, el. oblouku, elektrody a okolí svaru před okolní atmosférou (tzn. ochrana proti kyslíku, vodíku a dusíku), která způsobuje naplynění, pórovitost a propal prvků. Volba konkrétního ochranného plynu velmi záleží na svařovaném (tzv. základním) materiálu. Zvolený ochranný plyn ovlivní dále i stabilitu hoření oblouku, typ přenosu kovu z tavící se elektrody do svarové lázně, formování svarové housenky, chování tavné lázně, hloubku a rozsah průvaru, rychlost svařování a všechny metalurgické reakce v oblouku a svarovém kovu.

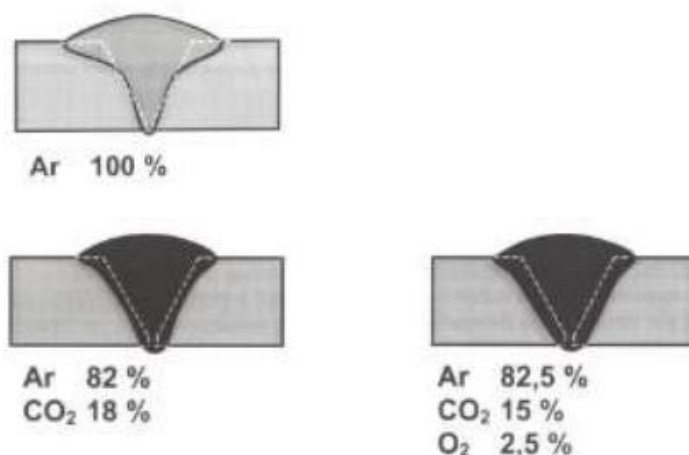
V reálné praxi se setkáváme s jedno nebo vícesložkovými ochrannými plyny (tzn. se směsí plynů). Na svarový spoj působí plyny vlivem inertním, kde plyn nereaguje se svarovou lázní, anebo aktivním, který se svarovou lázní částečně reaguje. Správná volba plynu ochranné atmosféry je důležitou otázkou na zkušeného technologa, který správnou volbou může zařídit správný poměr mezi kvalitou svarového spoje a vynaloženými celkovými náklady.



Argon (Ar) Argon je často používaný ochranný plyn při svařování. Tento inertní plyn (chemicky aktivní) se používá zejména při svařování neželezných kovů, jako jsou hliník, měď nebo titan.. Argon působí jako ochrana před oxidací a zlepšuje kvalitu svaru tím, že minimalizuje riziko vzniku pórovitosti a naplynění, což může být způsobeno přítomností kyslíku nebo dusíku v atmosféře. Díky svému inertnímu charakteru argon také minimalizuje riziko reakcí mezi svařovanými kovy a použitým plynem.

Obecně lze říci, že inertní plyny používáme ke svařování těžkých, lehkých kovů a ocelí, které z hlediska chemického složení obsahují prvky, které mají afinitu k prvkům okolní atmosféry. Inertní plyn je k chemickým procesům probíhajícím při svařovacím procesu netečný.

Aktivní ochranný plyn má krom ochranné funkce za úkol vstupovat do chemických reakcí ve svarové lázni. Aktivní plyn se používá nejčastěji pro svařování ocelí větších tlouštěk. [17]



Obr. 12 - Vliv ochranné atmosféry na tvar průřezu svaru a rozměr průvaru [16]

### 3.1.3. Výhody a nevýhody svařování MIG/MAG

Důležitost svařování v ochranné atmosféře potvrzuje fakt, že svařování MIG/MAG je celosvětově nejvyužívanější svařovací metodou v průmyslovém využití. Značnou výhodou pro montáže a výrobní linky je možnost svařovat ve všech polohách materiál od tloušťky 0,8 mm.

Výhodou oproti svařování MMA je, že MIG/MAG nepoužívá struskotvornou ochranu svarového kovu. Využitím teoreticky nekonečné elektrody ve formě drátu namotaného na cívky zamezujeme zbytečným pauzám pro výměnu přídavného materiálu, jako např. u metody MMA. Svařování MIG/MAG nabízí hluboký průvar potřebný pro svařování masivních profilů, které musí splňovat vysokou pevnost.

Mezi hlavní nevýhodu můžeme zařadit případ, kdy se místo montáže nachází v prostoru s nepříznivými klimatickými podmínkami, protože v takovém případě dochází k utržení ochranného plynu, jedná se o typicky dílenskou metodu svařování. Další nevýhodou je citlivost svarového kovu na korozi a vlhkost, z tohoto důvodu je nutné pro zachování kvality svarového spoje použít vyhovující způsob mechanického očištění a povrchové úpravy. [17]

### 3.2 Vnesené teplo

Vnesené teplo neboli tepelný příkon je termín používaný v oblasti svařování a označuje množství tepla, které je přivedeno do materiálu během svařování. Vnesené teplo zahrnuje teplo z oblouku a teplo z ohřevu základního materiálu, přídavného materiálu a případně i ochranného plynu. Při svařování je důležité kontrolovat vnesené teplo, aby nedošlo k deformaci nebo poškození materiálu, ke zhoršení vlastností svaru nebo k přehřátí, které může vést ke změně struktury materiálu a k jeho oslabení. [17]

Tepelný příkon pro metody obloukového svařování lze určit na základě definovaných svařovacích parametrů podle rovnice (1):

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v_{sv}} \left[ \frac{kJ}{mm} \right] \quad (1) [18]$$

Kde:

$Q_s$  – Specifické vnesené teplo [ $kJ \cdot mm^{-1}$ ]

$k$  [-] je koeficient tepelné účinnosti svařovacího procesu

$U$  [V] je napětí dodávané svařovacím zdrojem

$I$  [A] je proud dodávaný svařovacím zdrojem

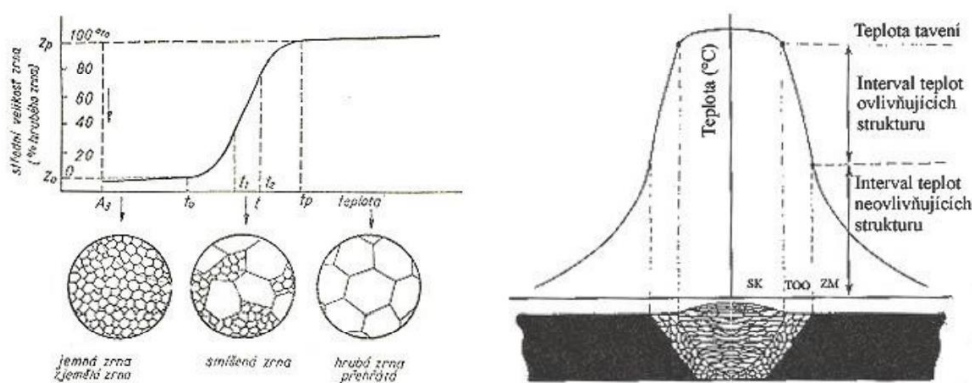
$v_{sv}$  [ $mm \cdot min^{-1}$ ] je postupová rychlost svařování

### 3.2.1. Vliv vneseného tepla na mechanické vlastnosti materiálu

Vnesené teplo má značný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Při svařování se mění mikrostruktura a chemické složení svařovaných materiálů, což může vést ke snížení pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti korozi. Vlivem vysokých teplot se mohou také vytvořit vnitřní napětí, která mohou vést ke vzniku trhlin. Proto je důležité při svařování monitorovat a ovládat vnesené teplo, aby se minimalizoval jeho vliv na mechanické vlastnosti svařovaného materiálu.

Při svařovacím procesu dochází k rychlému ohřevu a ochlazení svařovaného materiálu, což je původním jevem k tvorbě tepelně ovlivněné oblasti (TOO) v okolí svaru. Tato oblast může být charakterizována změnami v mikrostruktuře a mechanických vlastnostech svaru, jako je tvrdost, pevnost a křehkost. Protože vlivem vysoké teploty dochází k rozpuštění některých prvků a vzniku různých fází, může se ve svaru vyskytovat různé množství vad, jako jsou trhliny, póry, nehomogenity nebo odlišnosti v mikrostrukturách.

Správná volba svařovacích parametrů, ovlivňující zejména velikost vneseného tepla a typ přenosu svarového kovu, může vhodně ovlivnit mechanické vlastnosti. To zahrnuje volbu správného průměru elektrody, rychlost svařování a množství přívodu tepla. Důležitou roli také hraje volba svařovací metody a základního a přídatného materiálu, ty aspekty musí být přizpůsobeny podmínkám aplikace. [16]



obr. 13 - Hrubost zrna v TOO [17]

## 4. Svařovací režim CMT (Cold Metal Transfer)

**Svařovací režim CMT (Cold Metal Transfer)** je moderní svařovací technologie, která kombinuje výhody svařování MIG/MAG a TIG. Princip spočívá v tom, že se svařovaný kov roztavuje a následně tuhne ve velmi krátkých intervalech, což minimalizuje tepelné namáhání a snižuje riziko deformací svaru. To umožňuje svařovat tenké materiály s vysokou přesností a minimálním narušením materiálových vlastností.

Režim využívá speciálního svařovacího zdroje, který dokáže řídit přívod materiálu do svaru pomocí pulzního napájení. Při svařování CMT se používá drát s menším průměrem než při klasickém MIG/MAG svařování, což umožňuje dosáhnout vyšší přesnosti a snížit spotřebu materiálu.

CMT svařování se využívá především pro svařování tenkých plechů a výrobu precizních dílů v různých oborech průmyslu, jako jsou automobilový průmysl, letecký průmysl, elektronika a medicína.

Svařování Cold Metal Transfer (CMT) představuje modifikovaný proces svařování MIG, který byl vyvinut společností Fronius z Rakouska v roce 2004. Během svařování dochází ke změnám teploty v přídavném i základním materiálu, což významně ovlivňuje materiálové vlastnosti, zbytkové napětí a rozměrovou přesnost svařovaných výrobků. Svařování pomocí metody Cold Metal Transfer nabízí řízený způsob přenesení materiálu a zároveň snižuje tepelnou zátěž. Toho je dosaženo díky inovativnímu systému podávání drátu s vysokorychlostním digitálním řízením. Rychlost podávání drátu a cykly fáze oblouku jsou pečlivě regulovány tak, aby bylo dosaženo dostatečného množství energie pro roztavení jak základního materiálu, tak i kuliček přídavného materiálu. Hlavní charakteristikou procesu CMT jsou nízký proud v místě zkratu, což znamená snížený tepelný vstup, a stabilní řízení zkratu v obvodu svařovacího oblouku. [19], [20], [21]

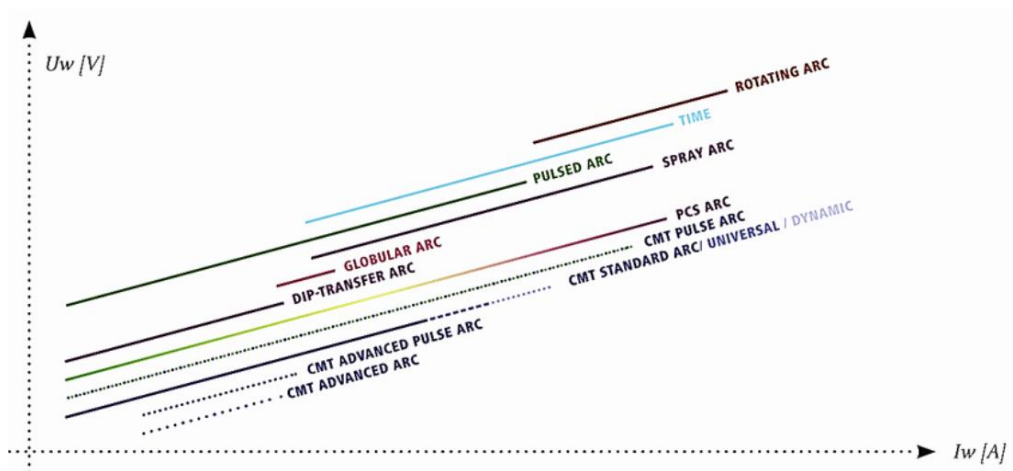
V režimu CMT můžeme definovat **4 základní fáze** – viz obrázek 14:

- 1. Fáze hoření oblouku – dopředný pohyb drátu směrem k základnímu materiálu**
- 2. Fáze zkratu**

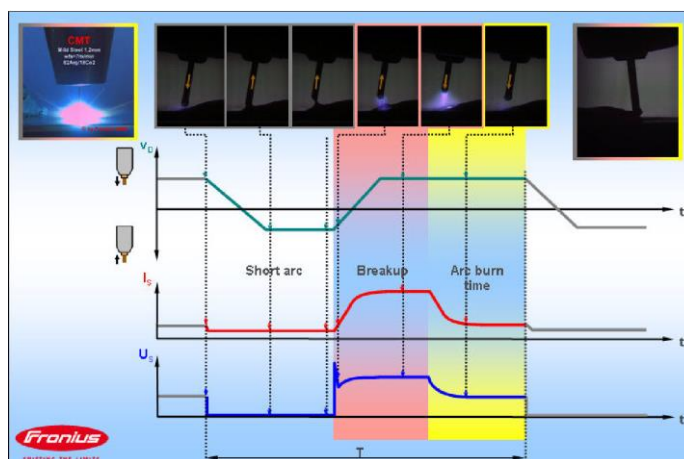
3. **Zpětný pohyb drátu (od základního materiálu) – mechanické oddělení kapky z přídavného materiálu**
4. **Směr pohybu drátu se změní po oddělení kapky tekutého kovu a proces se opakuje (viz fáze 1)**



obr. 14 - Jednotlivé fáze režimu CMT [22]



obr. 15 - Parametrová charakteristika jednotlivých svařovacích režimů [23]



obr. 16 - svařovací parametry v průběhu cyklů CMT [19] [23]

**CMT - P (Cold Metal Transfer-Pulse)** je vylepšený svařovací režim založený na technologii CMT, který umožňuje vytvářet ještě vyšší kvalitu svaru. Tento režim spočívá v kombinaci pulsního svařování a procesu CMT, což umožňuje přesnější a stabilnější svařování v porovnání s klasickým CMT režimem.

CMT - P režim využívá pulzního proudu, který zvyšuje stabilitu oblouku a zlepšuje kontrolu nad množstvím přeneseného materiálu. Pulzní proud také umožňuje přesnější nastavení svařovacího procesu a vytváření menšího množství tepelného vstupu, což vede k nižším deformacím a menšímu riziku vzniku trhlin.

CMT - P je vhodný pro svařování tenkostěnných plechů a pro svařování materiálů s různými tepelnými vlastnostmi, jako jsou například hliníkové slitiny. Tento režim se také často využívá při svařování materiálů s vysokou pevností, kde je důležité minimalizovat deformace a zajištění vysoké kvality svaru. [23] [22]

**CMT - CS (Cold Metal Transfer–Cycle Step)** verze procesu Cycle Step je založena na svařovacím procesu CMT (Cold Metal Transfer), který byl vyvinut společností Fronius jako varianta svařování MIG/MAG s nízkým tepelným příkonem.

Díky procesu Cycle Step je možné detailně ovládat cykly režimu CMT. Lze přesně definovat počet kapek na svařovací bod a také časovou pauzu mezi jednotlivými cykly. Svářeč tak může vytvářet body libovolné velikosti a reprodukovat je s vysokou přesností. [23] [22]

**CMT – Advanced** - Svařovací proces CMT - Advanced využívá kombinovaný oblouk s kladně a záporně polarizovanými cykly CMT. Během tohoto procesu dochází ke střídání polarit ve fázi zkratu, což pomáhá udržet oblouk stabilním. Ve fázi záporné polarit je dosaženo vyššího výkonu svařování a lepšího překlenutí mezer ve spoji. V kladných cyklech je teplo záměrně přidáváno do procesu. Přenos kapky probíhá přesně a pohyb drátu je důležitou součástí celého procesu. Tento svařovací režim je vývojová novinka společnosti Fronius a pro tuto diplomovou práci nebyl použit. [23] [22]

V rámci experimentální části diplomové práce byly použity 3 režimy:

- 1) **CMT**
- 2) **CMT – P**
- 3) **CMT – CS**

Během výroby součástí metodou Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) jsou faktory stability svařovacího procesu a omezení tepelného příkonu zásadním aspektem. Omezení tepelného příkonu je stěžejní z důvodu, aby nedocházelo k opětovnému tavení nižších vrstev. Dalším důležitým faktorem je dosažení konzistentních, rovnoměrných návarových housenek s minimem rozstříku. Pro tyto požadavky byl firmou Fronius vyvinut svařovací režim CMT jako modifikace běžného MIG/MAG procesu, který je vhodný i pro aditivní výrobu technologií WAAM.

## 5. Hliník

Hliník, označovaný jako Al z latinského Aluminium, je materiál s výjimečnými vlastnostmi, který zaznamenává významné roční přírůstky ve své výrobě, předčí v tom ostatní neželezné kovy. Díky svým vlastnostem je široce využíván ve všech oblastech lidské činnosti. Mezi další důvody jeho použití patří relativně dostupná cena a také schopnost recyklace.

V oblasti strojírenství patří hliník mezi nejčastěji používané neželezné kovy. Má světlou až stříbrolesklou barvu a velmi nízkou měrnou hmotnost (od 2640 do 2700 kg/m<sup>3</sup> v závislosti na způsobu zpracování). Hliník má také vysokou elektrickou a tepelnou vodivost s relativně vysokou hodnotou měrného tepla (890 J/kg·K). Jeho modul pružnosti činí pouze 72000 N·mm<sup>2</sup>.

Důležitou vlastností hliníku je jeho odolnost proti korozi, kterou zajišťuje tenká vrstva oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na povrchu. Tato vrstva vzniká přirozeně reakcí hliníku s kyslíkem ve vzduchu a má tloušťku jen několik setin mikrometru.

Typické vlastnosti hliníku, zejména pevnost a elektrická vodivost, jsou silně závislé na jeho čistotě. Během výrobního procesu se do materiálu mohou dostat nečistoty, zejména z rudy (bauxitu), která obsahuje železo (Fe, zejména ve formě  $\text{Al}_3\text{Fe}$ ), křemík (Si) a měď (Cu), a ty obvykle nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti a svařitelnost hliníku. Přidáním určitého množství křemíku (do 0,25 %) v poměru s železem Fe/Si do 0,5 se snižuje náchylnost k tvorbě trhlin.

Teplota tání čistého hliníku činí 658 °C. Mechanické vlastnosti hliníku jsou v porovnání s jinými technickými kovy nízké (pevnost v tahu přibližně 70 N·mm<sup>2</sup>), a proto se čistý hliník ve strojírenství a pro konstrukční účely používá zřídka. Nicméně tyto vlastnosti lze zlepšit pomocí legování, mikrolegování nebo tepelného zpracování. Mikrolegování se provádí přidávkou prvků jako je beryllium (Be) nebo bor (B). Jako legující příměsi se často používají měď (Cu), hořčík (Mg), křemík (Si), zinek (Zn) a mangan (Mn), které zlepšují mechanické vlastnosti hliníku, i když na úkor jeho chemické stálosti. [24], [25], [26]

Tabulka 2 - Fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku v porovnání s nízkouhlíkovou ocelí [27]

Vlastnosti	Hliník	Nízkouhlíková ocel
Měrná hmotnost při 20 °C (při 658°C) [g.cm <sup>-2</sup> ]	2,7 (2,38)	7,85 (7,0)
Měrná hmotnost oxidu $\text{Al}_2\text{O}_3$ [g.cm <sup>-2</sup> ]	3,96	---
Pevnost [ N·mm <sup>-2</sup> ]	70 až 100	300 až 400
Tažnost [%]	30 až 40	30 až 35
Modul pružnosti [ N·mm <sup>-2</sup> ]	72 000	210 000
Teplota bodu tavení [°C]	660	1500
Teplota bodu varu [°C]	2270	3200 (Fe)
Teplota bodu tavení oxidů [°C]	2046	1550
Teplota vypařování [°C]	2520	
Tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	223-235	52
Měrné teplo [MJ.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]	2,45	3,99
Skupenské teplo tání [GJ.m <sup>-3</sup> ]	1,05	2,14
Lineární tepelná roztažnost [m.K <sup>-1</sup> .10 <sup>-6</sup> ]	23,8	12,6
Elektrická vodivost při 20 °C [S]	35 až 36	8



## 5.1. Hliníkové slitiny

Rozdělení slitin hliníku se obvykle provádí podle způsobu zpracování, a to na slitiny vhodné pro tvářenání a slitiny určené pro slévárenství. Dále se tvářené slitiny dělí na slitiny, které lze vytvrzovat, a na slitiny, které zůstávají nevytvrditelné.

Tyto slitiny jsou většinou nízkolegované, protože hliník má omezenou schopnost rozpouštět legující prvky. Přesto však legující prvky mohou výrazně ovlivnit vlastnosti slitin, zejména mechanické vlastnosti se mezi jednotlivými slitinami výrazně liší.

Slitiny hliníku se vyznačují výhodnou kombinací fyzikálních vlastností, jako je vysoká teplotní a elektrická vodivost, mechanických vlastností, včetně pevnosti a plastických vlastností (tažnost, houževnatost) (například pevnost v tahu se pohybuje mezi 70 a 700 N·mm<sup>2</sup>), chemických vlastností (odolnost vůči korozi) technologických vlastností (svařitelnost a formovatelnost). Na rozdíl od většiny ocelí se slitiny hliníku neporušují křehkým lomem ani při nízkých teplotách; naopak se jejich pevnost zvyšuje (nevykazují tranzitní chování).

V současných normách je uváděno přes 120 různých druhů slitin hliníku, proto se neočekává dramatický rozvoj nových slitin v této oblasti. Vypadá to, že hlavní směry vývoje slitin budou směřovat k legovaným slitinám založeným na kombinaci hliník-měď-lithium (Al-Cu-Li), hliník-hořčík-lithium (Al-Mg-Li) a hliník-lithium-X, které budou sloužit pro speciální použití v letectví a zejména v kosmickém průmyslu. Z "klasických" slitin hliníku se v nejbližší budoucnosti předpokládá upřednostnění slitin hliník-hořčík-křemík (Al-Mg-Si) a hliník-hořčík (Al-Mg), a také vývoj modifikovaných slitin legovaných například skandiem a podobně. [28] [29]

### 5.1.1. Tepelné zpracování hliníkových slitin

Tepelné zpracování hliníkových slitin se provádí s cílem zvýšit jejich mechanické vlastnosti, zejména pevnost. Nejdůležitější metodou tepelného zpracování hliníkových slitin je vytvrzování, také nazývané precipitační zpevnění. Tímto procesem dochází k významnému

zvýšení meze pevnosti  $R_m$ , smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  a tvrdosti. Nicméně tažnost slitin obvykle mírně klesá.

Pro vytvrzování je nezbytná existence pevného roztoku s omezenou rozpustností, která se snižuje s teplotou. Je tedy nutná přítomnost legujícího prvku, který vykazuje výraznou změnu rozpustnosti v pevném roztoku  $\alpha$  (Al).

V komerčně vyráběných slitinách se často přidávají následující legující prvky – Cu, Mg, Mn, Si a Zn – pro zlepšení pevnostních vlastností. Hliník ve spojení s těmito legurami vytváří substituční tuhý roztok  $\alpha$  v binárních soustavách, který je dobře tvarovatelný a houževnatý a je pevnější a tvrdší než čistý hliník. Všechny uvedené prvky se dobře rozpouštějí v hliníku, a jejich rozpustnost se zvyšuje s rostoucí teplotou.

Vytvrzování lze provádět buď s binárními slitinami hliníku obsahujícími vytvrzující prvek, například slitiny Al-Cu, nebo s vícesložkovými slitinami, ve kterých je vytvrzující prvek další legující přísadou. Nejčastěji se jedná o slitiny Al-Mg-Si, Al-Mg-Zn nebo Al-Cu-Mg (dural).

Po vytvrzení vzniká materiál, který ztuhne běžným způsobem. Při relativně pomalém ochlazení se legující prvky vylučují ve formě rovnovážných intermetalických fází, jako je například  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{MgZn}_2$  a další. Tyto vyloučené fáze jsou obvykle hrubé a negativně ovlivňují vlastnosti slitiny, zejména snižují její houževnatost.

Cílem vytvrzování je rozpustit intermetalické fáze zpět do homogenního roztoku  $\alpha$ -Al a následně je opět vyloučit ve formě koherentních nebo polo-koherentních struktur, které způsobují zpevnění slitiny. [30] [31] [27]

### **Vytvrzování hliníkových slitin se skládá z několika fází:**

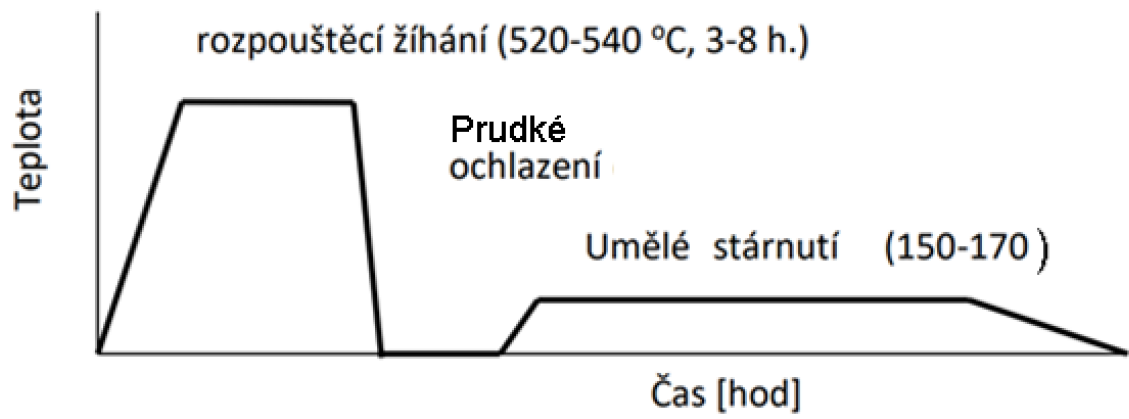
1. Rozpouštěcí žíhání: Hliníková slitina se zahřeje na teplotu, při které dochází k rozpouštění legujících prvků a vytvoření homogenního tuhého roztoku  $\alpha$ (Al).

2. Rychlé ochlazení: Po rozpouštěcím žíhání je slitina rychle ochlazená, což vytvoří přesycený tuhý roztok  $\alpha(\text{Al})$ . Při tomto procesu dochází k přesycení tuhého roztoku legujícími prvky a také bodovými defekty, jako jsou vakance, které umožňují pohyb atomů legujícího prvku směrem ke Guinier-Prestonovým (GP) zónám během stárnutí.
3. Precipitační vytvrzování (stárnutí): Následuje fáze stárnutí, při které dochází k tvorbě precipitátů a zpevnění struktury slitiny. Po rychlém ochlazení a přesycení tuhého roztoku začínají vznikat předprecipitační zóny, nazývané Guinier-Prestonovy (GP) zóny, které představují shluky rozpuštěných atomů. Poté se začínají vylučovat jemné přechodné precipitáty, které významně zvyšují pevnost a tvrdost slitiny, ale současně ovlivňují její plastické vlastnosti. Konečná struktura slitiny se skládá z nerovnovážných precipitátů, které už nepřispívají k významnému zpevnění prostřednictvím stárnutí.

Princip zpevnění spočívá v rychlém ochlazení z teploty maximální rozpustnosti tuhého roztoku, vytvoření přesyceného tuhého roztoku a následné precipitace, která se řídí rozpustností při snížené teplotě.

Proces vytvrzování zahrnuje rychlé ochlazení z teploty kolem 500 °C ve vodě nebo oleji, a následné přirozené nebo umělé stárnutí slitiny. Přirozené stárnutí při běžné teplotě okolí může trvat několik dní až měsíců, zatímco umělé stárnutí při teplotě 50 až 150 °C zkracuje tento proces na několik hodin.

Při svařování tepelně zpracovaných slitin hliníku dochází při ohřevu nad 200 °C k vylučování nové fáze (precipitace), což vede ke ztrátě dosažené pevnosti slitiny z předchozího tepelného zpracování. Tento proces je výrazný při svařování a vede ke snížení pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a ve svaru, kde pevnost a tvrdost jsou nejnižší. Toto chování je odlišné od ocelových materiálů, kde je pevnost nejvyšší ve svaru. [26] [27]

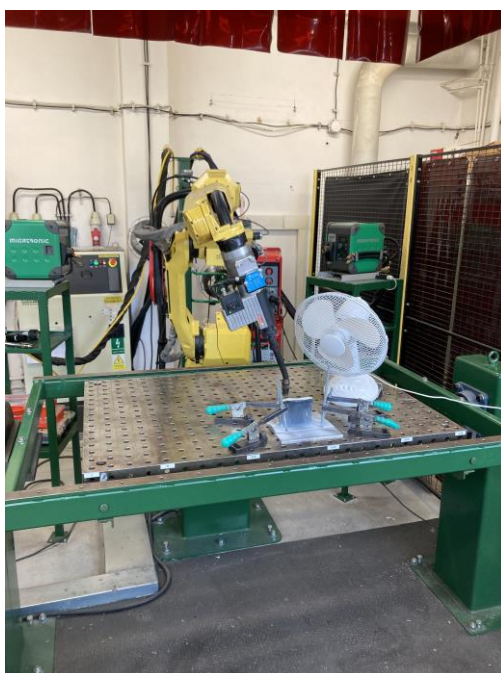


obr. 17 -Diagram tepelného zpracování vytvrzování za tepla [28]

## 6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 6.1. Popis pracoviště

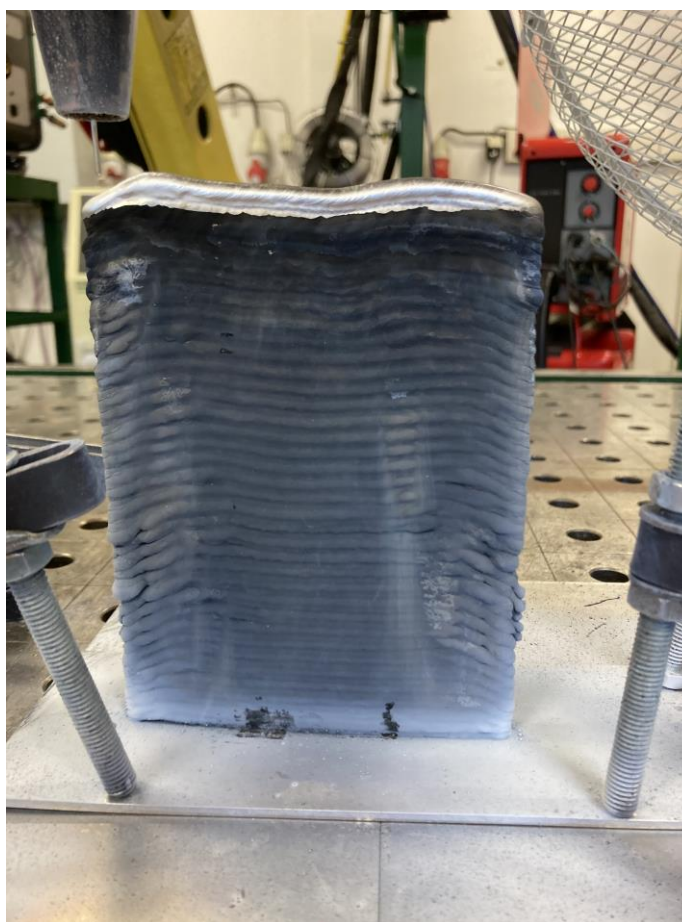
Experiment se uskutečnil na Ústavu strojírenské technologie, Fakultě strojní na ČVUT v Praze, konkrétně v Laboratoři výuky svářečských technologií. V této laboratoři se nachází specializované robotické pracoviště určené pro obloukové svařování (MIG/MAG a TIG), spolu s dalšími svařovacími zařízeními. Součástí tohoto pracoviště je univerzální šestiosý robot FANUC ArcMate 100iC, jehož rameno má maximální dosah 1420 mm. Pro řízení robota slouží jednotka R-J3iC, spojená s jednoosým polohovadlem FANUC P250. [13] Pro provedení samotného navařování metodou WAAM byla použita svařovací metoda MIG, a to pomocí svařovacího zdroje Fronius Trans Puls Synergic 3200 CMT (pro realizovaný experiment byly využity svařovací režimy CMT, CMT+P a CMT+CS – viz bližší popis v kapitole 4.). Pracoviště je dále vybaveno tlakovými lahvemi obsahujícími ochranný plyn (v našem případě Ar 4.6), speciální svařovací hořák (Robacta Drive CMT, který umožňuje zpětný a dopředný posuv drátu), kladkami podavače přídatného materiálu a zásobníky svařovacího drátu. Z důvodu zajištění bezpečnosti jsou kolem pracoviště robota nainstalovány bezpečnostní prvky, jako jsou skener pracovního prostoru, světelná závora a koncový spínač na dveřích, které jsou v automatickém režimu robota aktivní a zajišťují dodržení bezpečné vzdálenosti robotického ramene a obsluhy.



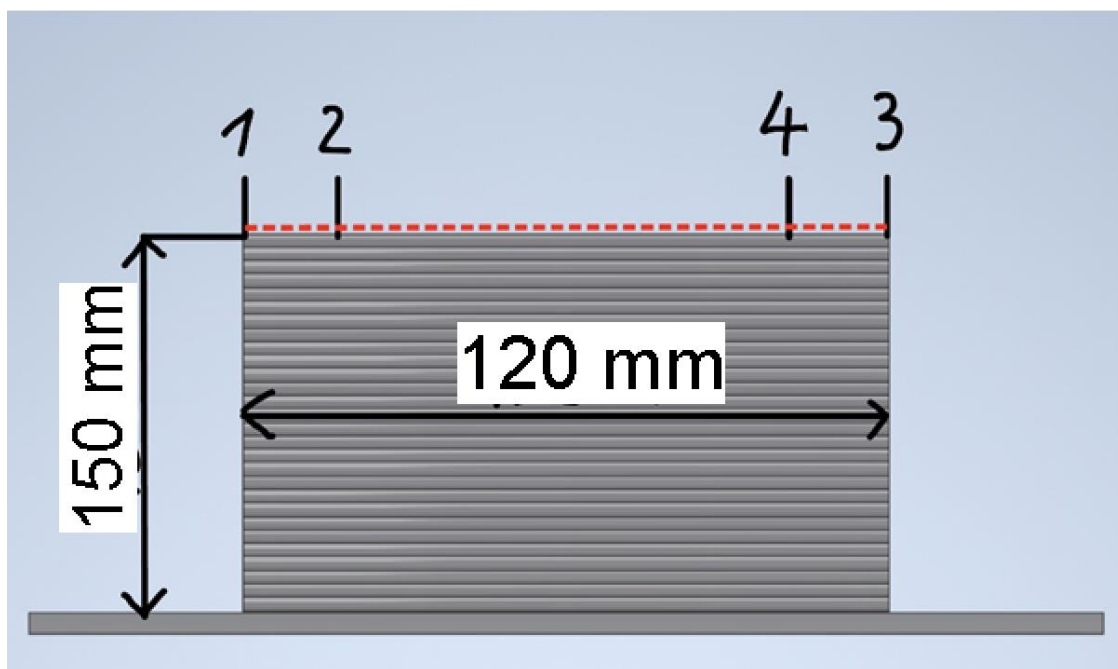
obr. 18 - Pohled na laboratorní pracoviště

## 6.2. Výroba hliníkové stěny

Hlavním cílem experimentu je zkoumat mechanické vlastnosti hliníkových komponent vyrobených z přídavného materiálu ve formě drátu plného průřezu o průměru 1,2 mm z hliníkové slitiny EN ISO 18273 : S Al 5087 (AlMg4,5MnZr) pomocí metody WAAM ve spojení s modifikovaným svařovacím procesem CMT a dalšími variantami tohoto procesu (CMT+P a CMT-CS). Pro experiment byly vytvořeny vzorky ve formě navařené stěny o rozměrech 120x150x10 mm na podkladovém plechu z hliníkové slitiny EN AW 5083 (AlMg4,5Mn0,7) o tloušťce 4 mm a rozměrech 150 x 200 mm. Deska byla připevněna pomocí čtyř rychloupínek (viz obrázek 18) rozmístěných do rohů podkladového materiálu na jednoosé polohovadlo, které je součástí robotického pracoviště. Přesnou polohu desky zajišťovaly dorazy, které zabránily posunutí ve vodorovném směru. Tyto dorazy společně s upínkami upevnilly základovou desku v přesné pozici odpovídající dráze navařování robotického ramene, která byla předem naprogramována.



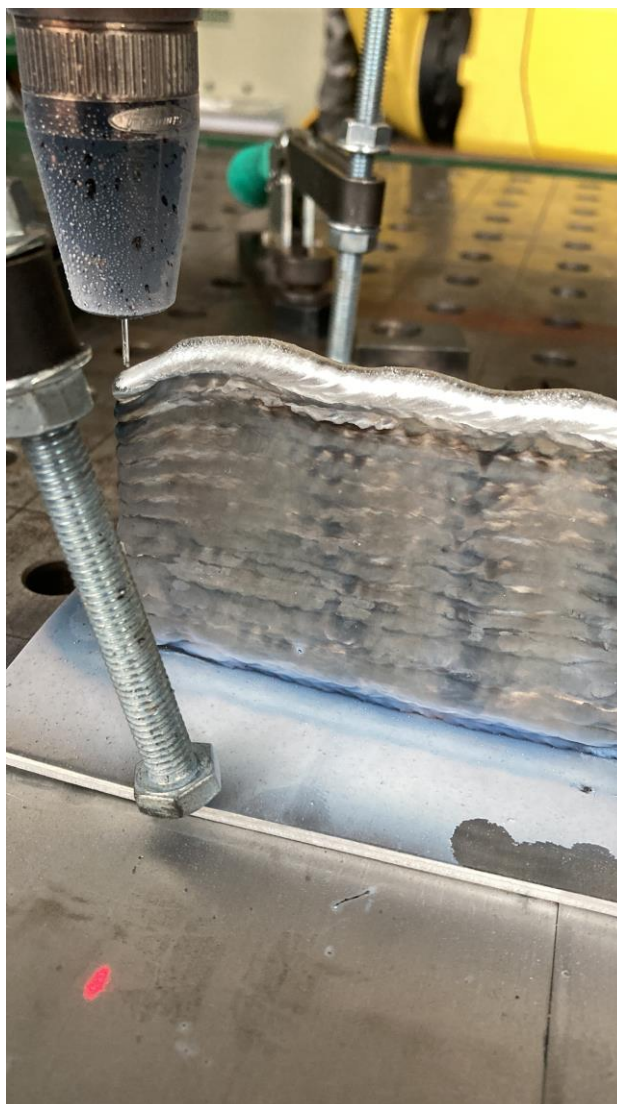
*obr. 19 - Stěna z hliníkové slitiny EN AW 5087 vyrobená metodou WAAM*



obr. 20 - Nominální rozměry hliníkové stěny a body naprogramované dráhy

Program dráhy robota obsahuje čtyři základní body, které jsou graficky znázorněny na obrázku číslo 20. Tento program byl navržen s ohledem na možnost upravit geometrické odchylky, které vznikají během procesu navařování v důsledku vysoké teploty materiálu. Postup robota včetně časů byl v experimentu použit následující.

1. Robot čeká 120 sekund
2. *Robot svařuje z bodu 1 do bodu 2* (Operátor musí rozhodnout, zda je potřeba dovařit hranu do vodorovné roviny - viz obr. 21)
3. Robot čeká 5 sekund
4. *Robot se vrací bez svařování z bodu 2 do bodu 1, kde začíná svařovací proces až do bodu 3*
5. Robot čeká 120 sekund
6. *Robot svařuje z bodu 3 do bodu 4* (Operátor musí rozhodnout, zda je potřeba dovařit hranu do vodorovné roviny - viz obr. 21)
7. Robot čeká 5 sekund
8. *Robot se vrací bez svařování z bodu 4 do bodu 3, kde začíná svařovací proces až do bodu 1*



obr. 21 - Ukázka, kdy je potřeba dovařit zborcenou hranu

Tabulka 3 - Chemické složení základního (podkladového) a přídavného materiálu [32]

Slitina	Al (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Si (%)	Zr (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Cu (%)
AlMg4,5Mn0,7	Ost.	4,34	0,63	0,13	0,076	-	0,064	0,035	0,055	0,032
AlMg4,5MnZr	Ost.	4,8	0,75	0,11	0,06	0,13	0,08	0,05	0,02	0,005

Základní mechanické vlastnosti použitého přídavného materiálu jsou uvedeny v tabulce č. 8 v kapitole 6.4



Procesní parametry navařování stěn, které byly použity pro experiment, byly nalezeny v rámci předchozích výzkumných prací a pro potřeby výroby vzorků byly pouze doladěny. Použité parametry navařování jsou ukázány v tabulce č. 4.

Tabulka 4 - Nastavené svařovací parametry [32]

Režim	Svařovací proud (A)	Svařovací napětí (V)	Svařovací rychlost (cm/min)	Rychlost posuvu drátu (m/min)
CMT	85	12,5	40	5,0
CMT + P	86	16,7	40	4,3
CMT + CS	80	14,4	40	5,5

### 6.3. Zkouška tahem

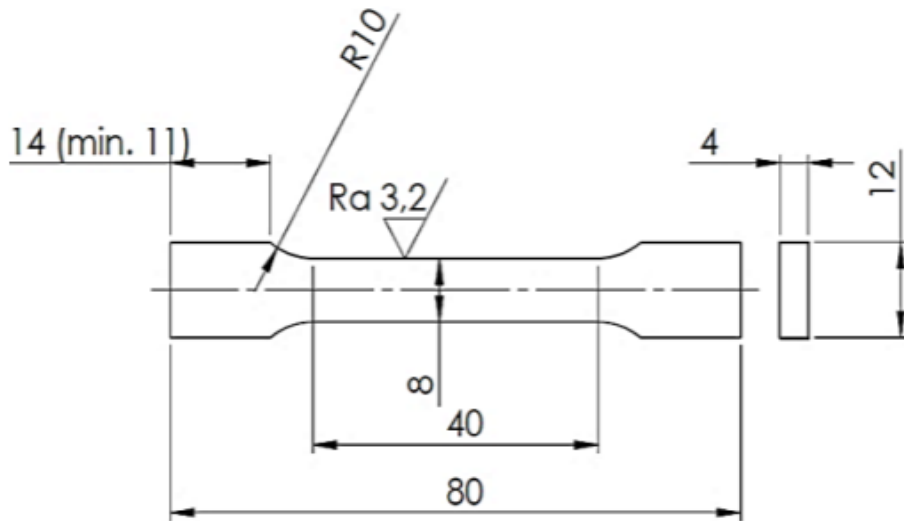
V rámci zjišťování a vyhodnocení mechanických vlastností byla realizována statická zkouška pevnosti v tahu podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Celkem bylo připraveno 18 vzorků, z nichž 9 bylo testováno ve vertikálním směru (kolmo na směr navařování) a 9 v horizontálním směru (ve směru navařování). Testy byly prováděny na elektromechanickém univerzálním zkušebním stroji značky LaborTech, konkrétně model LabTest 5.100 SP1-VM, který dokáže vyvinout maximální sílu 100 kN.

Rovnice (2) ukazuje celkové prodloužení  $\varepsilon$  [%] založené na změně délky  $\Delta L$  [mm] dělené původní délkou vzorku  $L_0$  [mm].

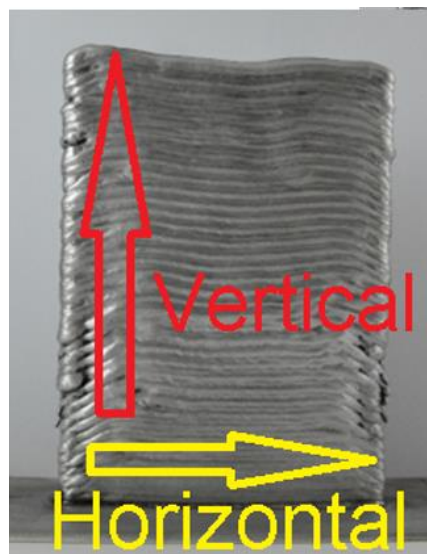
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2) \quad [32]$$

V experimentu byla provedena zkouška tahem na vzorcích vyrobených ve vertikálním a horizontálním směru. Vzorek pro tahovou zkoušku měl specifické rozměry (v mm), které jsou uvedeny na Obrázku 22. Vzorky pro zkoušku tahem byly připraveny frézováním. Deformace vzorků byly měřeny pomocí bezkontaktního optického systému GOM ARAMIS 4M s využitím

100mm titanové čočky. Tento systém pracuje na principu digitální obrazové korelace (DIC) a má rozlišení 2358 × 1728 pixelů. [32]



obr. 22 - Rozměry vzorku pro zkoušku tahem [32]



obr. 23 – Směr orientace při odběru vzorků pro zkoušku tahem

### 6.3.1. Systém ARAMIS

Optický systém s názvem ARAMIS je navržen pro provádění bezkontaktních měření pomocí digitální korelace obrazu (DIC). Tento systém je schopen měřit jak celé plochy, tak i diskrétní body. Rozsah měření ARAMISu se pohybuje od několika čtverečních milimetrů až po metry.

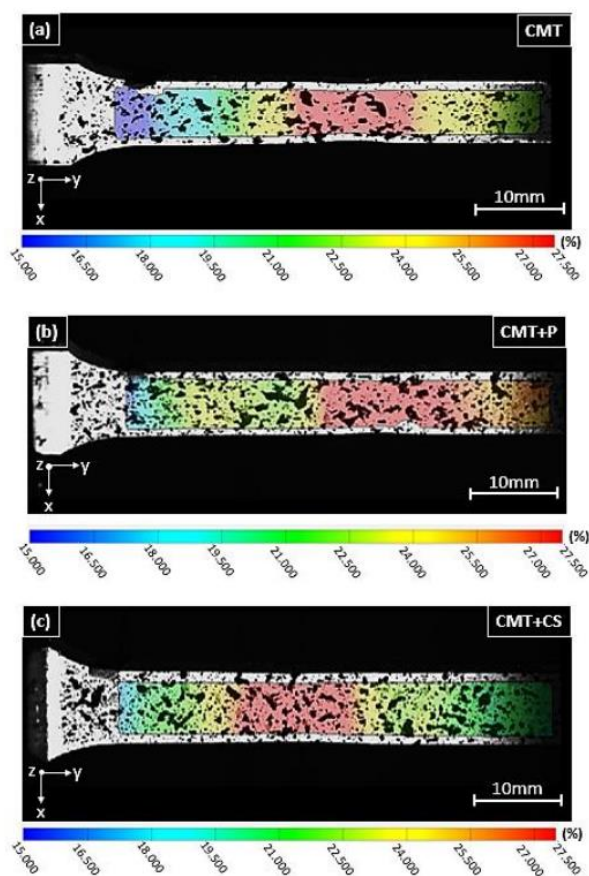
V rámci analýzy je zkoumán snímek, který se skládá z pixelů, jejichž velikost je úzce spojena s rozlišovací schopností použité kamery a velikostí sledované oblasti. Každému pixelu je na základě diskrétní funkce přiřazen stupeň šedi, který se nachází na předem stanovené škále mezi bílou a černou barvou (v experimentu bylo tedy potřeba na vzorky nanést bílou podkladovou barvou a následně nastříkat černou grafitovou barvu pro vznik kontrastu – viz obrázek 25). Pro provádění korelační analýzy jsou pixely rozděleny do množin, jež jsou označovány jako "fazety". Tato metoda organizace umožňuje efektivní vyhodnocení korelačních vztahů mezi jednotlivými pixely a usnadňuje statistickou analýzu celého obrazového snímku.

Pro provádění 3D měření deformací je nezbytné použít minimálně dvě kamery. Tyto kamery snímají pohyb jednotlivých fazet v čase. Analyzováním těchto pohybů jednotlivých bodů v čase je možné určit deformace každé fazety. [33]

**Digitální korelace obrazu (DIC)** - Metoda digitální korelace obrazu představuje optický způsob měření deformací, který je aplikovatelný jak ve 2D, tak ve 3D prostoru. Metoda pracuje na základě pořizování snímků s vysokou frekvencí (až 200 MHz pro statické procesy), které jsou následně porovnávány mezi sebou. Na těchto snímcích je sledován posuv a deformace jednotlivých bodů v průběhu času. Mezi hlavní výhody a důvody použití metody digitální korelace obrazu patří schopnost měřit deformace celé plochy, bez narušení materiálu přilepením měřicího senzoru a schopnost pracovat s širokým spektrem velikostí měřených vzorků (v rozmezí od  $10^{-9}$  do  $10^2$  metrů). [33]



obr. 24 – Aparatura systému ARAMIS v reálném měření



obr. 25 - Použití DIC při aplikovaném tahovém zatížení [32]

Data, získaná z měření systémem ARAMIS, pomáhají určovat charakteristiku a vlastnosti zkoumaných materiálů. Tyto materiálové vlastnosti jsou pak nejčastěji používány

jako základ pro numerické simulace a přispívají tak ke zlepšení výsledků z výpočtů pomocí metody konečných prvků.

**Exponent deformačního zpevnění (N)** - tento exponent je součástí matematické rovnice, která popisuje vztah mezi skutečným napětím a skutečnou plastickou deformací během jednoosého zatížení. Jinými slovy, pomáhá nám pochopit, jak se materiál chová a jak odolává deformaci, když je vystaven tahovým silám. V logaritmických souřadnicích je exponent deformačního zpevnění definován jako směrnice odpovídající přímky.

**Koeficient normálové anizotropie (R)** - Koeficient normálové anizotropie "R" popisuje, jak se testované těleso chová při plastické deformaci a jakým způsobem se ztenčuje. Tento koeficient také ukazuje, že materiál má rozdílné vlastnosti ve směru roviny plechu a ve směru kolmém na ni.

*Tabulka 5 - Výsledky DIC analýzy*

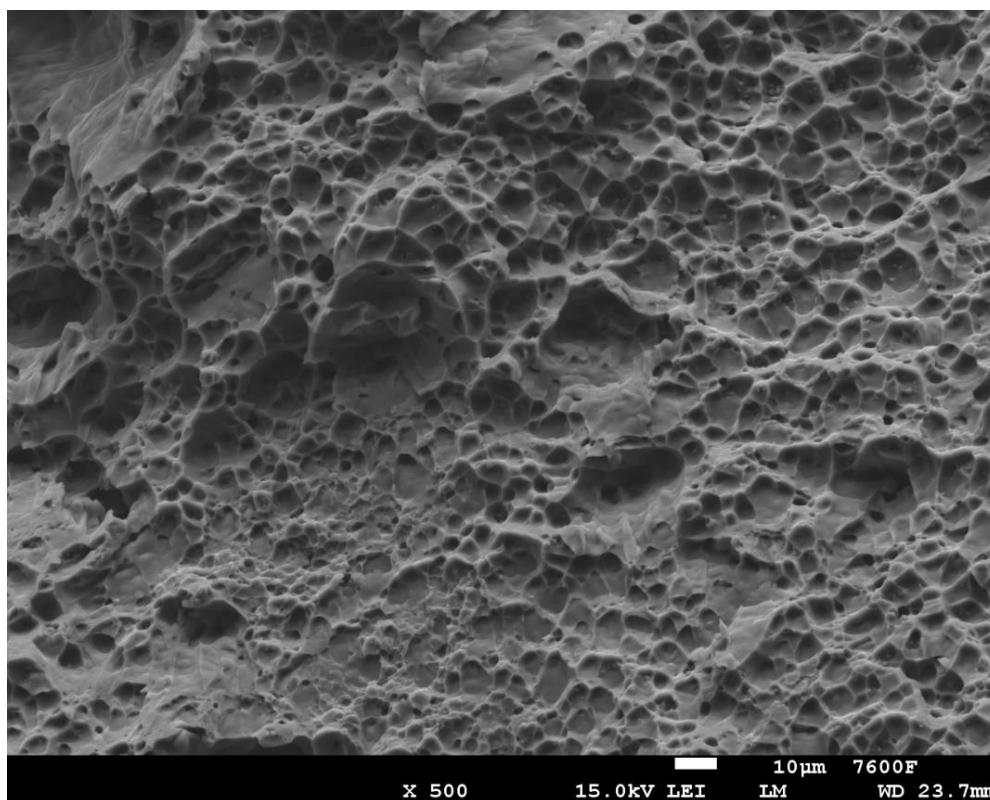
Režim	CMT		CMT + P	
Orientace	Horizontální			
Číslo vzorku	1	3	1	2
<b>N</b>	0,299	0,330	0,259	0,280
<b>R</b>	0,913	0,866	0,770	0,850

Analýza byla realizována a vyhodnocena pouze u výše vybraných vzorků. U exponentu deformačního zpevnění N rozlišujeme ( $N < 0,215$  zn. špatná tvařitelnost,  $N = 0,215 - 0,25$  zn. dobrá tvařitelnost a  $N > 0,25$  zn. výborná tvařitelnost). Všechny vzorky splňují podmínku pro výbornou tvařitelnost.

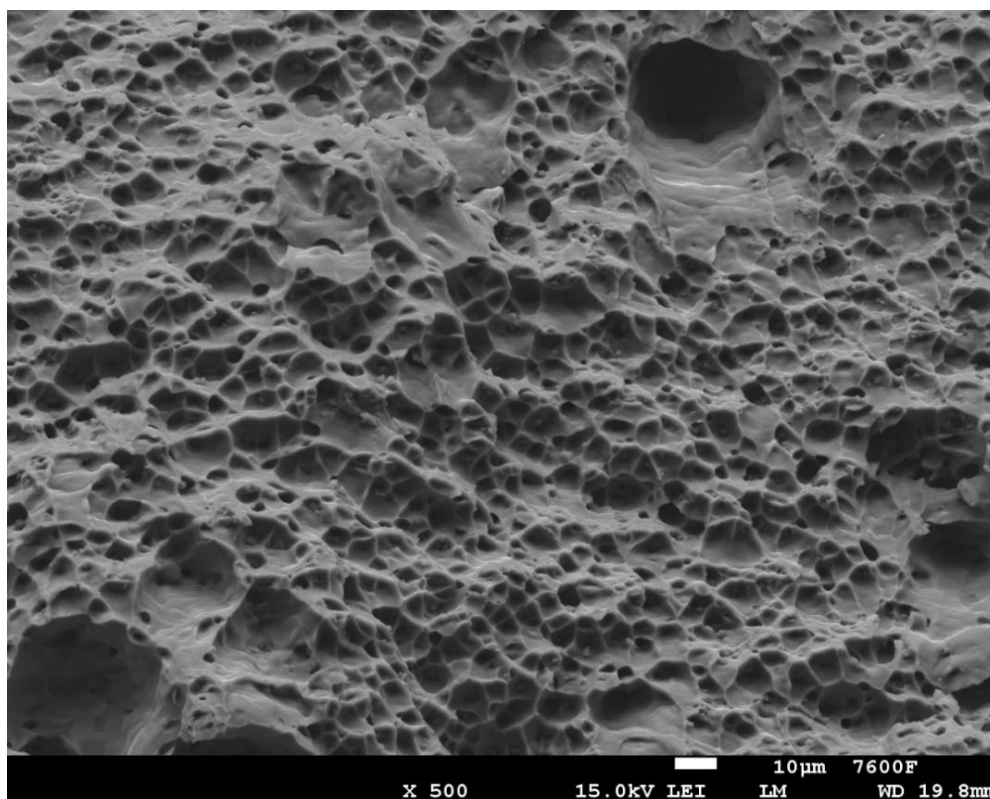
Výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v samostatné kapitole č. 6.4.

### 6.3. SEM (Skenovací Elektronová Mikroskopie)

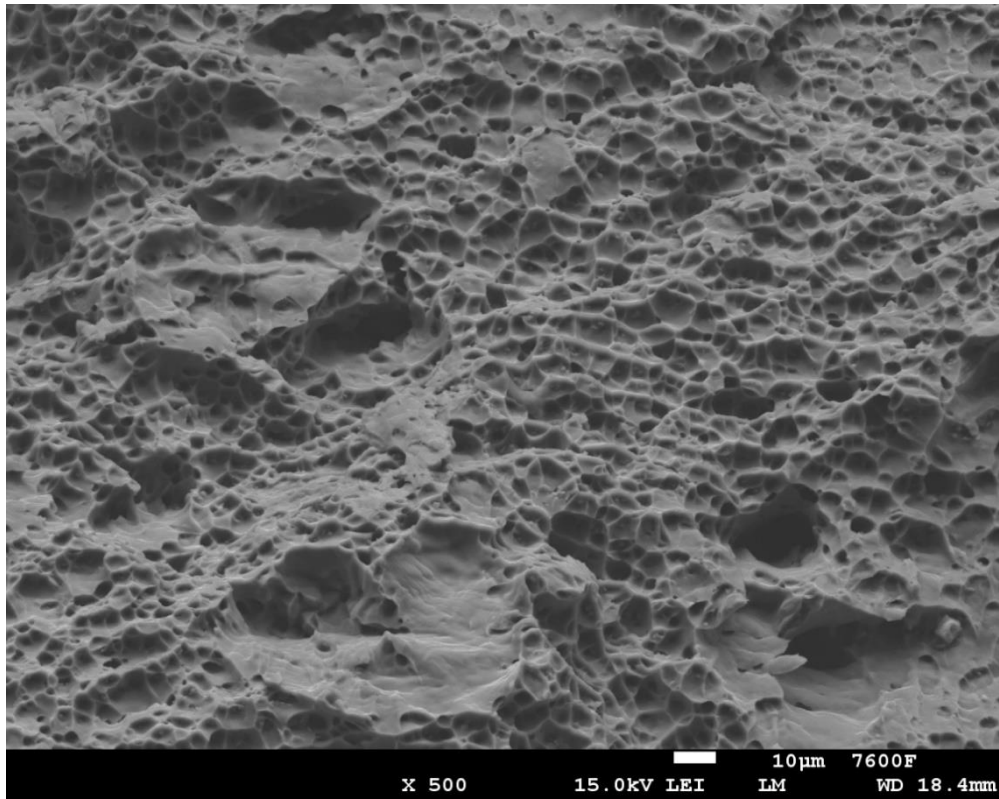
V rámci diplomové práce bylo možno využít skenovací elektronovou mikroskopii k získání obrazového zobrazení lomových ploch. Tato pokročilá technika umožnila získat poznatky o vadách nacházející se na lomové ploše testovacích vzorků po zkoušce tahem. Skenovací elektronová mikroskopie poskytla vysoké rozlišení a umožnila analyzovat povrchy vzorků.



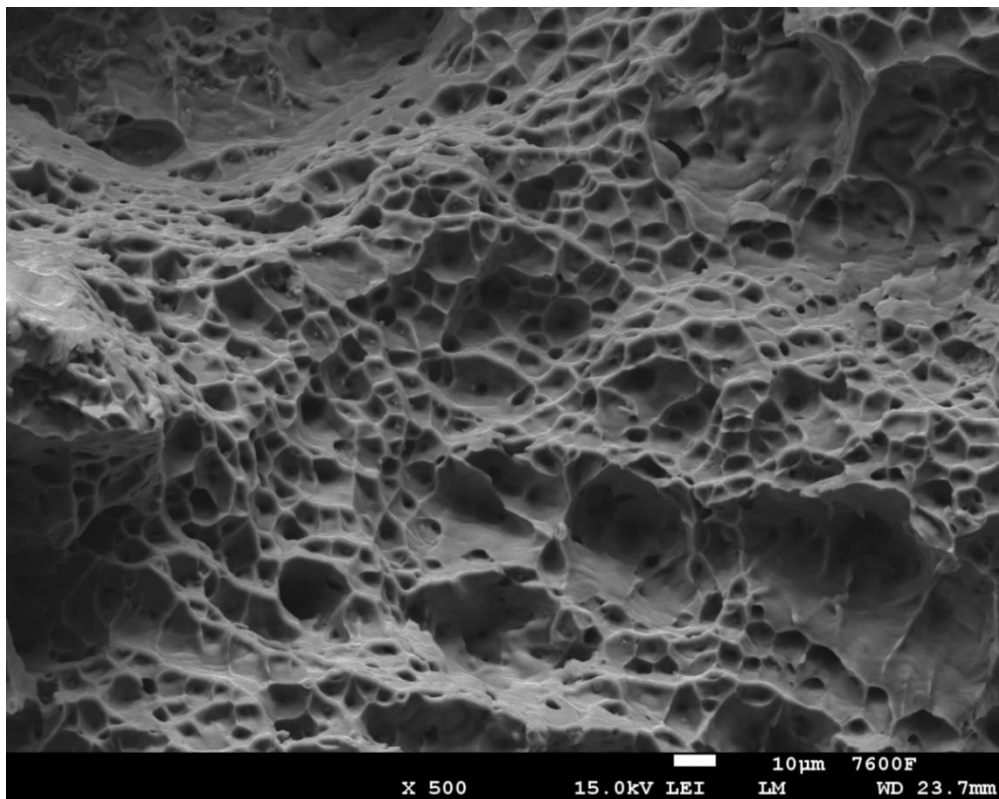
obr. 27 - Lomová plocha horizontálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT ve zvětšení 500x



obr. 26 - Lomová plocha vertikálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT ve zvětšení 500x

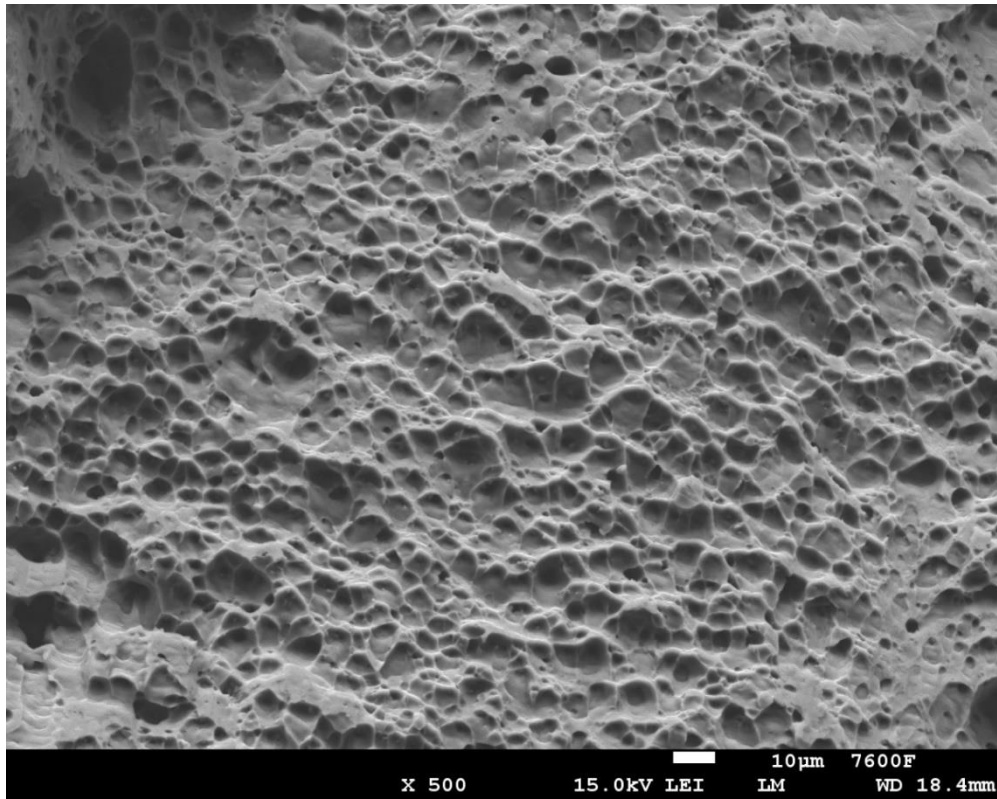


obr. 28 - Lomová plocha horizontálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - P ve zvětšení 500x

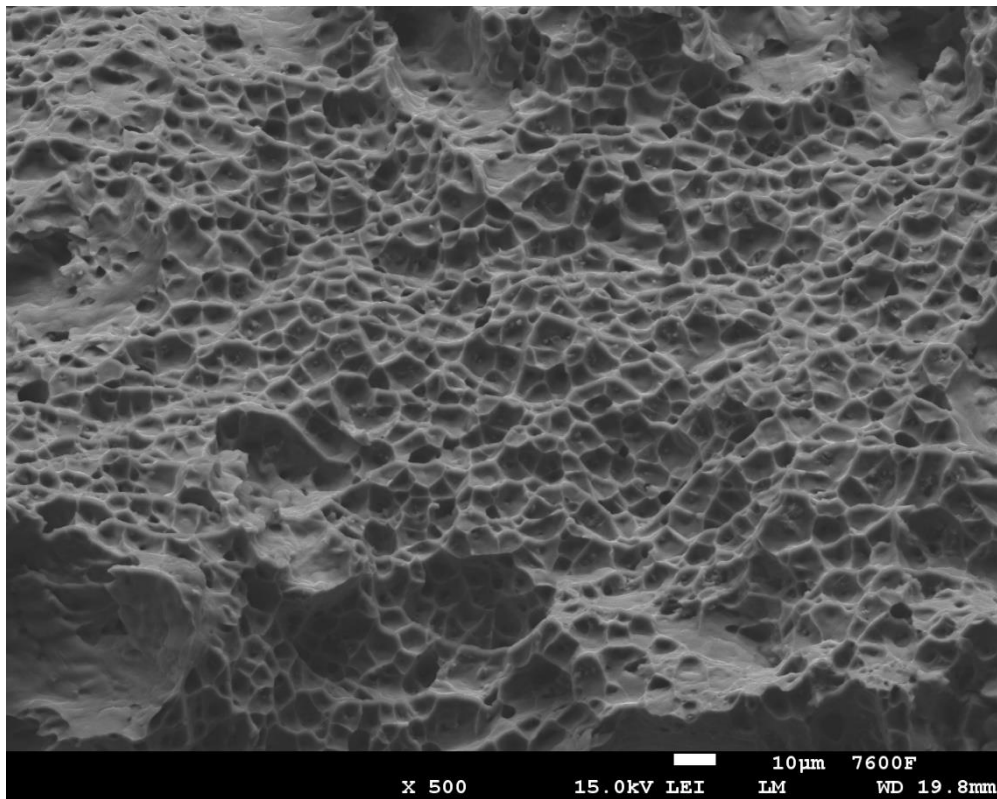


obr. 29 - Lomová plocha vertikálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - P ve zvětšení 500x





*obr. 30 - Lomová plocha horizontálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - CS ve zvětšení 500x*



*obr. 31 - Lomová plocha vertikálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - CS ve zvětšení 500x*



Na všech lomových plochách je patrná jamková morfologie, která je typická pro tvárný lom. Na obr. 27, 29 a 31 jsou také viditelné výrazné sférické útvary, jejichž původ nebyl další analýzou zkoumán. Obecně lze konstatovat, že u lomových ploch vertikálních vzorků se pozoruje výraznější výskyt těchto sférických útvarů.

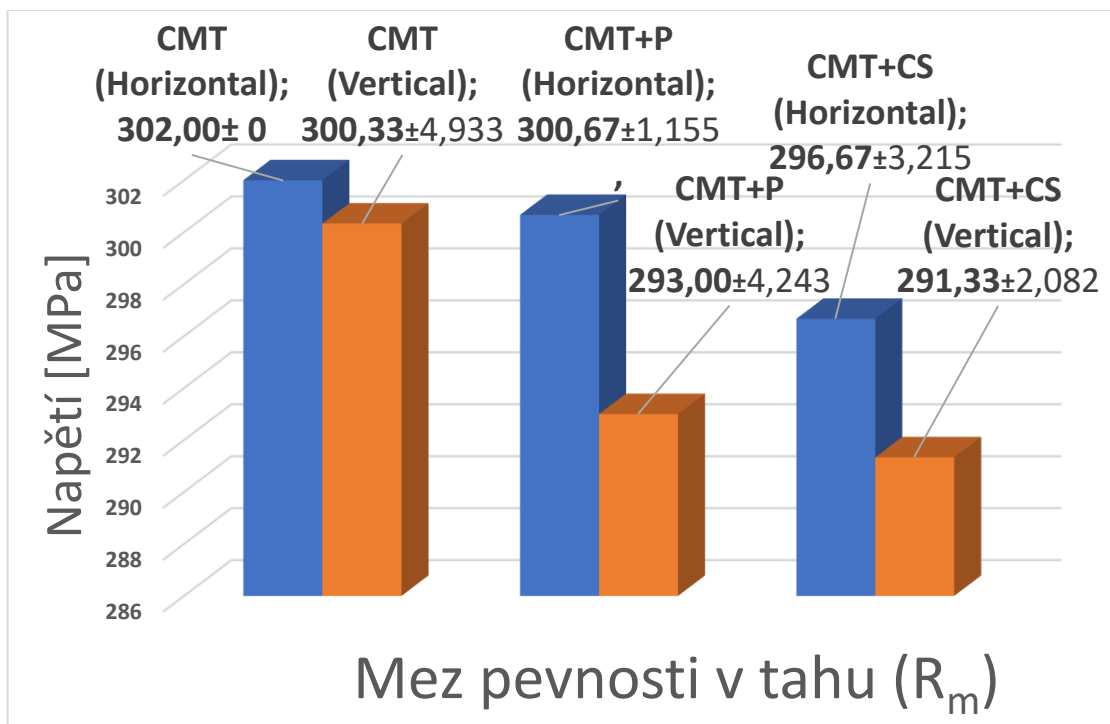
## 6.4. Výsledky zkoušky tahem dle ČSN EN ISO 6892-1

Výsledky zkoušky tahem představují klíčovou součást mé diplomové práce, neboť poskytují důležité informace o mechanických vlastnostech navařených vzorků z materiálu AlMg4,5MnZn a lze podle nich vyhodnotit přínos jednotlivých variant navařování z hlediska dosažených pevnostních charakteristik. Diskuze a interpretace těchto výsledků přispívají k hlubšímu poznání charakteristiky materiálu při zatěžování tahem a ovlivňují celkové závěry.

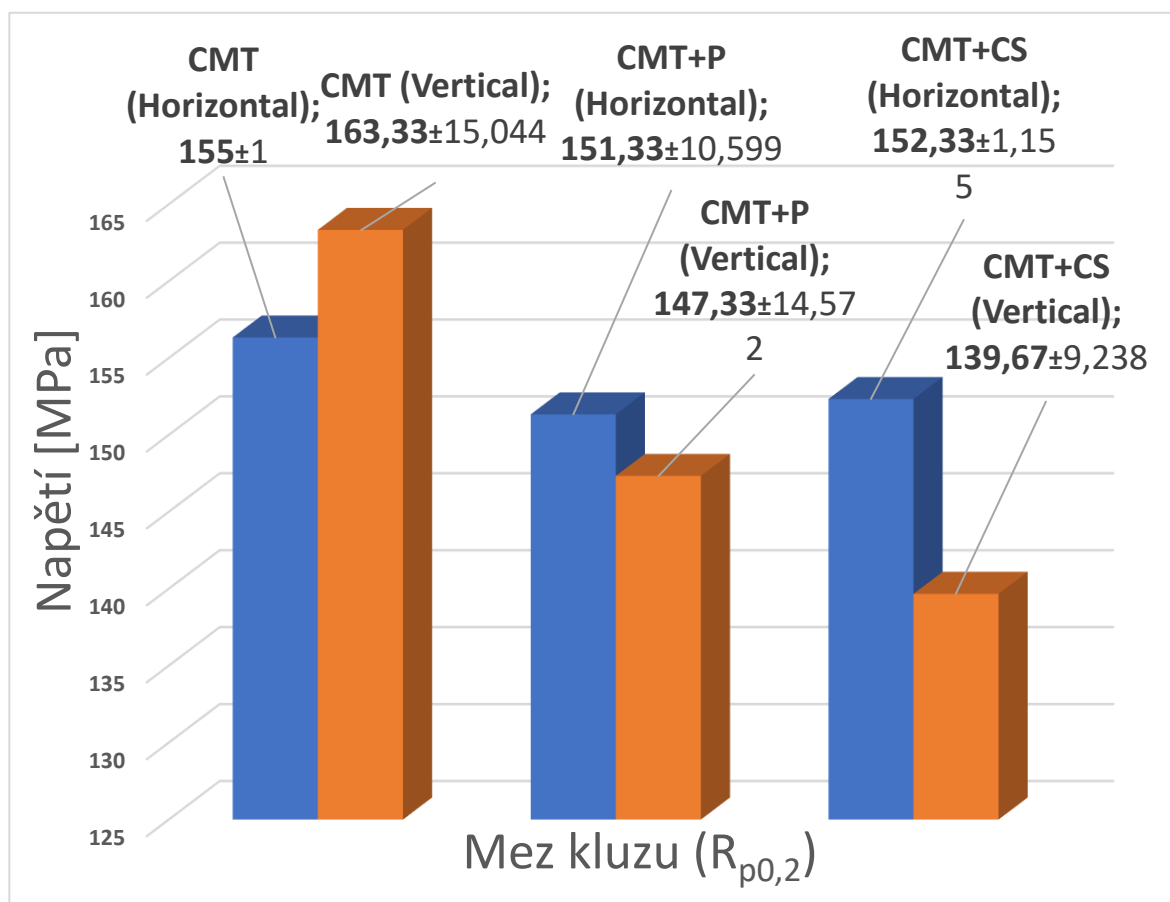
Hodnoty vyobrazené na obr. 33-35 jsou průměrné hodnoty ze tří vzorků. Pro statistickou správnost byla v SW MS EXCEL vypočítána směrodatná odchylka těchto hodnot pomocí funkce =SMODCH.P(). Hodnoty jsou tedy ve tvaru: Průměr ± Směrodatná odchylka.

*Tabulka 6 - Zkušební parametry zkoušky tahem*

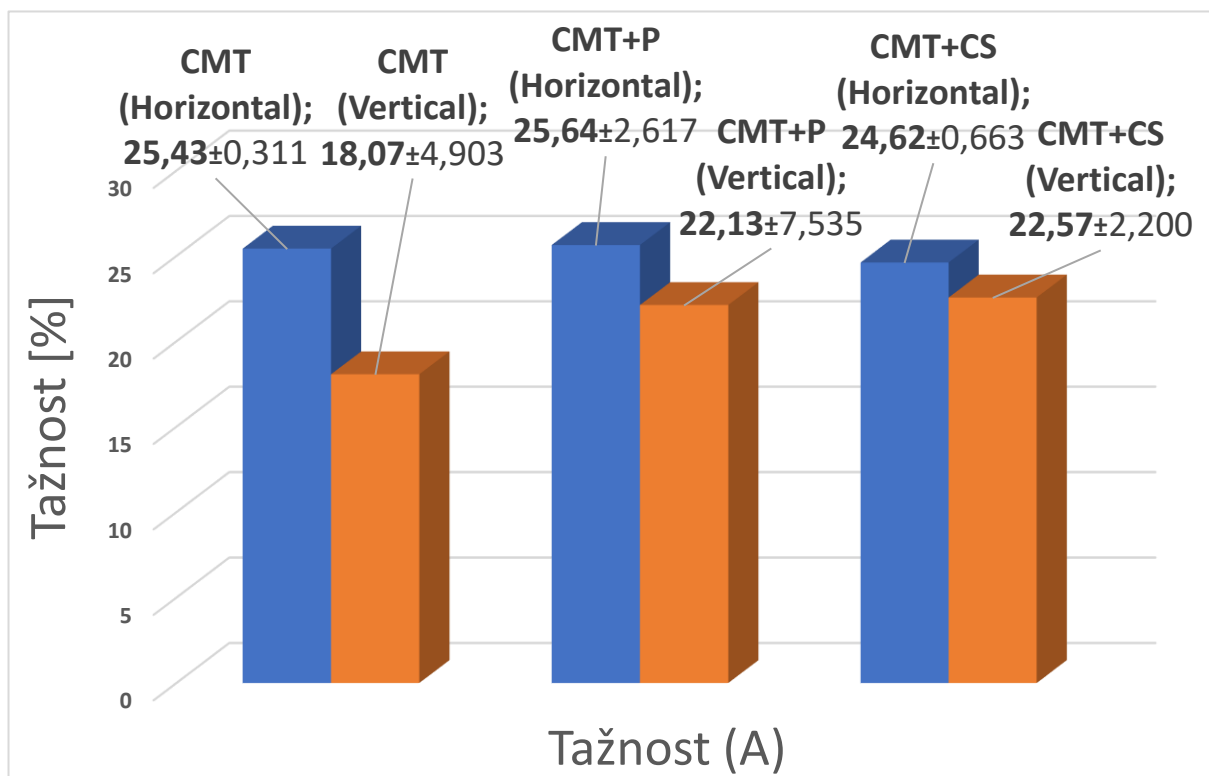
Zkušební norma:	Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1
Typ stroje:	48/17
Snímač síly:	100kN
Průtahoměr:	extenzome
Upínací přípravek:	ne
Zkušební prostor:	Spodní zkušební prostor
Rozměry vzorku:	
Zadání délek:	Le = 40,25 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 80 %



obr. 32 - Hodnoty meze pevnosti v tahu  $R_m$  (změřené v horizontálním a vertikálním směru)



obr. 33 - Hodnoty meze kluzu  $R_{p0,2}$  (změřené v horizontálním a vertikálním směru)



obr. 34 - Hodnoty tažnosti A (změřené v horizontálním a vertikálním směru)

Tabulka 7 - Výsledky zkoušky tahem pro všechny měřené vzorky

		CMT		CMT+P		CMT+CS	
Orientace		Horizontální	Vertikální	Horizontální	Vertikální	Horizontální	Vertikální
R <sub>m</sub> [MPa]	1	302	306	300	248	293	293
	2	280	297	300	296	298	289
	3	302	298	302	290	299	292
R <sub>p0,2</sub> [MPa]	1	154	162	140	131	151	145
	2	159	179	161	159	153	129
	3	156	149	153	152	153	145
A [%]	1	25,65	23,37	22,62	9,53	24,19	24,88
	2	12,86	13,70	27,05	24,1	24,28	20,50
	3	25,21	17,13	27,25	20,15	25,38	22,32

Hodnoty, které jsou vyznačeny červeně, nebyly zahrnuty do výpočtu průměrných hodnot. Tyto hodnoty odpovídají vzorkům, u kterých došlo k lomu (porušení) na hraně poloměru R10 namísto v prostřední části s průřezem 12x4 mm – viz obr. 22.

Předpokládá se, že tyto dva zmíněné vzorky mají výrazně horší mechanické vlastnosti z důvodu přítomnosti závažné strukturální vady a ovlivnily by tak výsledky experimentu.

*Tabulka 8 - Předepsané mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu EN ISO 18273 : S Al 5087 (AlMg4,5MnZr) od výrobce*

<b>Podmínky</b>	<b>Mez kluzu <math>R_{p0,2}</math> [MPa]</b>	<b>Mez Pevnosti v tahu <math>R_m</math> [MPa]</b>	<b>Tažnost A [%]</b>
Po svaření	130	280	30

## 7. Závěr

Diplomová práce se zabývala vlivem režimu navařování pomocí technologie CMT na mechanické vlastnosti komponenty z hliníkové slitiny EN AW 5087, která byla vytvořena metodou Wire and Arc Additive Manufacturing. Základní závěry této práce jsou následující:

**Pevnost v tahu  $R_m$**  horizontálních vzorků byla v průměru 299,78 MPa, což je o 1,66% vyšší hodnota, než byla zaznamenána pro vzorky vertikálního směru. Nejvyšší naměřená pevnost v tahu pro vzorky v horizontálním směru byla u vzorků navařených pomocí režimu CMT (**302 MPa**), naopak nejnižší hodnota u režimu CMT+CS (296,67 MPa). Nejvyšší naměřená pevnost v tahu pro vzorky ve vertikálním směru byla u vzorků navařených pomocí režimu CMT (**300,33 MPa**) naopak nejnižší hodnota u režimu CMT+CS (291,33 MPa). Všechny vzorky, kromě vzorku 1 ve vertikálním směru s režimem CMT+P, **splnily požadovanou mez pevnosti v tahu 280 MPa předepsanou výrobcem** - viz Tabulka 8.

**Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$**  horizontálních vzorků byla v průměru 152,89 MPa, což je o 1,85% vyšší hodnota, než byla zaznamenána pro vzorky vertikálního směru. Nejvyšší mez kluzu pro vzorky v horizontálním směru byla u vzorků navařených pomocí režimu CMT (**155 MPa**), naopak nejnižší hodnota u režimu CMT+P (151,33 MPa). Nejvyšší naměřená mez kluzu pro vzorky ve vertikálním směru byla u vzorků navařených pomocí režimu CMT (**163,33 MPa**) – **vyšší, než u horizontálních vzorků stejného režimu!** Naopak nejnižší hodnota u režimu CMT+CS (139,67 MPa). Všechny vzorky, kromě vzorku 2 ve vertikálním směru s režimem CMT+CS, **splnily požadovanou smluvní mez kluzu 130 MPa předepsanou výrobcem** - viz Tabulka 8.

**Tažnost A** horizontálních vzorků byla v průměru 25,23 %, což je o 20,21 % vyšší hodnota, než byla zaznamenána pro vzorky vertikálního směru. Nejvyšší tažnost pro vzorky v horizontálním směru byla u vzorků navařených pomocí režimu CMT+P (**25,64 %**), naopak nejnižší hodnota u režimu CMT+CS (24,62 %). Nejvyšší naměřená tažnost pro vzorky ve vertikálním směru byla u vzorků navařených pomocí režimu CMT+CS (**22,57 %**), naopak nejnižší hodnota u režimu CMT (18,07 %). Všechny vzorky **nedosáhly požadované tažnosti**

**30 % předepsanou výrobcem (tzn. výsledná tažnost navařeného vzorku – návarového kovu - je nižší než u použitého přídavného materiálu) – viz Tabulka 8.**

Na základě získaných výsledků experimentu lze konstatovat, že vzorky navařené režimem CMT dosahují nejlepších pevnostních charakteristik ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ). Proto je možné tuto metodu doporučit pro využití v procesu WAAM.

**Pevnost v tahu  $R_m$**  pro horizontální vzorky dosahuje v průměru hodnoty **302 MPa** a u vertikálních vzorků v průměru **300,33 MPa**.

**Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$**  pro horizontální vzorky dosahuje v průměru hodnoty **155 MPa** a u vertikálních vzorků v průměru **163,33 MPa**.

Obecně lze konstatovat, že u komponent vyrobených aditivní technologií, můžeme pozorovat anizotropii mechanických vlastností, kde v horizontálním směru (směr navařování jednotlivých vrstev) – viz obr. 23 má návarový kov lepší vlastnosti pro tahové zatížení, naopak ve vertikálním směru (kolmo na směr navařování – tzn. přes vrstvy) má komponenta lepší vlastnosti pro tlakové zatížení. Experiment ukázal, že u režimu CMT mají horizontální vzorky v průměru vyšší hodnotu meze pevnosti v tahu  $R_m$  (302 MPa), než vzorky odebrané ve vertikálním směru  $R_m$  (300,33 MPa), avšak smluvní mez kluzu vyšla v průměru vyšší u vertikálních vzorků vyšší ( $R_{p0,2} = 163,33$  MPa), než u vzorků horizontálních ( $R_{p0,2} = 155$  MPa).

Skutečnost, že v experimentu vyšla smluvní mez kluzu vyšší u vertikálních vzorků je poměrně ojedinělá a může se jednat o stochastický jev, který při měření vzorků navařených pomocí režimu CMT nastal. Z pohledu pevnostních charakteristik se nejedná o jev, který by výrobní metodu WAAM nějakým způsobem degradoval, jelikož všechny započítané vzorky navařené metodou CMT v horizontálním i vertikálním směru splňují výrobcem přídavného materiálu předepsané mechanické vlastnosti – viz Tabulka 8.

## Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] KOLAŘÍK, Ladislav. *Technologie additive manufacturing pomocí konvenčních i speciálních metod navařování WAAM - Wire + Arc Additive Manufacture, Interní podklady projektu RPMT 2016, ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2023-06-09].
- [2] VTÍPIL, Jaroslav. *Aditivní technologie (nejen) v leteckém průmyslu* [online]. [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-nejen-v-leteckem-prumyslu>
- [3] KOLAŘÍK, Ladislav., KOVANDA, Karel., GURČÍK, Tomáš. *Využití metody robotického navařování - WAAM a porovnání s 3D tiskem kovových materiálů, Dny svařovací techniky 2019, Rychnov nad Kněžnou, 2019.*
- [4] CHUA, Chee, Kai., LEONG, Kah, Fai. *3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING - PRINCIPLES AND APPLICATION* [online]. [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Gy88DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Chua,+C.+K.+%26+Leong,+K.+F+\(2015\).+3D+printing+and+additivemanufacturing:+principles+and+applications,+Singapore:+World+Scientific&ots=ki6BUmzWpY&sig=fDbJd84sXn38Iz8qozMsfaOiX0&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=true](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Gy88DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Chua,+C.+K.+%26+Leong,+K.+F+(2015).+3D+printing+and+additivemanufacturing:+principles+and+applications,+Singapore:+World+Scientific&ots=ki6BUmzWpY&sig=fDbJd84sXn38Iz8qozMsfaOiX0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true). Nanyang Technological University.
- [5] CHEN, J.: *Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012.*
- [6] BAUFELD, B., BRANDL, E., VAN, Der, Biest. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. [cit. 2023-06-10].
- [7] KOLAŘÍK, Ladislav., SUCHÁNEK, Jan., KOLAŘÍKOVÁ, Marie. Navařování metodou WAAM: Materiály, Výroba a technologie, Průmysl 4.0 & Vzdělávání. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2018, , 1 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam>

- [8] *ResearchGate: An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals* [online]. [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Electron-Beam-Melting-EBM-mechanism-Source-arcamcom\\_fig1\\_323791292](https://www.researchgate.net/figure/Electron-Beam-Melting-EBM-mechanism-Source-arcamcom_fig1_323791292)
- [9] *Direct Metal Laser Sintering*. [online], [cit. 28. 04. 2011]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>>. [online]. [cit. 2023-06-10].
- [10] *WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING. WAAMMat* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://waammat.com/about/waam> [online]. [cit. 2023-06-09].
- [11] MCANDREW, Anthony R., ALVAREZ, ROSALES, Marta. *Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. Additive Manufacturing* [online]. 2018 [cit. 2023-06-09].
- [12] KOLAŘÍK, Ladislav. *Technologie additive manufacturing pomocí konvenčních i speciálních metod navařování* [online]. [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: Interní podklady projektu RPMT 2016
- [13] GURČÍK, Tomáš. *Stabilita procesu technologie WAAM*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [14] JEŽEK, Štěpán., GURČÍK, Tomáš. *Kalorimetrické hodnocení účinnosti vybraných přenosů kovu pro metodu MIG/MAG* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-08-08]. Dostupné z: [https://my.fs.cvut.cz/imp/view.php?actionID=view\\_attach&id=6&muid=%7B5%7DINBOX615&view\\_token=jPw-XEgAyT-HZztY4SmpK8w&uniq=1605976000051](https://my.fs.cvut.cz/imp/view.php?actionID=view_attach&id=6&muid=%7B5%7DINBOX615&view_token=jPw-XEgAyT-HZztY4SmpK8w&uniq=1605976000051). Technická zpráva. ČVUT v Praze.
- [15] NEJEDLÝ, Tomáš. *Porovnání svařování MAG a svařování plazmou* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-08-08]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/32725/final-thesis.pdf?sequence=6>. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [16] KOLAŘÍK, Ladislav. *Úvod do svařování v ochranných atmosférách* [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-08-08]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/188774/mod\\_resource/content/1/1\\_uvod\\_tsv\\_2019\\_V2.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/188774/mod_resource/content/1/1_uvod_tsv_2019_V2.pdf). ČVUT v Praze. Prezentace. ČVUT v Praze.



- [17] MÁŠOVÁ, Pavla. *MOŽNOSTI REGULACE TEPLA VNESENÉHO DO SVARU PŘI MIG/MAG SVAŘOVÁNÍ* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-08-08]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15298](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15298). Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.
- [18] JEŽEK, Štěpán., GURČÍK, Tomáš., KOLAŘÍK, Ladislav., ROHAN, Pavel. *Calorimetric evaluation of thermal efficiency of selected metal transfers for MAG welding*. Dostupné také z: [https://my.fs.cvut.cz/imp/view.php?actionID=view\\_attach&id=5&muid=%7B5%7DINBOX615&view\\_token=jPw-XEgAyT-HZztY4SmpK8w&uniq=1606041698630](https://my.fs.cvut.cz/imp/view.php?actionID=view_attach&id=5&muid=%7B5%7DINBOX615&view_token=jPw-XEgAyT-HZztY4SmpK8w&uniq=1606041698630). Department of Manufacturing Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague. ČVUT v Praze.
- [19] TALALAEV, Robert., VEINTHAL, Renno., LAANSOO, Andres., SARKANS, Martinš. *Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products* [online]. [cit. 2023-06-12]. Dostupné z: <https://kirj.ee/estonian-journal-of-engineering-publications/?filter%5Byear%5D=2012&filter%5Bissue%5D=188&filter%5Bpublication%5D=1404&v=928568b84963>
- [20] FURUKAWA, K. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets. *Weld Int.* [online]. [cit. 2023-06-12]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1533/wint.2006.3598>
- [21] *Fronius CMT - Brochure* [online]. [cit. 2023-06-06]. Dostupné z: [https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Brochures/PW\\_BRO\\_CMT\\_EN.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Brochures/PW_BRO_CMT_EN.pdf)
- [22] MUSTERMANN, Maximilian. *CMT: Fronius* [online]. In: . [cit. 2023-06-06]. Dostupné z: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/equipamentos/fronius-cold-metal-transfer.pdf>
- [23] FRONIUS. *CMT - Brožura* [online]. s. 20 [cit. 2023-06-12].
- [24] BARTÁK, J. (2008). *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. Praha: Dashöfer [online]. [cit. 2023-06-12].

- [25] JANOVEC, J., CEJP, J. *Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení. (nedatováno). Nauka o materiálu (str. 17). ČVUT, FS, Ústav materiálového inženýrství. Získáno 2017-09-24 [online]. [cit. 2023-06-12].*
- [26] MACHÁČEK, J. *Konstrukce z hliníku a nerez. (nedatováno). Ocelové konstrukce 3. Praha: ČVUT, FSV. Získáno 2017-09-24 [online]. [cit. 2023-06-12].*
- [27] KOLAŘÍK, Ladislav a KOLEKTIV. *Konstrukce a navrhování svarových spojů: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Česká svářečská společnost ANB. Praha, 2017.*
- [28] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin [online]. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/metalurgie-nezelezných-kovu/metalurgienezeleznýchkovu-skripta.pdf>*
- [29] BENEŠ, Libor. *Výukový materiál - Al slitiny [online]. , 9 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/PDF\\_01-Slitiny%20Al.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/PDF_01-Slitiny%20Al.pdf)*
- [30] VOJTĚCH, L. *Kovové materiály [online]. [cit. 2023-06-13].*
- [31] SEDLÁČEK, KRÁLÍK a ŠEJNOHA. *Difusní a precipitační procesy v kovových soustavách [online]. Praha [cit. 2023-06-13].*
- [32] PAVLÍK, Marián., SAHUL, Miroslav., SAHUL, Martin., NOVÁK, Vít. *Influence of CMT overlay welding mode on the microstructure and mechanical properties of 5087 aluminium alloy fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing [online]. 2023 [cit. 2023-07-04].*
- [33] *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. In: Correlated Solutions [online]. [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>*

## Seznam Obrázků

obr. 1 - Ekonomicky výhodného užití aditivní výroby [2] .....	13
obr. 2 - Možné dělení aditivní technologie [3] .....	13
obr. 3 - Schéma technologie LAM [7] .....	15
obr. 4 – Schéma zařízení EBM [8] .....	16
obr. 5 - Výrobky vyrobené metodou SMD [5] .....	17
obr. 6 - Schéma metody WAAM s TIG technologií (vlevo) [11] a typické uspořádání pracoviště (vpravo) [12] .....	18
obr. 7 - Součást letadlového podvozku z titanové slitiny [7] .....	20
obr. 8 - Faktory ovlivňující kvalitu WAAM procesu [3] .....	21
obr. 9 - Hodnocení pomocí SW a EWT (vlevo) [5] [1] hodnocení reálného vzorku (vpravo) [13] .....	21
Obr. 10 - Schéma svařovacího procesu MIG/MAG [15] .....	23
Obr. 11 - Příklad plněné elektrody (vlevo, uprostřed) a drát plného průřezu (vpravo) [16] ...	24
Obr. 12 - Vliv ochranné atmosféry na tvar průřezu svaru a rozměr průvaru [16] .....	25
obr. 13 - Hrubost zrna v TOO [17] .....	27
obr. 14 - Jednotlivé fáze režimu CMT [22] .....	29
obr. 15 - Parametrová charakteristika jednotlivých svařovacích režimů [23] .....	29
obr. 16 - svařovací parametry v průběhu cyklů CMT [19] [23] .....	30
obr. 17 -Diagram tepelného zpracování vytvrzování za tepla [28] .....	36
obr. 18 - Pohled na laboratorní pracoviště .....	37
obr. 19 - Stěna z hliníkové slitiny EN AW 5087 vyrobená metodou WAAM .....	38
obr. 20 - Nominální rozměry hliníkové stěny a body naprogramované dráhy .....	39
obr. 21 - Ukázka, kdy je potřeba dovařit zborcenou hranu .....	40
obr. 22 - Rozměry vzorku pro zkoušku tahem [32] .....	42
obr. 23 – Směr orientace při odběru vzorků pro zkoušku tahem .....	42
obr. 24 – Aparatura systému ARAMIS v reálném měření .....	44
obr. 25 - Použití DIC při aplikovaném tahovém zatížení [32] .....	44
obr. 27 - Lomová plocha vertikálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT ve zvětšení 500x .....	46
obr. 26 - Lomová plocha horizontálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT ve zvětšení 500x .....	46

obr. 28 - Lomová plocha horizontálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - P ve zvětšení 500x .....	47
obr. 29 - Lomová plocha vertikálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - P ve zvětšení 500x .....	47
obr. 30 - Lomová plocha horizontálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - CS ve zvětšení 500x .....	48
obr. 31 - Lomová plocha vertikálního vzorku - viz obr. 23 navařený režimem CMT - CS ve zvětšení 500x .....	48
obr. 32 - Hodnoty meze pevnosti v tahu $R_m$ (změřené v horizontálním a vertikálním směru)	50
obr. 33 - Hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ (změřené v horizontálním a vertikálním směru).....	50
obr. 34 - Hodnoty tažnosti A (změřené v horizontálním a vertikálním směru) .....	51

## Seznam Tabulek

Tabulka 1 – Porovnání parametru BTF pro součást z obr. 7 [7] .....	20
Tabulka 2 - Fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku v porovnání s nízkouhlíkovou ocelí [27] .....	32
Tabulka 3 - Chemické složení základního (podkladového) a přídavného materiálu [32] .....	40
Tabulka 4 - Nastavené svařovací parametry [32] .....	41
Tabulka 5 - Výsledky DIC analýzy .....	45
Tabulka 6 - Zkušební parametry zkoušky tahem .....	49
Tabulka 7 - Výsledky zkoušky tahem pro všechny měřené vzorky.....	51
Tabulka 8 - Předepsané mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu EN ISO 18273 : S Al 5087 (AlMg4,5MnZr) od výrobce .....	52

## Seznam Příloh

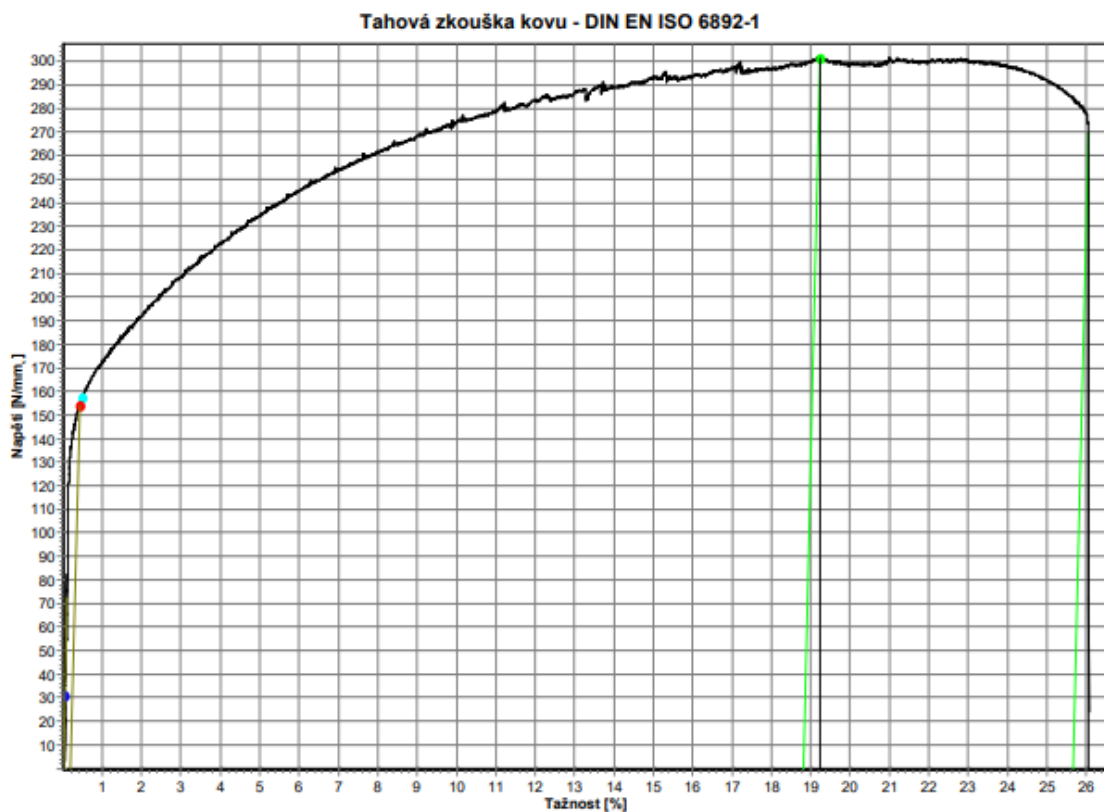
Příloha 1 - CMT 1 – Horizontální.....	63
Příloha 2 - CMT 2 – Horizontální.....	64
Příloha 3 - CMT 3 – Horizontální.....	65
Příloha 4 - CMT 1 - Vertikální.....	66
Příloha 5 -CMT 2 - Vertikální.....	67
Příloha 6 - CMT 3 - Vertikální.....	68
Příloha 7 - CMT+P 1 – Horizontální.....	69
Příloha 8 - CMT+P 2 – Horizontální.....	70
Příloha 9 - CMT+P 3 – Horizontální.....	71
Příloha 10 - CMT+P 1 – Vertikální.....	72
Příloha 11 - CMT+P 2 – Vertikální.....	73
Příloha 12 - CMT+P 3 – Vertikální.....	74
Příloha 13 - CMT+CS 1 – Horizontální.....	75
Příloha 14 - CMT+CS 2 – Horizontální.....	76
Příloha 15 - CMT+CS 3 – Horizontální.....	77
Příloha 16 - CMT+CS 1 – Vertikální.....	78
Příloha 17 - CMT+CS 2 – Vertikální.....	79
Příloha 18 - CMT+CS 3 – Vertikální.....	80

# Přílohy:

## Příloha 1 - CMT 1 – Horizontální

### 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 = 39,05 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %

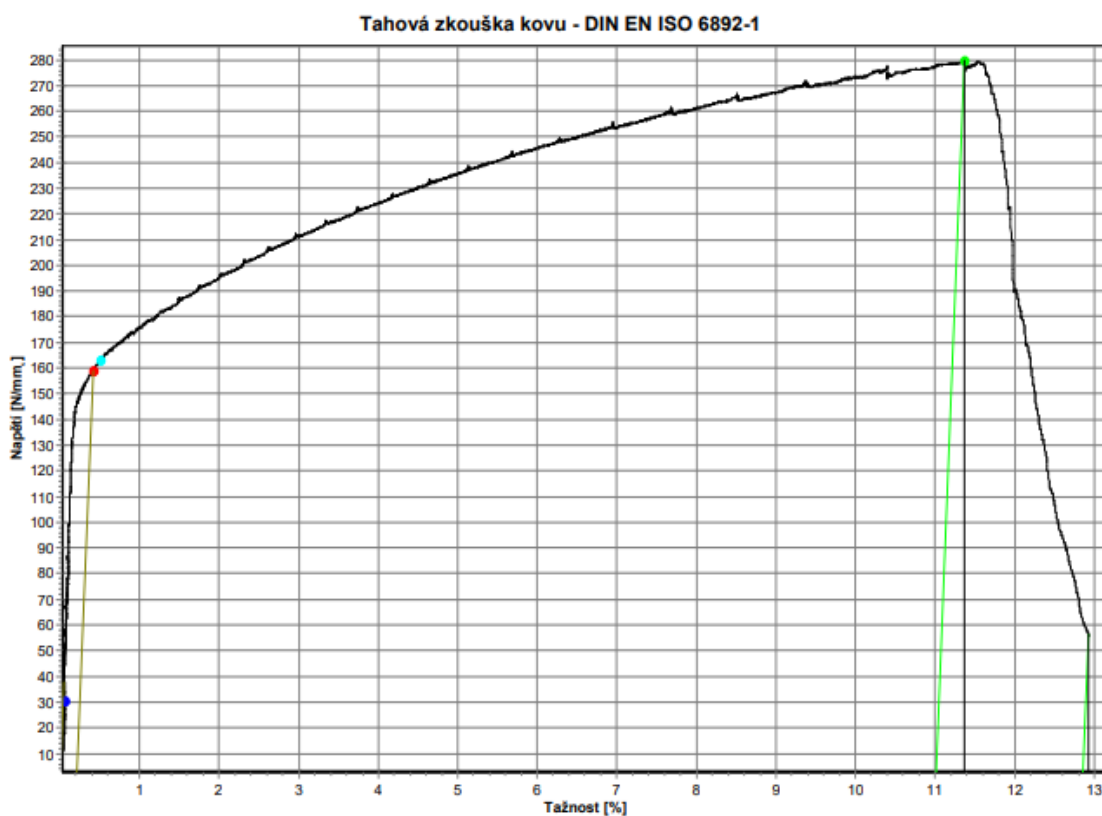


### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
8	x	23.03.23	16:14			67,932	154	5055,20	158	0	0
		Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	AgT %	At %				
8		302	9890,40	18,80	25,65	19,24	26,05				

## 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 = 41,47 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



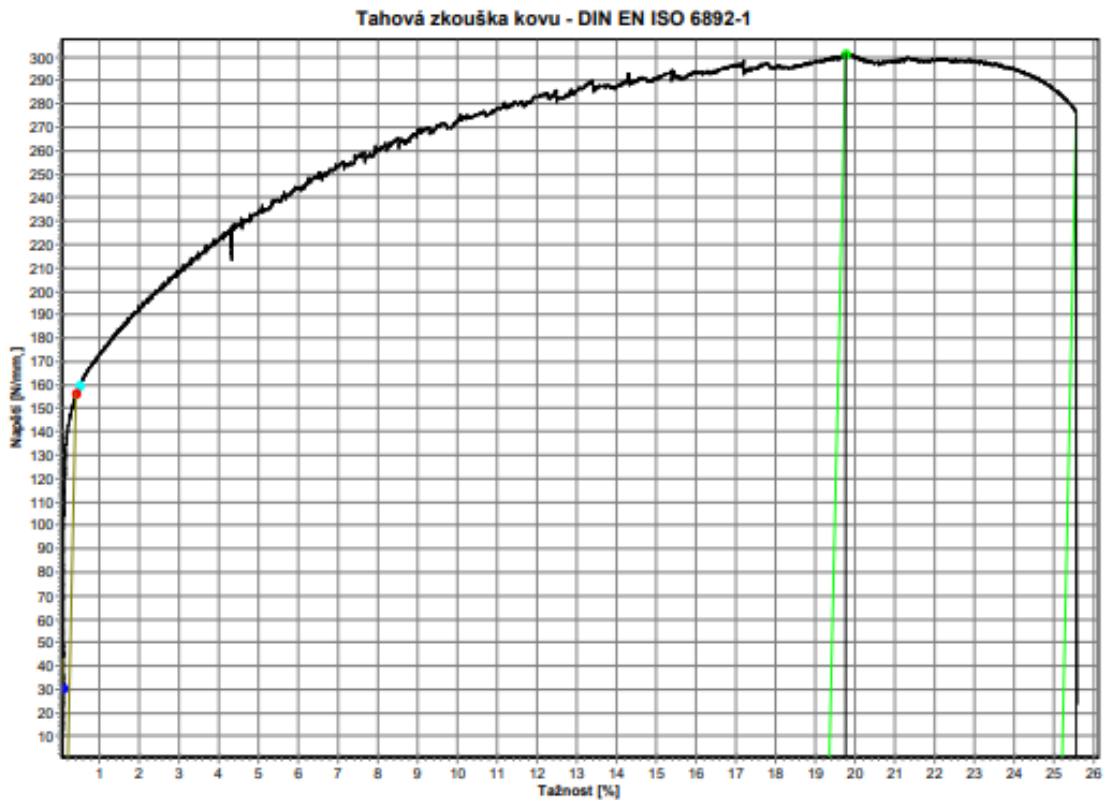
## Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm <sup>2</sup>	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm <sup>2</sup>	ReH N/mm <sup>2</sup>	ReL N/mm <sup>2</sup>
9	x	23.03.23	16:31			75,612	159	5212,40	163	0	0
		Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
9		280	9170,50	11,00	12,86	11,37	12,93				



### 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: Le = 39,8 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zadáání délky: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Zkušební rychlosti: F0 = 1000 N  
 Přepínací body: Síla = 75000 N; dF = 80 %



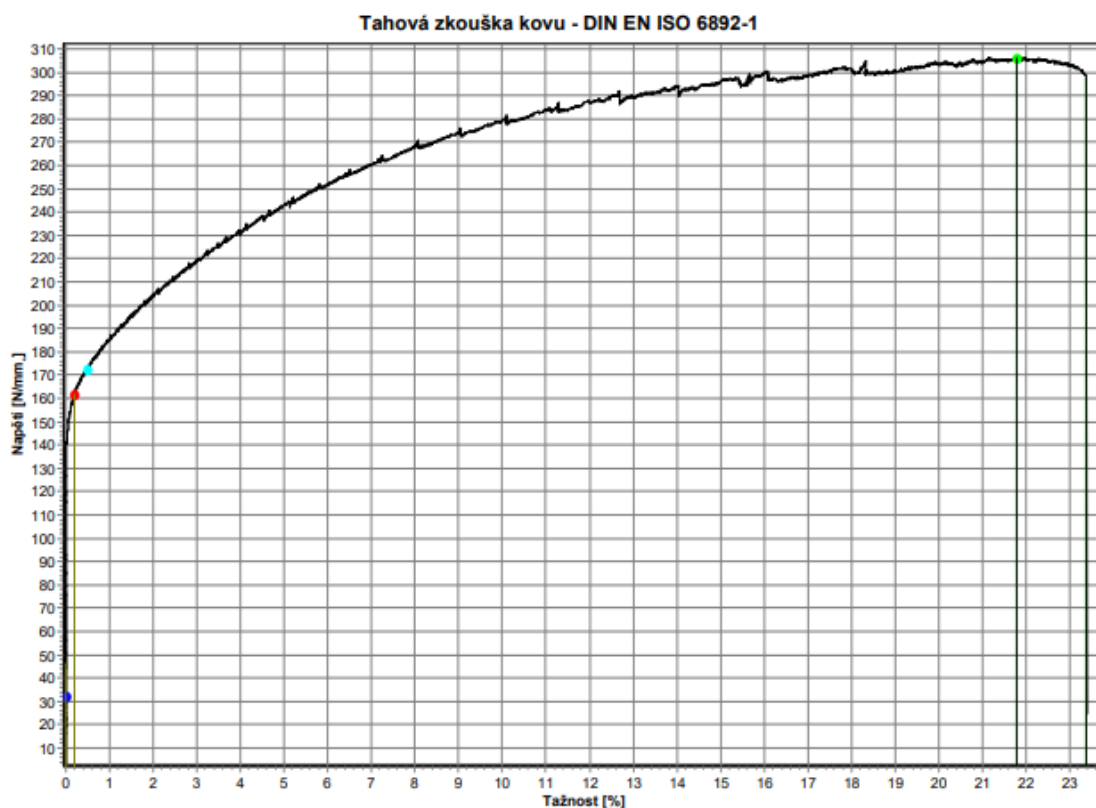
### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
10	x	27.03.23	11:15			73,628	156	5148,50	160	0	0
		Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
10		302	9945,50	19,35	25,21	19,76	25,58				

## Příloha 4 - CMT 1 - Vertikální

### 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:  
 Zadání délek: Le = 39,12 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



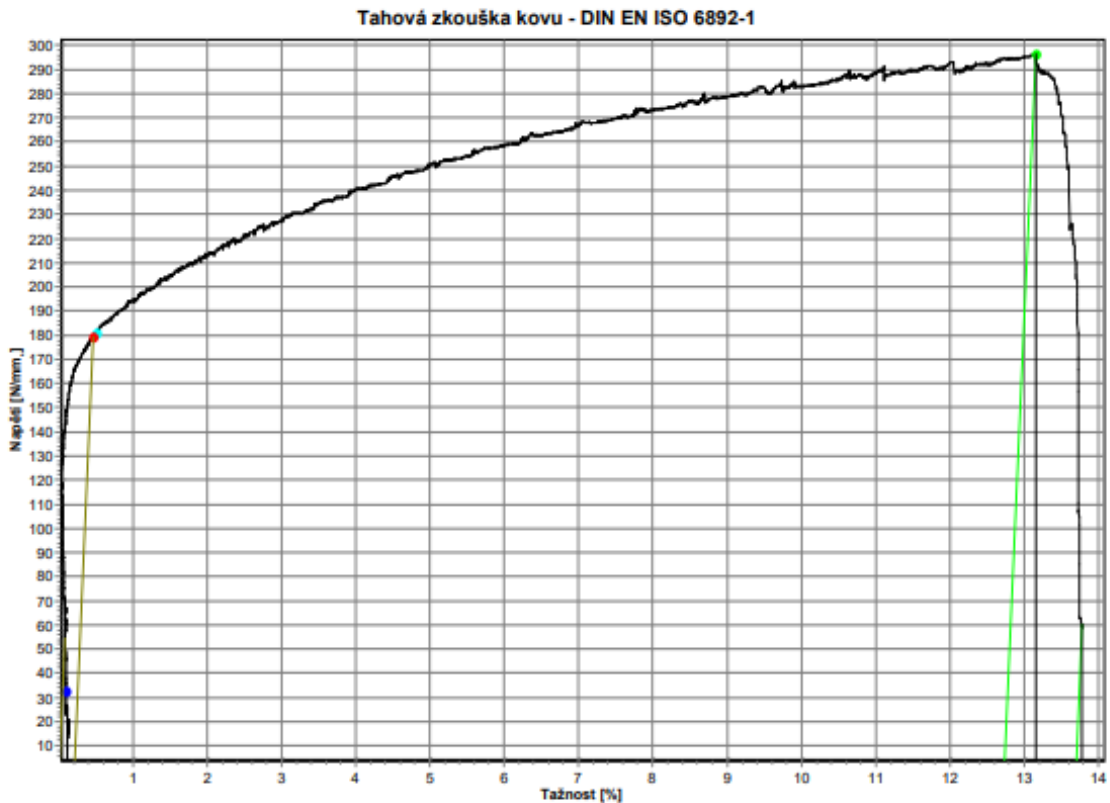
### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm <sup>2</sup>	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm <sup>2</sup>	ReH N/mm <sup>2</sup>	ReL N/mm <sup>2</sup>
2	x	23.03.23	13:40			4814,405	162	5011,00	173	0	0
		Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
2		306	9483,80	21,78	23,37	21,79	23,37				

## Příloha 5 -CMT 2 - Vertikální

### 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 = 39,5 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 80 %



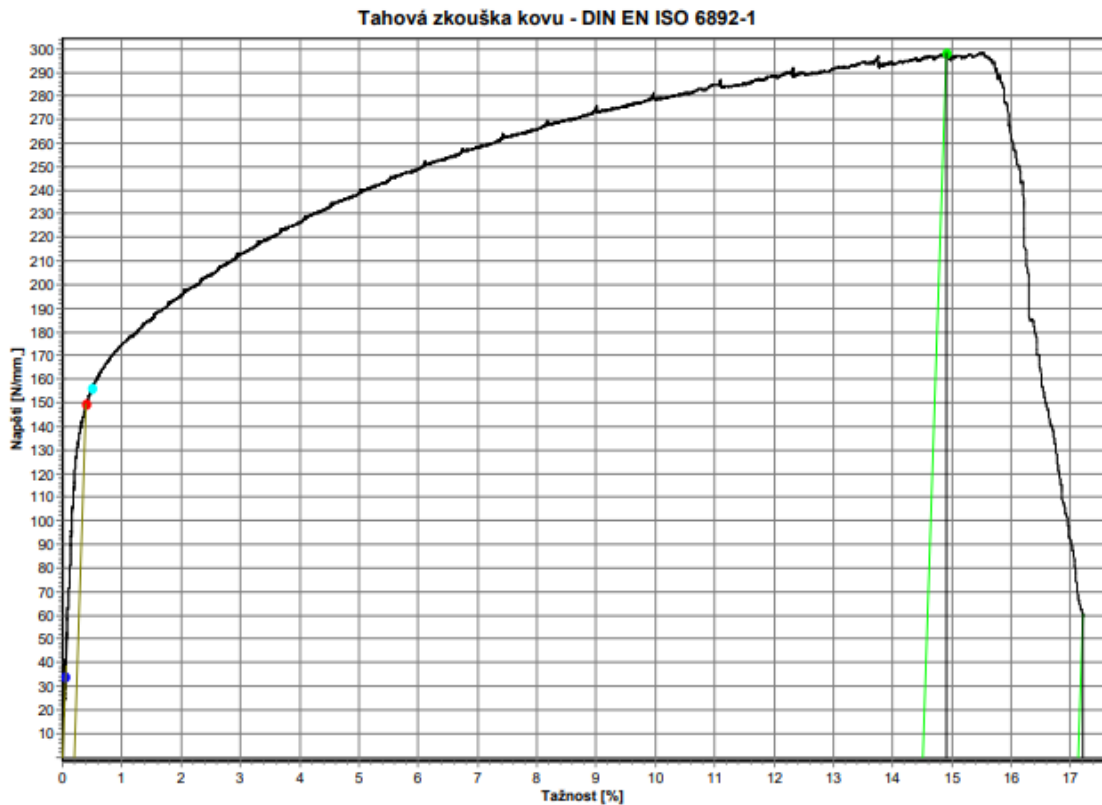
### Tabulka výsledků

OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
3	x	23.03.23	14:29		69,568	179	5532,20	181	0	0
	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
3	297	9159,60	12,73	13,70	13,16	13,78				

Příloha 6 - CMT 3 - Vertikální

### 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 = 39,39 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %

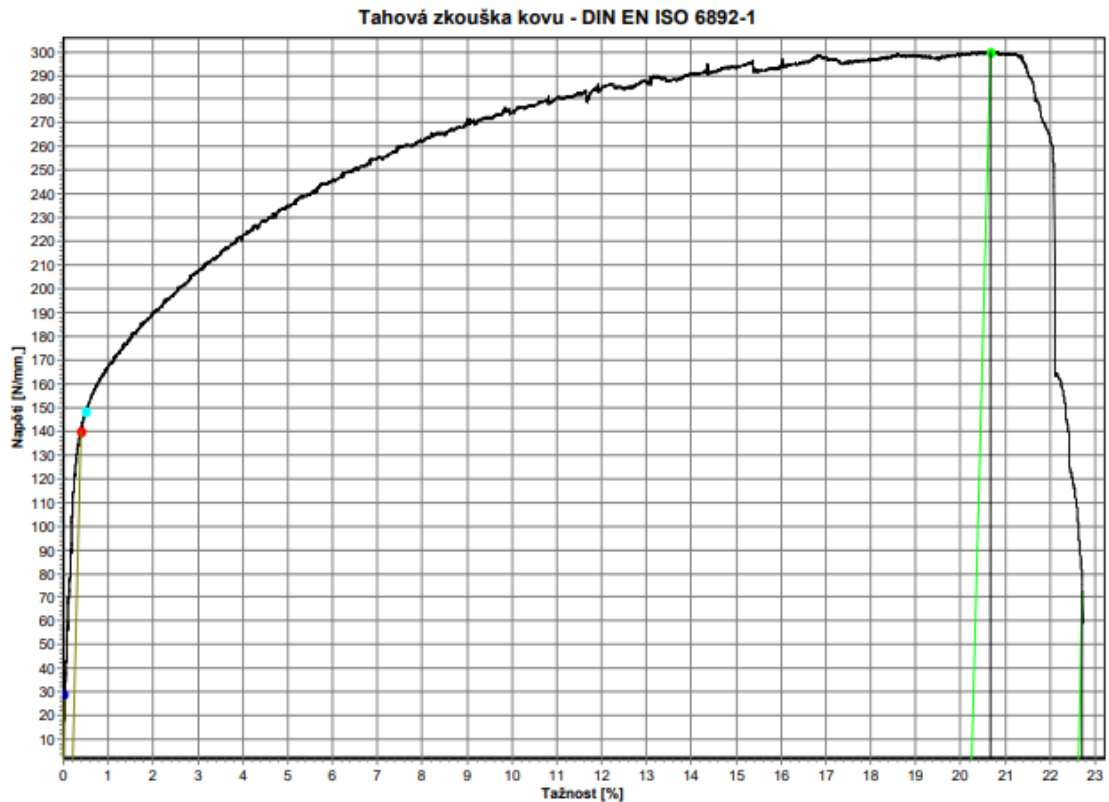


### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
4	x	23.03.23	14:49			72,304	149	4409,00	156	0	0
		Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
4		298	8801,00	14,50	17,13	14,91	17,22				

## 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:  
 Zadání délek: Le = 42,7 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %

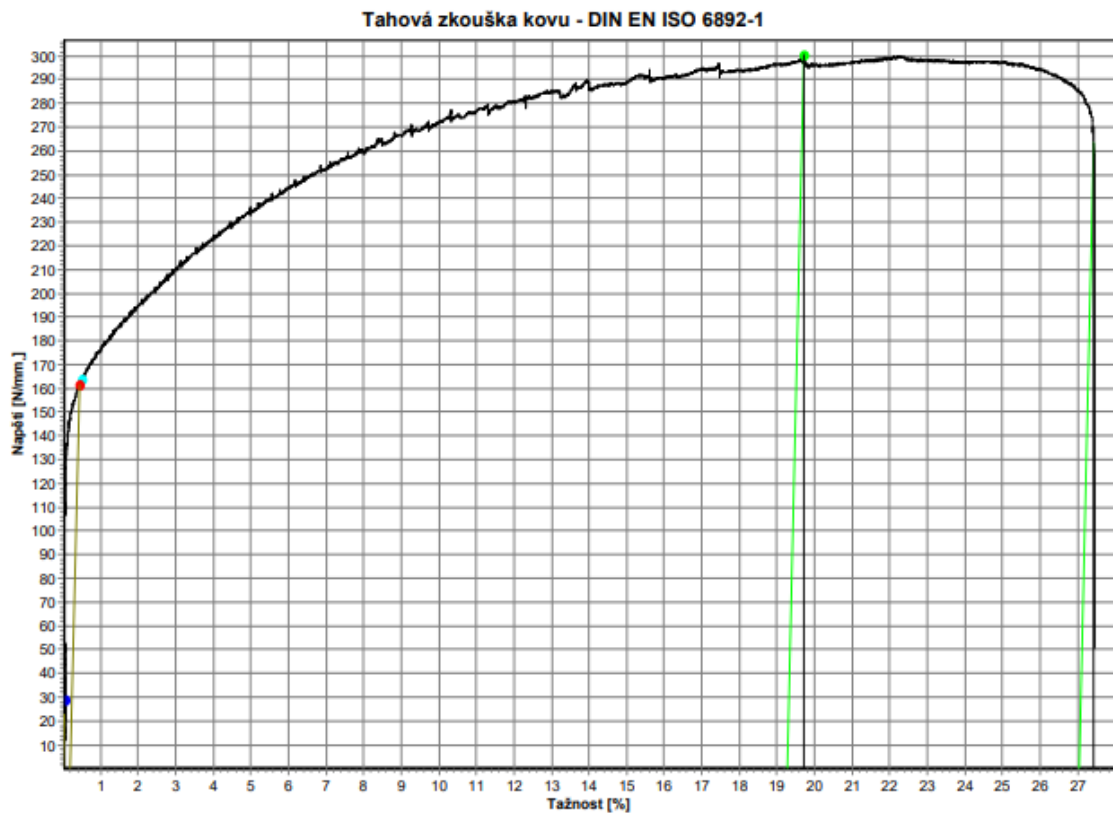


## Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
14	x	27.03.23	12:29			73,412	140	4838,50	148	0	0
		Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
14		300	10353,80	20,25	22,62	20,66	22,72				

### 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 = 40,81 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



### Tabulka výsledků

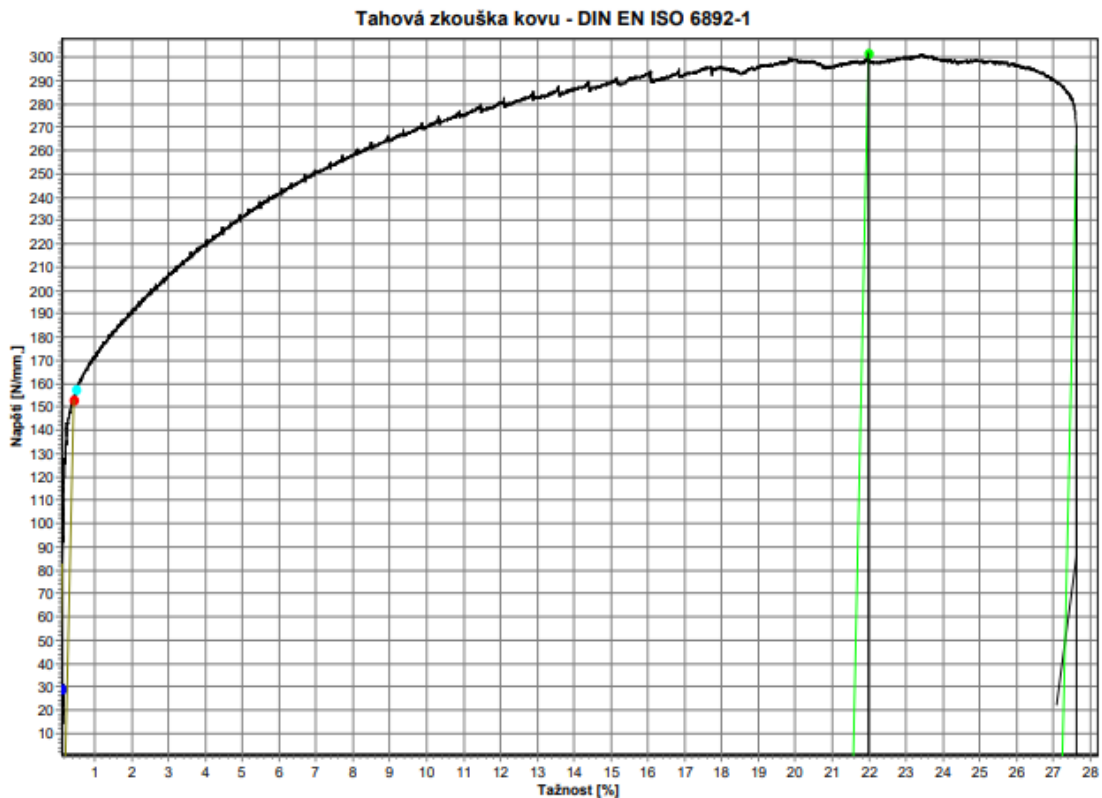
OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
15	x	27.03.23	12:48		68,543	161	5563,90	164	0	0

	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %
15	300	10359,80	19,28	27,05	19,72	27,44

### 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 = 40,8 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



### Tabulka výsledků

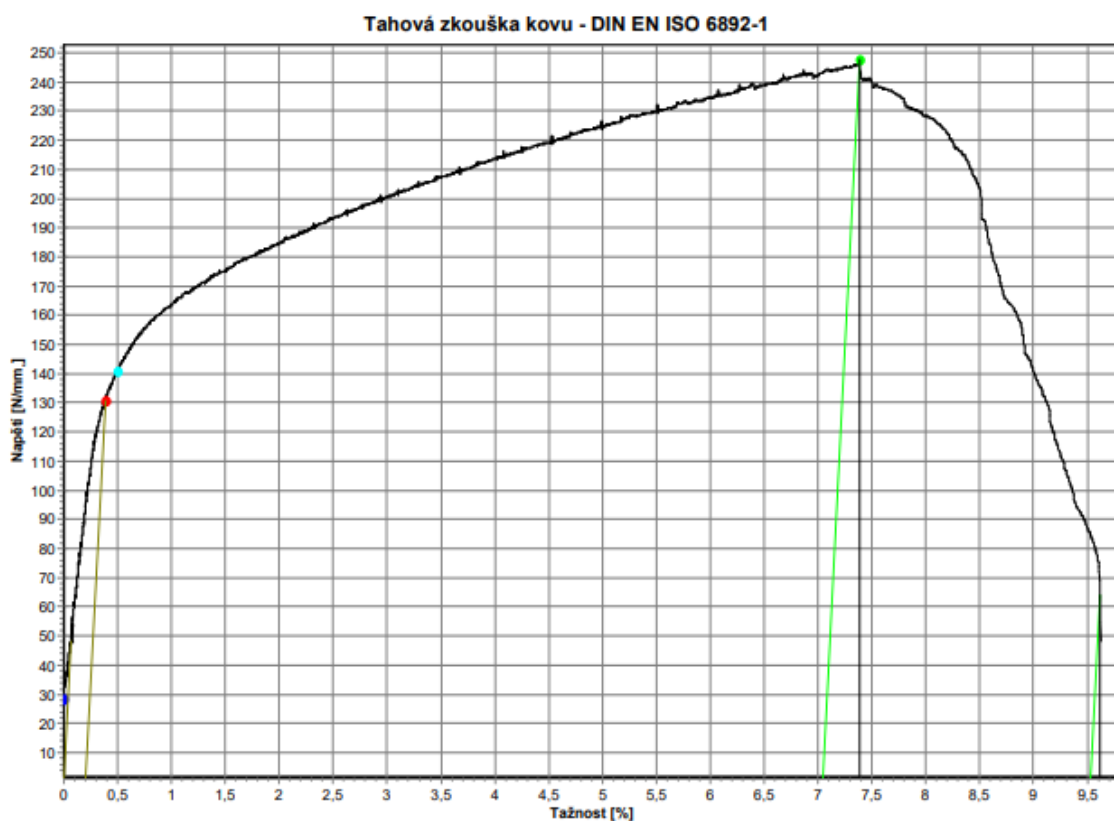
OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
16	x	27.03.23	13:03		71,706	153	5303,50	157	0	0

	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %
16	302	10446,00	21,56	27,25	21,98	27,61

## 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 = 38,86 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



## Tabulka výsledků

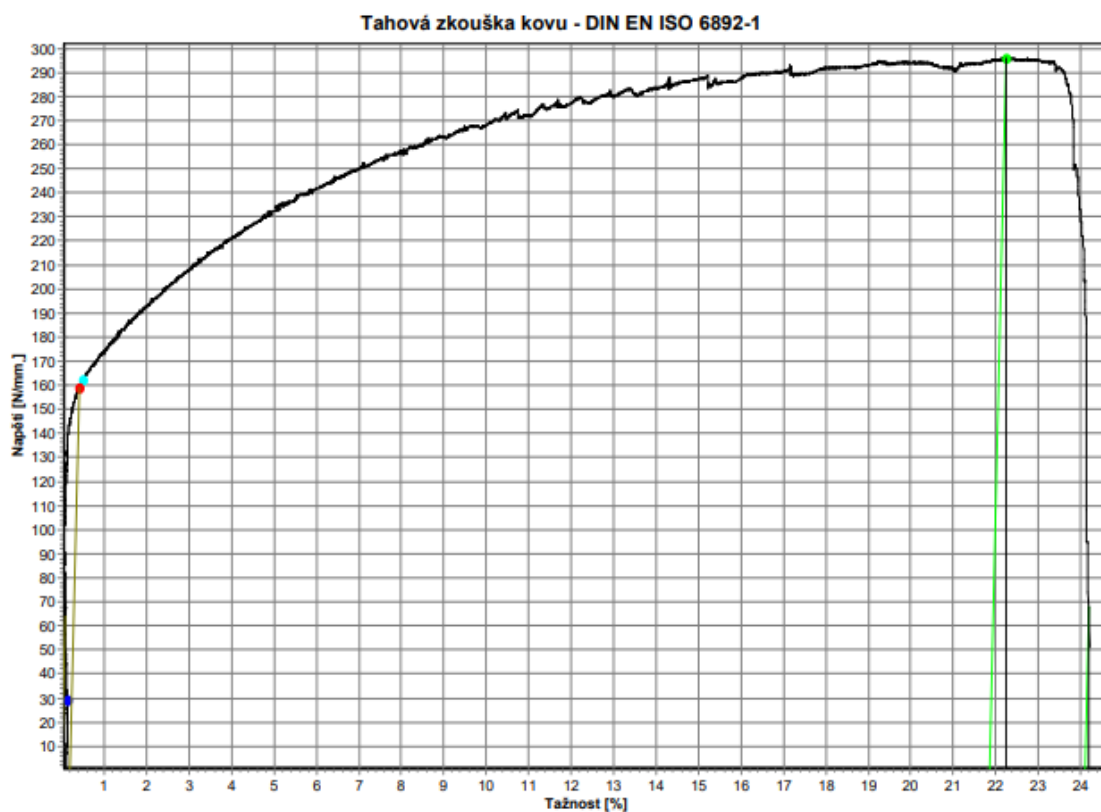
	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
5	x	23.03.23	15:26			71,312	131	4586,90	141	0	0

	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Ag <sub>t</sub> %	At %
5	248	8685,30	7,04	9,53	7,39	9,62



### 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 = 42,47 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %

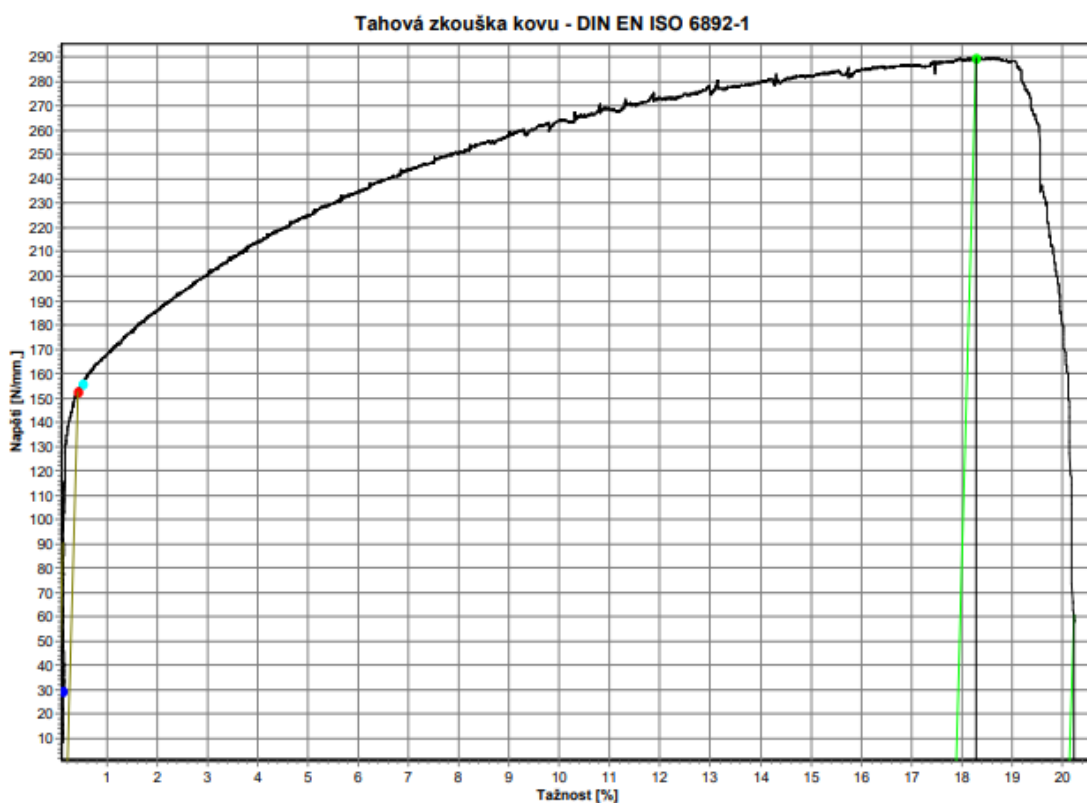


### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
6	x	23.03.23	15:42			76,359	159	5458,50	162	0	0
		Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
6		296	10181,80	21,85	24,10	22,23	24,19				

### 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 = 39,57 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



### Tabulka výsledků

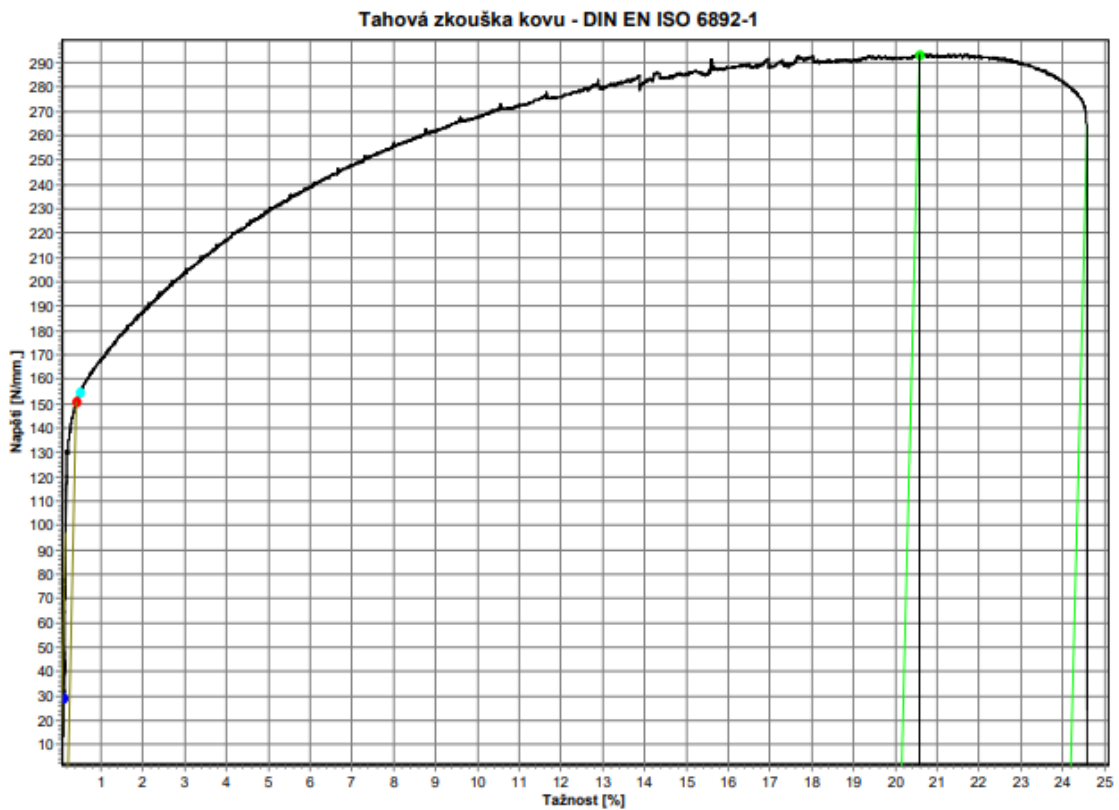
	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
7	x	23.03.23	15:58			74,050	152	5202,00	156	0	0

	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %
7	290	9896,90	17,90	20,15	18,29	20,23

Příloha 13 - CMT+CS 1 – Horizontální

### 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 = 40,7 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm
Zkušební rychlosti:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min
Přepínací body:	F0 = 1000 N
Kriterium ukončení zkoušky:	Síla = 75000 N; dF = 80 %



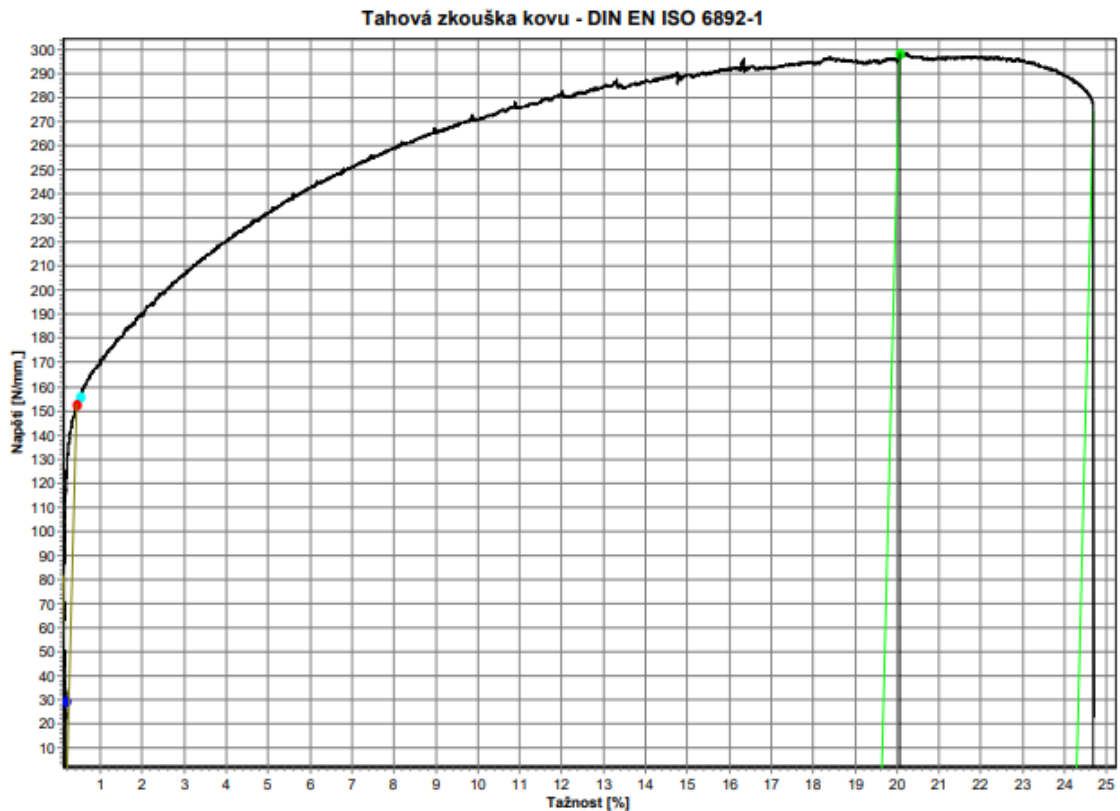
### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
17	x	27.03.23	14:09			69,154	151	5125,60	155	0	0
		Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Ag <sub>t</sub> %	At %				
17		293	9973,90	20,14	24,19	20,56	24,57				

Příloha 14 - CMT+CS 2 – Horizontální

### 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 = 41,59 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



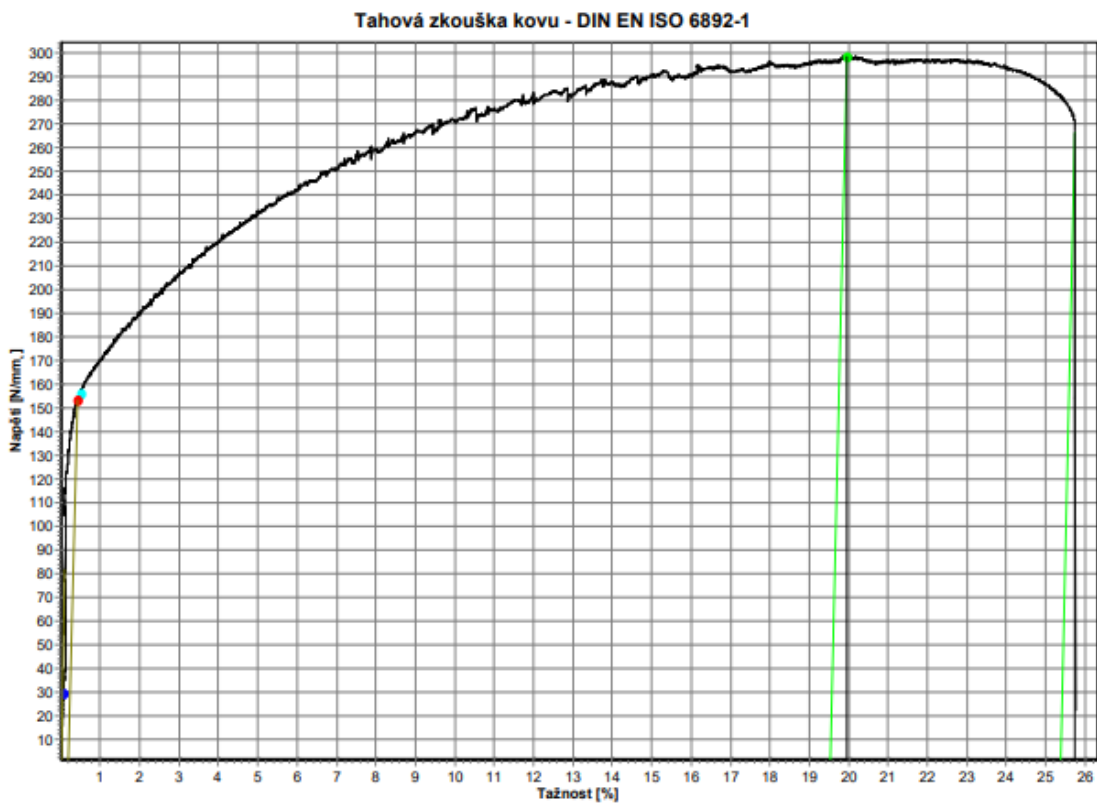
### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm <sup>2</sup>	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm <sup>2</sup>	ReH N/mm <sup>2</sup>	ReL N/mm <sup>2</sup>
18	x	27.03.23	15:04			67,742	153	5190,00	156	0	0
		Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
18		298	10154,60	19,62	24,28	20,06	24,68				

Příloha 15 - CMT+CS 3 – Horizontální

### 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 = 40,25 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



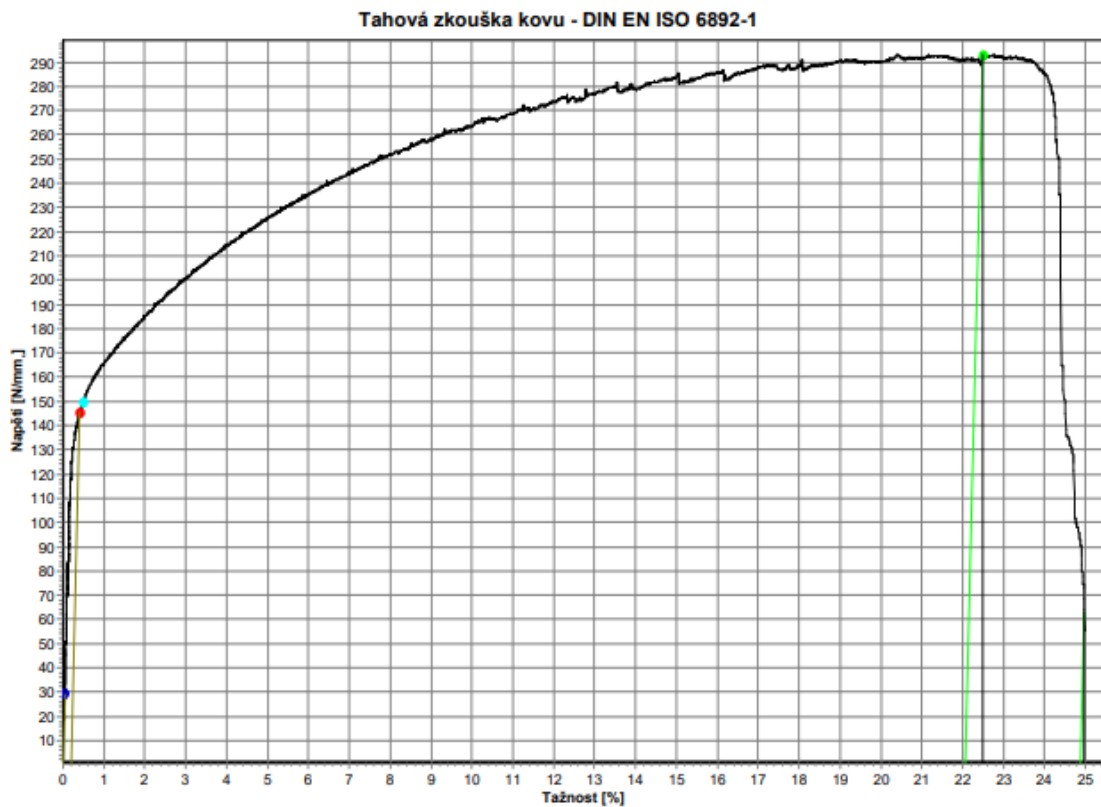
### Tabulka výsledků

OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm <sub>2</sub>	Rp0,2 N/mm <sub>2</sub>	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm <sub>2</sub>	ReH N/mm <sub>2</sub>	ReL N/mm <sub>2</sub>
19	x	27.03.23	15:21		72,730	153	5220,00	156	0	0
		Rm N/mm <sub>2</sub>	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %			
19		299	10176,90	19,53	25,38	19,94	25,74			

Příloha 16 - CMT+CS 1 – Vertikální

### 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 = 40,439 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



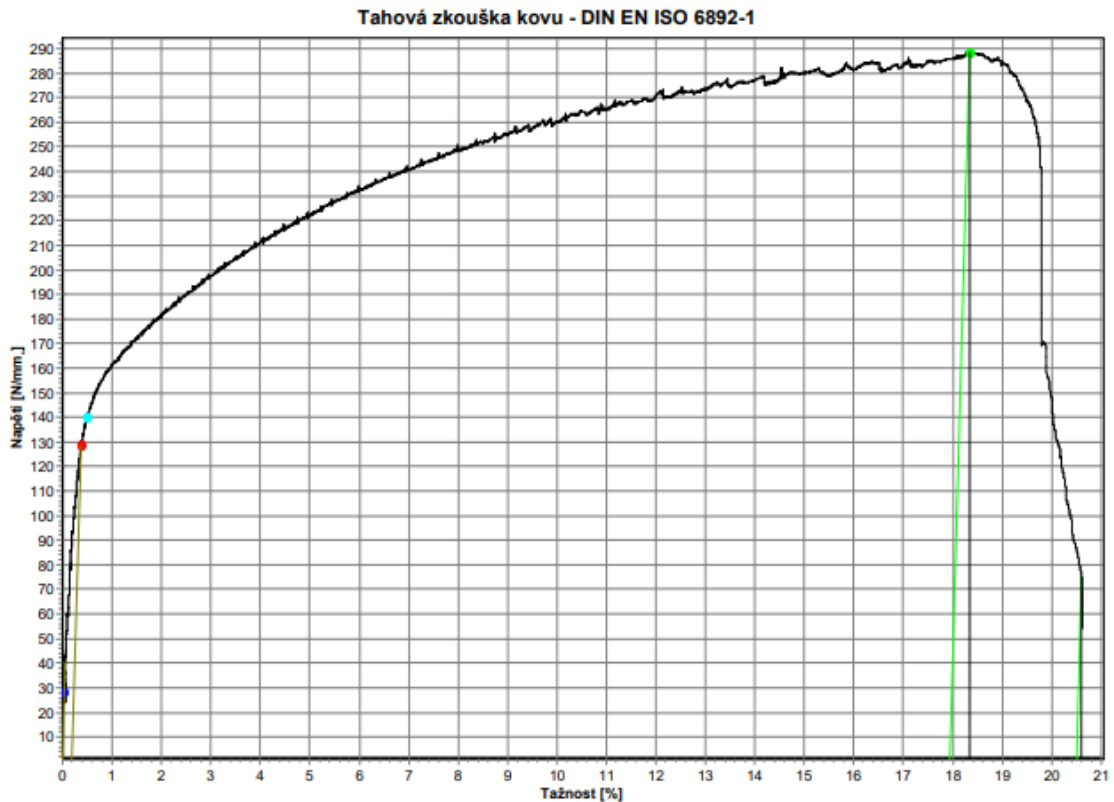
### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
11	x	27.03.23	11:33			67,586	145	4905,10	150	0	0
		Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %				
11		293	9893,70	22,05	24,88	22,48	24,98				

Příloha 17 - CMT+CS 2 – Vertikální

### 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 = 41,96 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %



### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
12	x	27.03.23	11:57			71,235	129	4544,30	140	0	0

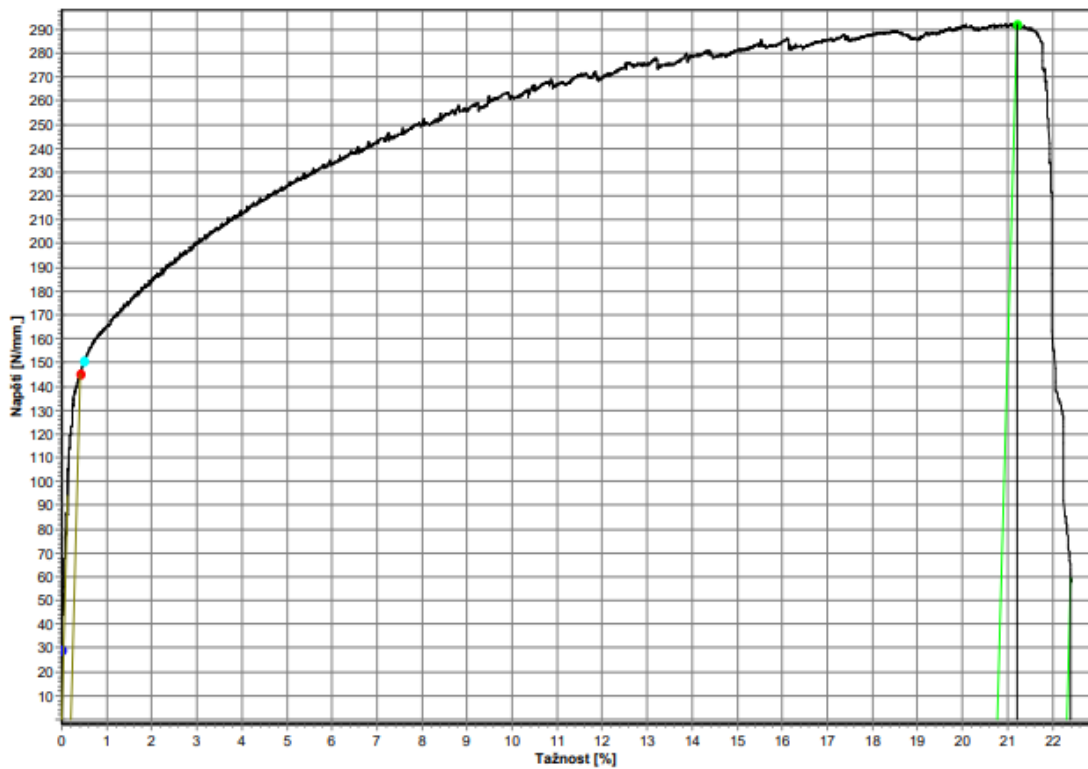
	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %
12	289	10172,60	17,93	20,50	18,34	20,61

Příloha 18 - CMT+CS 3 – Vertikální

### 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 = 43,29 mm; Lc = 65 mm; L0 = 40 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 2 mm/min; V1 = 2 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 75000 N; dF = 80 %

Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1



### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm	Rp0,2 N/mm	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm	ReH N/mm	ReL N/mm
13	x	27.03.23	12:12			69,559	145	4982,60	151	0	0

	Rm N/mm	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %
13	292	10040,50	20,78	22,32	21,20	22,41