

**Univerzita Pardubice**

**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**3D tisk pro odlehčené strukturní díly vozidel**

**Bc. Filip Klejch**

**Diplomová práce**

**2020**

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Klejch**  
Osobní číslo: **D18428**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Téma práce: **3D tisk pro odlehčené strukturní díly vozidel**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Zásady pro vypracování

1. Představení současného stavu a perspektiv 3D tisku kovů se zaměřením na automotive.
2. Přehled metod se zaměřením na danou aplikaci, bližší specifikace metody DMLS.
3. Vysokopevné oceli pro automotive, zaměření na Maraging oceli.
4. Vlastní materiálové analýzy vzorků experimentálně tištěných struktur s různou vnitřní geometrií.
5. Vyhodnocení heterogenního rozvoje plasticity v návaznosti na vnitřní geometrii vzorků lehčených struktur.
6. Souhrnné vyhodnocení výsledků se zaměřením na rozdíly statické vs. dynamické pevnosti daného typu a provedení vysokopevné oceli.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Pluhař J., Puškár A., Koutský J., Macek K., Beneš V.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu, SNTL/Alfa, 1987
2. ARAMIS, Uživatelská příručka – Software, GOM mbH, Braunschweig, 2007
3. Milewski, John O.: Additive Manufacturing of Metals – From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry, Springer International Publishing, 2017, ISBN 978-3-319-58205-4

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**  
Výukové a výzkumné centrum v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **18. února 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**

L.S.

---

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

---

**Ing. Jakub Vágner, Ph.D.**  
vedoucí katedry

*Prohlašuji:*

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

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

V Pardubicích dne 21. 4. 2020

*Filip Klejch*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych chtěl poděkovat všem, kteří mi poskytli pomoc a podporu při vypracování této diplomové práce. Mé velké díky patří především paní prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a poskytnuté konzultace. Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. Sunilkumar M R a Ing. Jakubu Vágnerovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace k systému ARAMIS a pomoc při práci v laboratořích. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat mé rodině a přátelům za podporu při studiu.

## **ANOTACE**

*Tato diplomová práce je věnována problematice 3D tisku kovů a vyhodnocování tahových zkoušek obdržených 3D tisknutých vzorků. V teoretické části je blíže představena problematika 3D tisku kovů se zaměřením zejména na oblast automotive. Obecně jsou představeny používané materiály a vybrané technologie, z nichž některé byly využity při výrobě testovacích vzorků do praktické části práce. Představeny jsou také vysokopevné oceli používané v automobilovém průmyslu. V praktické části práce jsou představeny metalografické a fraktografické analýzy vybraných obdržených vzorků. Je představena navržená metodika hodnocení heterogenního rozvoje plasticity s využitím systému ARAMIS a souhrnné vyhodnocení provedených tahových zkoušek.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*3D tisk kovů, aditivní výroba, maraging ocel MSI, DMLS, ARAMIS GOM 4M, tahová zkouška*

## **TITLE**

*3D printing for lightweight structural parts of vehicles*

## **ANNOTATION**

*This diploma thesis deals with 3D printing of metals and evaluation of tensile tests of received 3D printed samples. In the theoretical part 3D printing of metals focused mainly on automotive industry is described. In general, available materials and selected technologies are briefly presented, some of them were used in the production of test samples for the practical part of the work. High strength steels used in the automotive industry are also described. In the practical part of the thesis, metallographic and fractographic analyzes of selected samples are presented. The proposed methodology of evaluation of heterogeneous plasticity development using the ARAMIS optical system, and summary evaluation of performed tensile tests is also presented.*

## **KEYWORDS**

*3D printing of metal, additive manufacturing, maraging steel MSI, DMLS, ARAMIS GOM 4M, tensile test*

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek a grafů</b> .....	<b>10</b>
<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>11</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Představení problematiky 3D tisku</b> .....	<b>13</b>
1.1 Aditivní výroba (AM).....	13
1.1.1 Používané materiály.....	14
1.1.2 Přednosti a nevýhody.....	15
<b>2 3D tisk kovů</b> .....	<b>17</b>
2.1 Oblasti použití.....	17
2.1.1 Letecký průmysl .....	17
2.1.2 Zdravotnictví.....	18
2.1.3 Zakázková výroba, opravy a konformní chlazení.....	19
2.1.4 Automotive .....	20
2.2 Topologická optimalizace součástí a vnitřní struktury.....	23
2.3 Dostupné materiály .....	25
2.4 Metody výroby kovového prášku .....	27
2.4.1 Atomizace vodou .....	28
2.4.2 Atomizace plynem a plazmou.....	28
2.4.3 Procesy Hydride-Dehydride a TiRO .....	29
2.5 Metody 3D tisku kovů .....	30
2.5.1 Direct Energy Deposition (DED) .....	30
2.5.2 Powder Bed Fusion (PBF) .....	31
2.5.3 DMLS .....	32
2.5.4 Postup od modelu k součásti.....	33
<b>3 Vysokopevné oceli pro automotive</b> .....	<b>35</b>
3.1 AHSS oceli .....	35
3.2 Maraging oceli .....	37

3.2.1	Předmětná ocel.....	38
<b>4</b>	<b>Obdržení materiál, optický systém ARAMIS .....</b>	<b>39</b>
4.1	Vzorky pro hodnocení .....	39
4.1.1	Plné vzorky pro hodnocení dynamického zpevnění .....	39
4.1.2	Vzorky s pórovitou vnitřní strukturou .....	40
4.1.3	Použité vnitřní struktury .....	42
4.2	Použití optického systému ARAMIS.....	42
<b>5</b>	<b>Materiálové analýzy.....</b>	<b>45</b>
5.1	Zkoušky dynamického zpevnění .....	45
5.2	Válcové vzorky s různou vnitřní geometrií .....	47
<b>6</b>	<b>Metodika pro hodnocení nerovnoměrné deformace, resp. heterogenního rozvoje plasticity.....</b>	<b>52</b>
6.1	Vzorky s BCC strukturou (BCC 90°) .....	52
6.2	Vzorky s gyroidní strukturou.....	56
6.3	Shrnutí a zhodnocení .....	60
<b>7</b>	<b>Souhrnné vyhodnocení výsledků se zaměřením na rozdíly statické vs. dynamické pevnosti daného typu a provedení oceli .....</b>	<b>61</b>
7.1	Statická pevnost .....	61
7.2	Dynamická pevnost.....	66
7.3	Shrnutí výsledků .....	67
	<b>Závěr .....</b>	<b>69</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>71</b>
	<b>Přílohy.....</b>	<b>76</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> – Příklady využití různých materiálů v aditivní výrobě [1].....	14
<i>Obr. 2</i> – Mosazný prsten vyrobený s využitím 3D tisku [4].....	16
<i>Obr. 3</i> – Oblasti aplikace AM kovů [9] .....	17
<i>Obr. 4</i> – Příklady využití AM kovů ve zdravotnictví [9].....	18
<i>Obr. 5</i> – Rám horského kola ze slitiny titanu vyrobený AM [9] .....	19
<i>Obr. 6</i> – Forma vyrobená metodou DMLS [9] .....	20
<i>Obr. 7</i> – AM komponenty Bugatti [15] .....	21
<i>Obr. 8</i> – Příklady AM automotive komponent 1 [14].....	22
<i>Obr. 9</i> – Příklady AM automotive komponent 2; zdroje zleva [12, 13, 11] .....	22
<i>Obr. 10</i> – Ukázka topologické optimalizace [18] .....	23
<i>Obr. 11</i> – Příklady možných vnitřních struktur [18].....	24
<i>Obr. 12</i> – Metody výroby kovového prášku [8] .....	29
<i>Obr. 13</i> – Princip metody DMLS [2] .....	32
<i>Obr. 14</i> – Ukázky z procesu výroby (DMLS) [21].....	33
<i>Obr. 15</i> – Geometrie vzorků, první sada [27] .....	39
<i>Obr. 16</i> – Ploché vzorky, druhá sada .....	40
<i>Obr. 17</i> – Geometrie válcových vzorků [33] .....	41
<i>Obr. 18</i> – Vnitřní uspořádání BCC (90°) [33] .....	41
<i>Obr. 19</i> – Vnitřní uspořádání gyroidu a reálný vzorek před zkouškou [33].....	41
<i>Obr. 20</i> – Vnitřní struktury válcových vzorků [33] .....	42
<i>Obr. 21</i> – Sestava (uspořádání) statických tahových zkoušek.....	44
<i>Obr. 22</i> – Dosah dynamického zpevnění (zatížení 10 m/s) .....	46
<i>Obr. 23</i> – Příčný (vlevo), podélný výbrus vzorku první sady + nitrid.....	46
<i>Obr. 24</i> – Metalografické výbrusy válcových vzorků .....	47
<i>Obr. 25</i> – Podélné výbrusy: vliv vnitřní struktury na deformaci .....	48
<i>Obr. 26</i> – Mikrostruktura podélného výbrusu (gyroid) .....	49
<i>Obr. 27</i> – Mikrostruktura příčného výbrusu (BCC) .....	49
<i>Obr. 28</i> – Fraktografie: Spodní pohled na vnitřní strukturu (gyroid) .....	50
<i>Obr. 29</i> – Fraktografie: Pohled shora na vnitřní strukturu, lomová plocha (gyroid).....	51
<i>Obr. 30</i> – Výpočetní maska s počátečními body (BCC 90°) .....	52
<i>Obr. 31</i> – Technické prodloužení vzorku v % (stage 230, osa x).....	53
<i>Obr. 32</i> – Definovaná linie bodů (stage 230, osa x) .....	53

<b>Obr. 33</b> – Technické prodloužení vzorku v % (stage 460, osa x).....	54
<b>Obr. 34</b> – Aramis, přetržený vzorek 15.....	56
<b>Obr. 35</b> – Přetržený vzorek 10 .....	56
<b>Obr. 36</b> – Technické prodloužení vzorku v % (stage 300, osa x).....	57
<b>Obr. 37</b> – Definovaná linie bodů (stage 300, osa x) .....	57
<b>Obr. 38</b> – Technické prodloužení vzorku v % (stage 443, osa x).....	58
<b>Obr. 39</b> – Lomová plocha gyroidního vzorku a schéma skutečného tahového diagramu [32] .....	62

## SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

<b>Tab. 1</b> – Nejpoužívanější kovové materiály v AM [7] .....	27
<b>Tab. 2</b> – Obsah legur (hm.%) a mez kluzu vybraných pevnostních tříd [25].....	37
<b>Tab. 3</b> – Chemické složení testované oceli v porovnání (hm.%) [27].....	38
<b>Tab. 4</b> – Souhrnná tabulka výsledků válcových vzorků; Rm, Rp0,2.....	61
<b>Tab. 5</b> – Souhrnná tabulka výsledků plochých vzorků .....	66
<b>Graf 1</b> – Dynamické zpevnění první sada [27] .....	45
<b>Graf 2</b> – Koeficient zpětné relaxace obou řezů .....	45
<b>Graf 3</b> – Multi-Section diagram pro stage 230 .....	54
<b>Graf 4</b> – Multi-Stage-Section diagram (stage 230-460) .....	54
<b>Graf 5</b> – Multi-Section diagram pro stage 460, rozdělen na oblasti.....	55
<b>Graf 6</b> – Tahové diagramy, oblasti + INOVA, kumulace prodloužení .....	55
<b>Graf 7</b> – Multi-Section diagram pro stage 300 .....	57
<b>Graf 8</b> – Multi-Stage-Section diagram (stage 300-454) .....	58
<b>Graf 9</b> – Multi-Section diagram pro stage 454, rozdělen na oblasti .....	59
<b>Graf 10</b> – Tahové diagramy, oblasti + INOVA, kumulace prodloužení .....	59
<b>Graf 11-12</b> – Porovnání vlivu délky obálky, bez + gyroid.....	63
<b>Graf 13-14</b> – Porovnání vlivu délky obálky, BCC 90° + BCC 45° .....	64
<b>Graf 15-16</b> – Porovnání vlivu typu vnitřní struktury.....	64
<b>Graf 17-18</b> – Porovnání vlivu orientace tisku .....	65
<b>Graf 19</b> – Porovnání statika vs. dynamika.....	67

## SEZNAM ZKRATEK

**AM** (*Additive Manufacturing*): Aditivní výroba

**3DP** (*3D Printing*): 3D tisk

**CAD** (*Computer-Aided-Design*): Počítačem podporovaný design

**RM** (*Rapid Manufacturing*): Technika výroby objektu na základě 3D modelu

**RP** (*Rapid Prototyping*): Výroba prototypů pomocí 3D tisku

**ALM** (*Additive Layered Manufacturing*): Výroba vrstvením materiálu (např. spékání prášku)

**AF** (*Additive Fabrication*): Jeden z dřívějších názvů pro aditivní výrobu

**RT** (*Rapid Tooling*): Kombinace RP s konvenčními metodami obrábění

**DED** (*Direct Energy Deposition*): Aditivní technologie – tavení přidávaného materiálu zdrojem tepla – laser/oblouk

**PBF** (*Powder Bed Fusion*): Aditivní technologie – spékání práškového lože

**VIM** (*Vacuum Induction Melting*): Tavení kovu ve vakuové indukční peci

**EIGA** (*Induction Melting Gas Atomisation*): Metoda tavení kovu indukční cívkou

**MKP**: Metoda konečných prvků

**DMLS** (*Direct Metal Laser Sintering*): Technologie spékání práškového lože od firmy EOS

**LENS** (*Laser Engineered Net Shaping*): Metoda DED, materiálem je kovový prášek

**DMD** (*Direct Metal Deposition*): Metoda DED, materiálem je kovový prášek

**EBF** (*Electron Beam Freeform Fabrication*): Metoda DED, materiálem je kovový drát

**RPD** (*Rapid Plasma Deposition*): Metoda DED, materiálem je kovový drát

**EBM** (*Electron Beam Melting*): Metoda PBF, zdroj energie je elektronový paprsek

**SLS** (*Selective Laser Sintering*): Metoda PBF, spékání práškového lože laserem

**SLM** (*Selective Laser Melting*): Metoda PBF, tavení práškového lože laserem

**AHSS** (*Advanced High-Strength Steels*): Pokročilé vysokopevné oceli

**TRIP oceli** (*Transformation-Induced Plasticity*): Typ AHSS oceli s TRIP efektem

**TWIP oceli** (*Twinning-Induced Plasticity*): Typ AHSS oceli s TWIP efektem

**EOS** (*Electro Optical Systems*): Německá společnost

**SEM** (*Scanning Electron Microscope*): Rastrovací elektronový mikroskop

**FEM** (*Finite Element Method*): Metoda konečných prvků

**BCC** (*Body Centered Cubic*): Prostorově středěná krychlová struktura (buňka, mřížka)

# ÚVOD

V oblasti automotive je většina současného vývoje a výzkumu věnována úspoře hmotnosti vozidel a elektromobilitě. Tento trend automaticky vyplynul ze zpřísnující se ochrany životního prostředí, a to zejména značného důrazu na nižší produkci emisí spalovacích motorů. Pozornost je také věnována zavádění nových elektronických systémů a komponent pro výsledný lepší jízdní komfort a ochranu posádky vozu. Nutno poznamenat, že tyto komponenty v řadě případů zvyšují hmotnost daného celku v porovnání s jeho předchozím konstrukčním řešením. Příkladem mohou být světlometry nebo nárazníky moderních vozidel, kde hmotnost nového konstrukčního celku narůstá až o několik kilogramů. Úspora hmotnosti vozidel je tedy důležitá nejenom z hlediska snižování produkce emisí nebo zvyšování dojezdu elektromobilů, ale i z hlediska umožnění efektivního vývoje a využití nových komponent a technologií.

Jednou z možností úspory hmotnosti vozidel je využití technologií 3D tisku k výrobě speciálních odlehčených komponent. Tohoto odlehčení lze dosáhnout vhodným úběrem materiálu s využitím tzv. topologické optimalizace, nebo zavedením vnitřních struktur. Největšího odlehčení lze dosáhnout na kovových materiálech vozidel, proto je vývoj a výzkum kolem technologií 3D tisku kovů velmi intenzivní.

V teoretické části práce je popsána problematika 3D tisku (resp. aditivních technologií), stručně jsou také představeny vysokopevné oceli používané v automotive. Blíže je představen 3D tisk kovů – je zde nastíněn současný stav a jeho perspektivy. Představeny jsou aktuální oblasti použití, dostupné materiály, vybrané metody výroby kovového prášku, vybrané technologie 3D tisku, a stručně je popsána topologická optimalizace a vnitřní struktury.

Praktická část práce je věnována analýzám 3D tisknutých vzorků z maraging oceli. Ploché a válcové vzorky (část s vnitřními strukturami) byly podrobeny tahovým zkouškám a následně zkoumány. V práci jsou představeny metalografické a fraktografické analýzy, vyhodnocení heterogenního rozvoje plasticity v návaznosti na vnitřní struktury vzorků (navržena metodika hodnocení v systému ARAMIS), a souhrnné vyhodnocení výsledků se zaměřením na rozdíly statické a dynamické pevnosti daných vzorků. Tahové křivky jsou uvedeny v přílohách práce.

# 1 Představení problematiky 3D tisku

## 1.1 Aditivní výroba (AM)

Technologie 3D tisku, v průmyslu známá též pod pojmem aditivní výroba (additive manufacturing – AM<sup>1</sup>), je automatizovaným procesem tvorby 3D objektů spojováním materiálu, který je nanášen po vrstvách. Tato technologie přímo pracuje s grafickými modely, které jsou nejčastěji modelovány v CAD softwarech, což umožňuje návrhářům (konstruktérům) nová, výhodnější konstrukční řešení. [2]

Historicky můžeme počátky aditivní výroby datovat do 60. a 70. let minulého století, kdy byl kladen velký důraz na výzkum v této oblasti. To vedlo k postupnému rozvoji fotopolymerace pro polymery, spékání práškového lože pro keramiku, kovy a polymery, a laminování tenkých desek pro keramiku, kovy, papír, polymery a dřevo. První aditivní komercializovanou výrobní technikou byla tzv. stereolitografie, která přišla koncem 80. let. Jedná se o typ fotopolymerace, kdy se pomocí laserového paprsku vytvrzuje kapalný polymer, který je citlivý na ultrafialové záření. V dnešní době je aditivní výroba stále považována za relativně novou technologii, která je předmětem poměrně intenzivního zkoumání a rozvoje. [1]

Rapidní rozvoj aditivní výroby vedl ke vzniku mnoha různých názvů pro velmi podobné procesy v dané oblasti, např.: 3D tisk (3D printing – 3DP); rapid manufacturing (RM); rapid prototyping (RP); additive layered manufacturing (ALM); additive fabrication (AF); rapid tooling (RT); a tak dále. Sjednocení terminologie v oblasti aditivní výroby bylo provedeno až v normě ISO/ASTM 52900 z roku 2015, kde byl všeobecný pojem aditivní výroby (AM) přijat pro veškeré procesy vyrábějící objekty postupným přidáváním materiálu. Norma dále stanovila sedm klíčových skupin aditivních technologií: vpravování pojiva (binder jetting); tavení přidávaného materiálu zdrojem tepla – laser/oblouk (directed energy deposition); vytlačování materiálu (material extrusion); vpravování tekutého materiálu (material jetting); spékání práškového lože (powder bed fusion); laminování tenkých desek (sheet lamination) a fotopolymerace tekuté pryskyřice (vat photopolymerisation). Základ těchto technologií je založen na stejném pracovním postupu. Nejdříve je vytvořen 3D model v CAD softwaru, který je následně “rozřezán“ na série stavebních vrstev. Tyto informace jsou poté přeneseny do pracovního stroje, je nastavena pozice tiskové hlavy, a součást je tvořena vrstvu po vrstvě. [1]

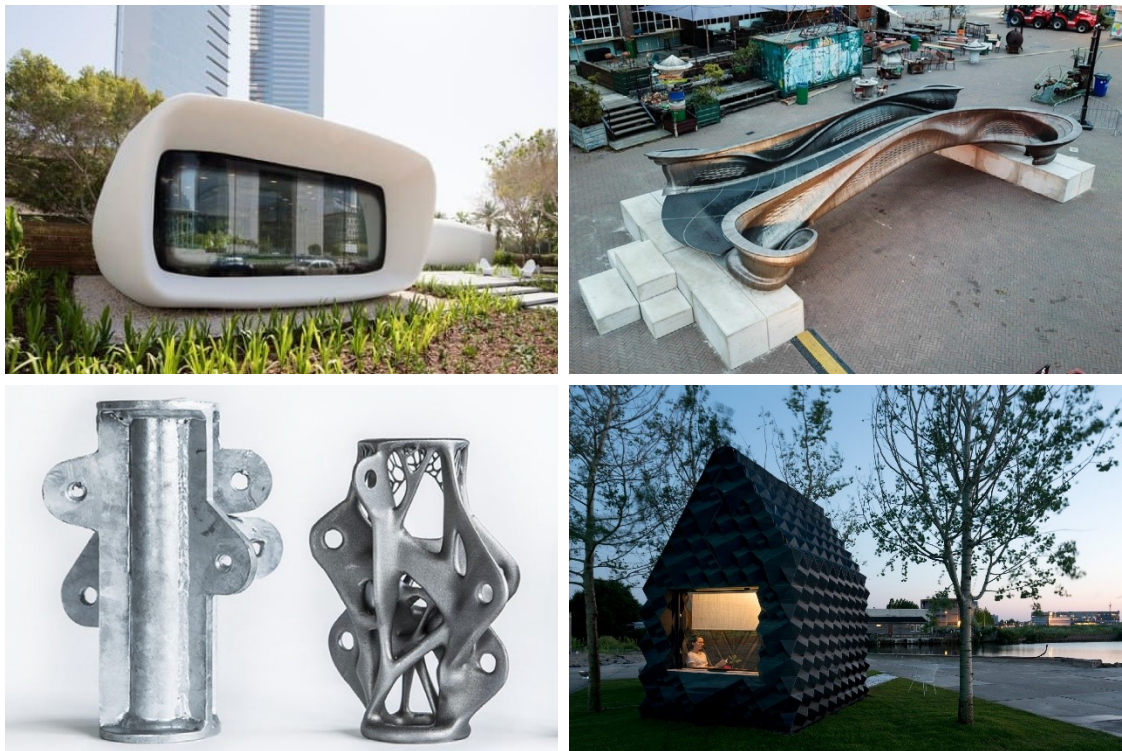
---

<sup>1</sup> Všechny zkratky jsou uvedeny a přeloženy v seznamu zkratk

### 1.1.1 Používané materiály

Pro jakoukoliv výrobu, tak i pro aditivní výrobu, musí být surovina formována do stavu kompatibilního s výrobním procesem (např. prášek, drát, kapalina, tenká deska). V průběhu výrobního procesu AM přichází surovina do kontaktu se zdrojem energie, který materiál taví nebo naopak zpevňuje. Zdrojem energie může být např. laserový/elektronový paprsek, oblouk, nebo tepelný zdroj. Výsledný materiál musí po zpracování vykazovat přijatelné provozní vlastnosti pro danou aplikaci. V aplikacích, kde je kladen velký důraz na kvalitu součásti, dochází ve fázi tzv. postprocessingu k účelnému zpracování součásti. Tato zpracování vedou ke zlepšení mikrostruktury, snížení pórovitosti, zajištění kvality povrchu a dodržení rozměrových tolerancí. [2, 3]

V době uvedení aditivní výroby na trh, byly aplikace zaměřeny především na materiály jako polymery, vosk a plasty. Postupným vývojem technologií se po boku plastů a pryskyřic objevily i další materiály – kompozity, keramika a zejména kovy. Intenzivní výzkum v oblasti kovů pro AM je neustále v procesu a vybrané dostupné kovové materiály jsou představeny v kapitole 2.3. V dnešní době je tedy v procesech aditivní výroby používána široká škála materiálů, do které patří: keramika, chemikálie, kompozity, beton, papír, plasty, pískovec, silikony, vosk, dřevo, potraviny (např. čokoláda) a kovy (hliník, chrom, kobalt, měď, zlato, stříbro, slitiny železa). [1, 3]



**Obr. 1** – Příklady využití různých materiálů v aditivní výrobě [1]

Na *obr. 1* je znázorněno několik případů konstrukčního využití různých materiálů v aditivní výrobě. Na obrázku vlevo nahoře je zobrazen kancelářský dům Winsun v Dubaji, zdi byly vytvořeny pomocí aditivní směsi cementu, písku a výztužného skelného vlákna. V pravé části je znázorněn ocelový most, který byl vytištěn technologií DED (direct energy deposition) za použití ocelového drátu a oblouku jako zdroje tepla. Šířka mostu je 2,5 metru a rozpětí 10 metru. Na obrázku vpravo dole je zobrazen vývojový model domu z Amsterdamu. Dům byl sestaven z vytištěných polypropylenových bloků a každý blok vážil kolem 180 kg. Na posledním obrázku je zobrazena dvojice kovových držáků s úchyty. Jeden držák byl vyroben konvenčním způsobem s přivařením úchytů na nosnou trubku. Na druhém držáku byla provedena tzv. topologická optimalizace a byl vytvořen aditivní technologií využívající laserového spékání práškového lože. Topologická optimalizace je blíže rozebrána v kapitole 2.2. [1]

### 1.1.2 Přednosti a nevýhody

V průběhu posledních 10 let došlo k nejintenzivnějšímu rozvoji a zviditelnění aditivní výroby. Ukázalo se, že na rozdíl od tradičních výrobních metod pro konstrukční prvky, konstrukce samotné, nebo třeba i šperky, přináší AM řadu příležitostí optimalizace výroby. Aditivní výroba se osvědčila pro malosériovou, kusovou, ale i hromadnou výrobu výrobků, prototypů nebo třeba zkušebních přípravků na míru. Lze vytvářet například neprizmatické průřezy, vnitřní výztuhy a otvory, tvarově složité díly, lehčené pórovité konstrukce, nebo provádět účinné opravy dílů. Dochází k lepšímu využití materiálu součástí (zvýšení strukturální účinnosti), ke snížení spotřeby a plýtvání materiálu, snížení počtu výrobních kroků, snížení spotřeby energie a zkrácení doby uvedení výrobku na trh. Z pohledu konstruktéra či návrháře je zde větší svoboda designu a konstrukčního řešení, dochází k zefektivnění procesu návrhu a možnosti dosažení větší přesnosti a bezpečnosti výrobků. Aditivní výroba má samozřejmě i svoje limity, proces výroby je poměrně pomalý, ekonomicky náročný, procesně náročný (nastavení optimálních procesních parametrů) a ve většině případů je omezen maximální velikostí vyráběného objektu. Za aktuálního stavu poznání jsou obecné předpoklady pro využití aditivní výroby takové, že AM spíše doplní konvenční způsoby výroby. Je zřejmé, že AM se bude využívat pro tzv. hybridní konstrukční řešení, tj. vyztužené prvky, malé složité prvky, odlehčené díly, kvalitní opravy a ekonomicky výhodné aplikace. V řadě dnešních výrobních procesů dochází ke spolupráci AM s konvenčními výrobními metodami, např. obráběním.

Výzkum v oblasti AM je velmi intenzivní, do budoucna je tedy možné, že AM řadu konvenčních metod výroby zcela nahradí. [1, 2, 3]

Dále jsou vyzkoušeny hlavní výhody a nevýhody aditivní výroby:

- **Výhody:** Volný design – flexibilita; provázanost s grafickými programy (CAD); rychlost výroby; tvarově složité díly; malé díly; lehčené – pórovité konstrukce (topologická optimalizace); funkční design; přímá produkce; vyztužování dílů; lepší využití materiálu; snížení spotřeby materiálu na výrobu; snížení počtu výrobních kroků; snížení spotřeby energie; zkrácení doby uvedení výrobku na trh; možnost vyšší přesnosti a bezpečnosti; široká škála materiálů. [1, 2]
- **Nevýhody:** Ekonomicky náročné; v některých případech pomalá produkce; procesní náročnost; omezení maximální velikosti vyráběného výrobku; náročná rozměrová přesnost; v řadě případů nutnost následného zpracování – povrchová úprava, tepelné zpracování, dodržení tolerancí; možnost smrštění součásti; vznik vnitřního pnutí; nutnost vysoké kvality vstupního materiálu; v jistých případech nutnost podpůrných struktur; přísná kontrola a údržba. [1, 2]

Na **obr. 2** je zobrazen mosazný prsten vyrobený s využitím 3D tisku - je příkladem malého, velmi tvarově složitého objektu.



**Obr. 2** – Mosazný prsten vyrobený s využitím 3D tisku [4]

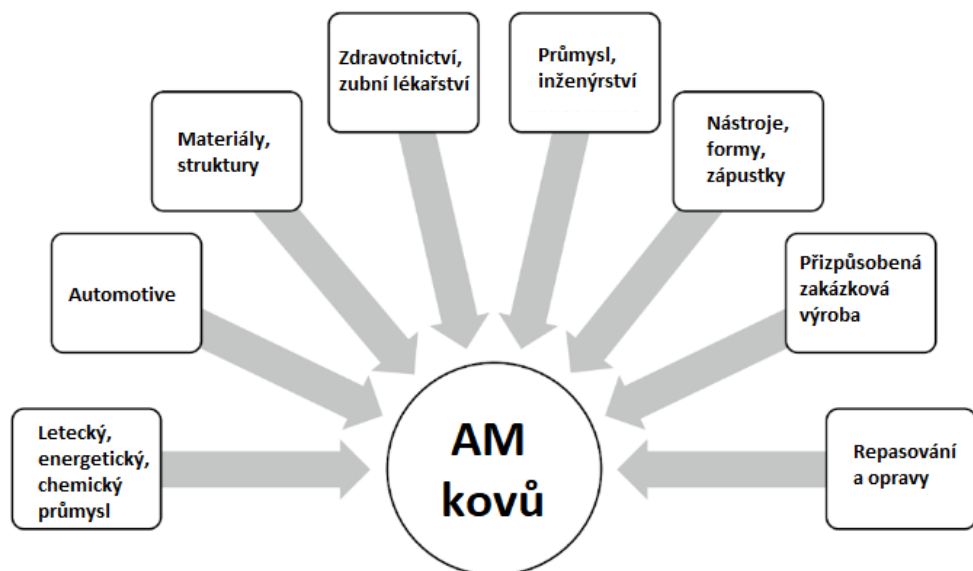


## 2 3D tisk kovů

Oblasti 3D tisku kovů je obecně věnována obrovská pozornost, a to zejména proto, že otevřela zcela nové příležitosti výroby objektů. Využitím technologií AM lze při zachování únosnosti konstrukcí dosáhnout jejich efektivního odlehčení, lze navrhovat dříve nemyslitelné geometrie, nebo např. vytvořením optimálních chladících kanálů zefektivnit chlazení. Dále jsou představeny oblasti použití, dostupné kovové materiály, a vybrané operace a technologie související s 3D tiskem kovů.

### 2.1 Oblasti použití

Zatímco v oblasti stavebnictví se aditivní výroba kovů teprve rozkukává, v jiných inženýrských a vědeckých oborech se již běžně používá. Jedná se zejména o letecký, kosmický, energetický a automobilový průmysl; zdravotnický sektor; různé strojírenské komponenty; a umění (klenotnictví). Očekává se, že automobilový, lékařský a letecký průmysl bude do roku 2025 představovat 84 % trhu aditivní výroby. Vybrané oblasti jsou představeny dále. [1]



*Obr. 3* – Oblasti aplikace AM kovů [9]

#### 2.1.1 Letecký průmysl

V leteckém průmyslu má aditivní výroba značné využití. Populárním ukazatelem ve výrobě komponent pro letectví je tzv. buy-to-fly poměr. Tento poměr udává podíl hmotnosti

nakoupeného materiálu k výrobě ku hmotnosti konečné vyrobené komponenty. U konvenčních metod nabývá tento poměr hodnot 10, 20, i vyšších, u metod AM se jedná o jednotky. Aditivní výroba tedy snižuje plýtvání materiálu a umožňuje výrobu lehčích dílů, což je v tomto odvětví žádoucí. K návrhu lehčích dílů se využívá topologické optimalizace. AM komponenty se využívají jak ve vojenské technice, tak u komerčně využívaných letadel. Jedná se zejména o komponenty, které nejsou kritické z hlediska bezpečnosti, a které jsou tepelně odolné, např.: držáky uvnitř kabiny pro cestující (Airbus A380); součásti klimatizací a vzduchotechniky (Eurofighter Typhoon); palivové trysky; trysky a součásti raketových motorů (NASA, SpaceX) atp. [1, 9]

### 2.1.2 Zdravotnictví

Ve zdravotnickém sektoru nabízí aditivní výroba nové možnosti vytváření náhrad biologických struktur. Vyrábí se speciální chirurgické nástroje a implantáty na míru. Běžné chirurgické implantáty vykazují nekompatibilitu vzhledem k tuhosti okolních kostí, to může časem vést k bolestivému uvolnění implantátu, což vyžaduje chirurgický zákrok. Pomocí AM lze stavět lehké porézní implantáty, které mají sníženou tuhost v blízkosti lidské kosti a povzbuzují regeneraci okolní tkáně. To vede k prodloužení životnosti implantátu. AM umožňuje dosažení složitých tvarů, malých velikostí a přidání pórovitých struktur, což nebylo dříve možné. Používanými materiály jsou zejména titan, titanové slitiny a kobaltové slitiny. Běžně se vyrábí prototypy obratlů, zubní implantáty, implantáty kyčelních kloubů a výztuhy pro zpevnění zlomenin (Prevotovy pruty). Na *obr. 4* vlevo je zobrazen zubní implantát vyroben metodou DMLS a vpravo titanový implantát lebky. Na zobrazeném zubním implantátu je také znázorněn rozdíl stavu povrchu před a po fázi postprocessingu. V pravé části je implantát po fázi výroby – jsou vidět i podpůrné struktury, v levé části je již bez struktur a povrchově upraven. Fáze postprocessingu se musí provádět téměř vždy, nicméně v porovnání s konvenčním způsobem výroby implantátu je proces AM vždy výrazně rychlejší. [1]



**Obr. 4** – Příklady využití AM kovů ve zdravotnictví [9]

### 2.1.3 Zakázková výroba, opravy a konformní chlazení

Výhodou aditivní výroby je bezesporu jistá volnost v oblasti návrhu objektů. Mohou být navrhovány různé **objekty na zakázku**. Jedná se o přizpůsobené vzory ze speciálních lehkých materiálů jako je např. titan, nebo drahých kovů. Aplikují se složité tvary s vnitřním odlehčením a zesilovacími strukturami, které umožňují kombinace inženýrských a uměleckých prvků. To vede k výrobě unikátních individualizovaných objektů. Příkladem může být moderní umění, různé šperky se jmény nebo iniciály blízkých, speciální sportovní vybavení, různé osobní věci, nebo třeba prototypové testovací přípravky. Na **obr. 5** je zobrazen rám horského kola vyrobený aditivní technologií. Rám byl sestaven z vytištěných částí, které jsou zobrazeny vpravo na stavěcí platformě. Rám byl ulehčen o 33 % hmotnosti originálního rámu. Další ukázkou může být prsten zobrazený na **obr. 2**. [7, 9]

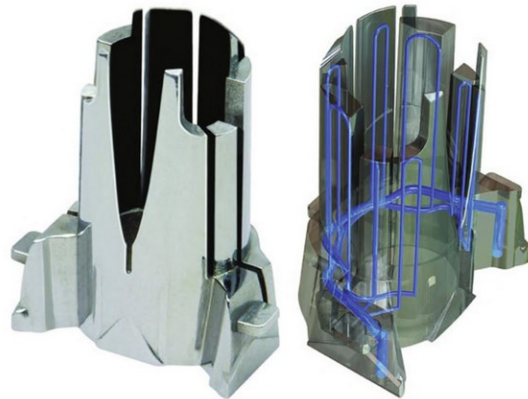


**Obr. 5** – Rám horského kola ze slitiny titanu vyrobený AM [9]

Aditivní výroba také umožnila výrazně rychlejší **opravy**. Opravy jsou rychlejší až o 90 %, stačí pouze odstranit poškozený materiál před přidáním nového. V konstrukci může být AM využita k opravám poškozených nebo zkorodovaných konstrukčních dílů, nebo dokonce k modernizacím konstrukčních prvků v reakci na zvýšené nároky na zatížení (únosnost). K opravám se využívají zejména technologie DED. Konkrétním případem jsou např. opravy opotřebených hořáků u plynových turbín. [1]

Aditivní výroba se efektivně využívá i v oblasti výroby lisovacích forem a forem pro lití kovů, kde zajišťuje aplikaci tzv. **konformního chlazení**. Běžné chladicí kanály forem jsou vrtané, což neumožňuje jejich optimální dráhu pro chlazení – nelze kopírovat zakřivenost dutin forem. Využitím technologií AM, například metodou DMLS, lze vytvářet optimální vedení chladicích kanálů, které v co nejkratší vzdálenosti od povrchu formy kopírují její tvar – tento způsob zajištění chlazení se nazývá konformním chlazením. Touto optimalizací chladicích okruhů se dosahuje zkrácení chladicích cyklů až o polovinu, zajišťuje se homogenní odvod

tepla a snižují se deformace výlisků. Konformní chlazení tedy zajišťuje urychlení formovacího procesu a zlepšení výsledné kvality dílu. Na **obr. 6** je zobrazena součást formy vyrobená metodou DMLS. V pravé části obrázku jsou znázorněny složité chladicí kanály umožněné výrobou 3D tisku a v levé části obrázku je hotová forma ve vyleštěném stavu po postprocessingu. Výroba formy zabrala 39 hodin, forma vydržela více než 190 000 cyklů a vedla ke zvýšení produktivity o 48 %. [9, 10]



**Obr. 6** – Forma vyrobená metodou DMLS [9]

#### 2.1.4 Automotive

Jedny z prvních aplikací 3D tisku a aditivní výroby byly uskutečňovány právě v oblasti automotive. Zavedení aditivních technologií zde umožnilo řadu efektivnějších konstrukčních a výrobních řešení. Tyto řešení přispívají zejména k růstu produktivity a lepšímu využití materiálu. Z počátku byly tyto technologie využívány především k výrobě plastových a kovových prototypů, které primárně sloužily k testování a ověřování funkčnosti daných konstrukčních řešení. Postupem času ale přešly technologie AM i do sériové výroby, kde zajišťují produkci ekonomicky a konstrukčně výhodných dílů, které by pomocí konvenčních výrobních metod nešly vyrobit. [1, 13]

Podobně jako v leteckém průmyslu je i v oblasti automotive snaha o snižování celkové hmotnosti vozidel. Důvodem jsou zejména zpřísnující se limity emisí výfukových plynů nebo u sportovních vozidel zlepšování jejich provozních vlastností. Tyto požadavky nutí výrobce snižovat hmotnost vozidel za účelem snížení spotřeby paliva při zachování výkonu, anebo za účelem dosažení většího dojezdu elektromobilů. AM umožňuje snižování hmotnosti zaváděním vhodných konstrukčních úprav, pórovitých vnitřních struktur a topologické optimalizace součástí. Další využití aditivní výroby zvyšuje produktivitu výroby součástí pomocí lisovacích nástrojů a forem s konformním chlazením (příkladným využitím je např. technologie kalení

lisováním oceli 22MnB5, která se využívá na nosné a bezpečnostní součásti karoserií). Efektivnějšího chlazení může být dosaženo i v oblasti chladicího systému spalovacího motoru, kde se obdobně zavádí optimalizované chladicí kanály a komponenty. Další AM komponenty se využívají např. na tepelně namáhané součásti, součásti spalovacích motorů nebo součásti převodného ústrojí vozidel. [1, 12, 14]

Dále jsou uvedeny konkrétní příklady použití aditivní výroby v automotive.

Na **obr. 7** jsou zobrazeny některé AM komponenty vyráběné firmou Bugatti. V roce 2018 začala firma vyrábět 3D tisknuté brzdové třmeny na model Bugatti Chiron – na obrázku vlevo nahoře. Tyto třmeny jsou určeny pro extrémně vysoké rychlosti vozidla (ca 380 km/h) a teploty až 1100 °C. Vlevo dole je zobrazen úchyt motoru s integrovanými kanály pro chladicí kapalinu, což výrazně snižuje přenos tepla z motoru. V pravé části obrázku je zobrazen topologicky optimalizovaný držák zadního spoileru. Díky optimalizaci se hmotnost držáku snížila o 5,4 kg. Dalšími příklady jsou například hlava motoru nebo skříň diferenciálu přední nápravy. [15]

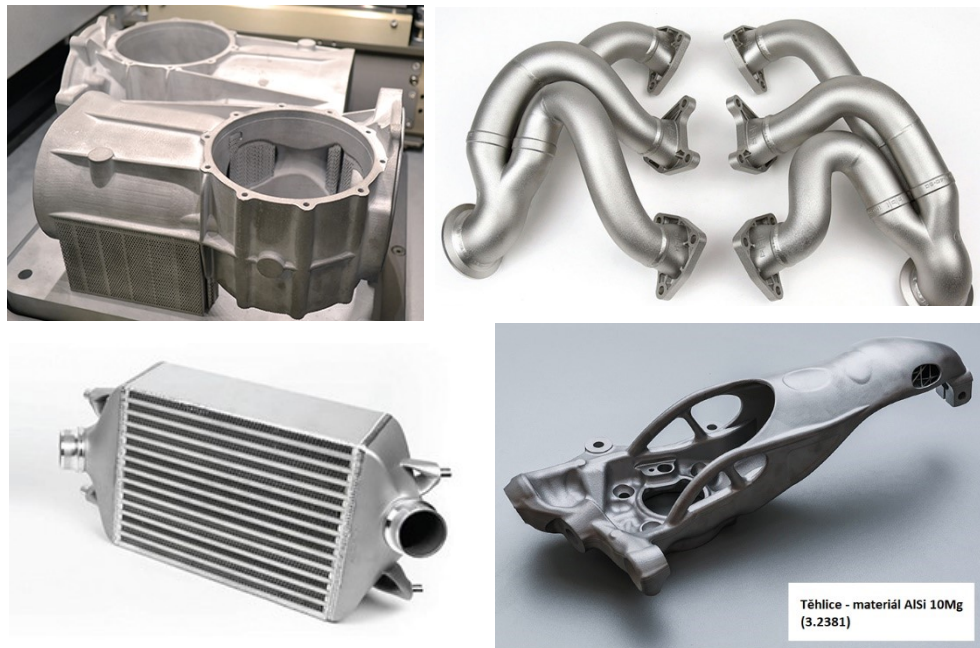


**Obr. 7** – AM komponenty Bugatti [15]

Na **obr. 8** jsou znázorněny další příklady vyráběných součástí. Vlevo nahoře je zobrazena skříň převodného ústrojí a vlevo dole je zobrazen mezichladič turbodmychadla firmy Porsche. Mezichladič byl vyroben z hliníkové slitiny AlSi10Mg (3.2381) o tloušťce stěny 1,8 mm. Aditivní výrobou byly vyrobeny pouze krajní nádrže, které byly následně přivařeny k běžnému tepelnému výměníku. Došlo k ulehčení součásti a zajištění lepšího šíření průtoku. V pravé části obrázku nahoře je poté znázorněno výfukové potrubí (svody) firmy Porsche. Potrubí bylo vyrobeno ze superniklové slitiny Inconel 625. Tloušťka stěny byla 1 mm, čímž se ušetřila

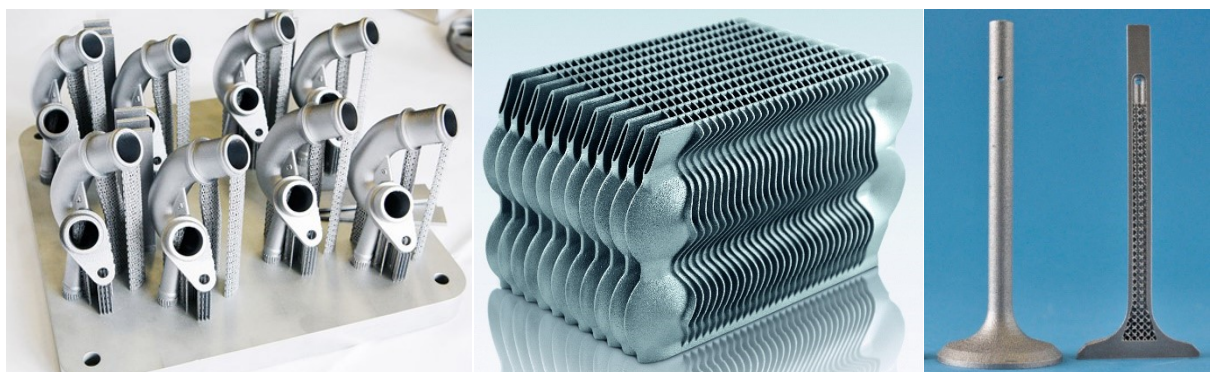


hmotnost oproti běžně vyráběnému dílu. A na poslední části obrázku vpravo dole je znázorněna topologicky optimalizovaná těhlice. [14]



**Obr. 8** – Příklady AM automotive component 1 [14]

Na **obr. 9** je zobrazena poslední série příkladů vyráběných součástí. Vlevo na obrázku je znázorněno potrubí chladicího okruhu pro motor Audi W12. Na obrázku jsou patrné podpůrné struktury, které jsou pro výrobu takto složitých součástí nezbytné. Uprostřed je poté zobrazen optimalizovaný tepelný výměník a vpravo odlehčená zkušební verze ventilu spalovacího motoru. V řezu je patrná porézní struktura, která vede k odlehčení. [11, 12, 13]

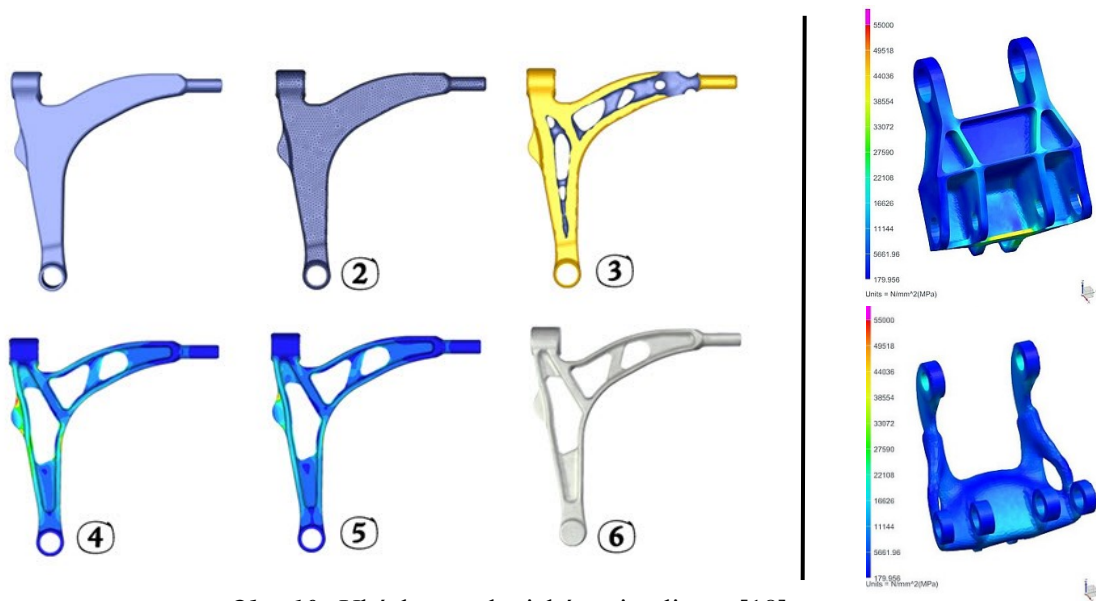


**Obr. 9** – Příklady AM automotive component 2; zdroje zleva [12, 13, 11]

## 2.2 Topologická optimalizace součástí a vnitřní struktury

Pojem **topologická optimalizace** byl zmíněn již mnohokrát, je tedy vhodné blíže představit o co se jedná.

Jak již bylo řečeno dříve, zejména v oblastech automobilového a leteckého průmyslu je snaha o snižování hmotnosti konstrukčních celků bez ohrožení jejich strukturálních funkcí. Jednou z možností dosažení těchto požadavků je využití strukturální a topologické optimalizace součástí v grafických programech. Tato optimalizace je založena na metodě konečných prvků (MKP), a spočívá v odebrání nepotřebného (postradatelného) materiálu při zachování správné funkce modelované součásti. Výsledkem je optimalizovaná geometrie, obvykle tzv. bionického tvaru, kterou je možné vyrobit díky technologiím aditivní výroby. Bionické konstrukce zdánlivě připomínají biologické struktury, které jsou konvenčními metodami nevyrobitelné. Příkladem je např. držák zadního spoileru na **obr. 7** nebo úchyt v pravé části **obr. 10** – vpravo nahoře je znázorněn původní tvar (odlitek) a vpravo dole je optimalizovaná bionická geometrie. [16, 18]



**Obr. 10** – Ukázka topologické optimalizace [18]

V levé části **obr. 10** je znázorněn postup při topologické optimalizaci součásti. V tomto konkrétním případě se jedná o spodní rameno podvozku automobilu. Původní návrh byl optimálně vysítován (2; meshing), následně se stanovily okrajové podmínky a ve vybrané oblasti byla provedena topologická optimalizace (3). Okrajovými podmínkami jsou myšleny zejména uložení a silové namáhání součásti (pevnostní namáhání). Poté byla provedena úprava a tzv. validace geometrie součásti (4) a redukce napětí (5). Výsledkem je optimalizovaná geometrie, která splňuje stanovené podmínky a odlehčuje součást (6). Pro provádění topologických optimalizací je k dispozici celá řada softwarů, např.: Abaqus, Altair, Ansys;

Femap, Genesis, MSC Nastran, OptiStruct, ProTOP, Simulia (Tosca Structure), nebo SolidThinking Inspire. [18]

Topologická optimalizace však nemusí vždy vést k optimálním geometriím vzhledem k možnostem aditivní výroby. Topologicky optimalizované návrhy mohou značně zvyšovat množství podpůrných struktur nutných pro aditivní výrobu, což vede ke zvýšení výrobních nákladů a nákladů na postprocessing. Proto je nutné, aby konstruktér (návrhář) myslel nejenom na co nejvyšší úsporu hmotnosti součásti, ale také na efektivitu a ekonomickou výhodnost výroby. Přidávání podpůrných struktur zvyšuje čas výroby a materiálové náklady. Do výrobních nákladů se nejvíce promítají náklady na výrobní stroj a poté materiálové náklady (ca 18 %). Podpůrné struktury mohou být těžce odstranitelné a mohou být i na nepřístupných místech – to zvyšuje náklady na postprocessing (ca 8 %). [17]

Další možností ulehčení součástí je použití tzv. **vnitřních struktur**. Jedná se o strukturální mřížky, které umožňují výrobu pórovitých lehčených oblastí. Tyto struktury jsou využívány pro již zmíněné lokální snížení tuhosti implantátů v klíčových oblastech kontaktu implantátu s lidskou kostí nebo pro ulehčení či vyztužení jiných součástí. Vyztužení může být provedeno u normálně dutých konstrukcí zavedením klasických vnitřních struktur nebo struktur se záporným Poissonovým číslem ( $\mu$ ) - ty přispívají ke zvýšení spotřeby energie (deformační, seismické). Pro odstranění přebytečného nespečeného prášku z vnitřních prostor, kde byly tvořeny struktury, jsou v součásti navrženy malé otvory pro jeho odstranění. Praktickým příkladem je odlehčená zkušební verze ventilu na **obr. 9**. Příklady možných struktur jsou poté zobrazeny na **obr. 11**. Část zkoumaných vzorků v praktické části práce obsahovala vnitřní struktury. [1, 18]



**Obr. 11** –Příklady možných vnitřních struktur [18]



## 2.3 Dostupné materiály

Hlavními technologiemi, využívanými pro AM kovů jsou technologie PBF (Powder Bed Fusion) a DED (Direct Energy Deposition). Používané materiály jsou ve formě jemného kovového prášku nebo v případě DED mohou být i ve formě kovového drátu. Dále je věnována pozornost zejména materiálům, které jsou používány ve formě jemného kovového prášku. [3]

Kovy využívané v aditivní výrobě musí splňovat dvě základní kritéria: musí být dobře svařitelné, aby se zabránilo vzniku solidifikačních trhlin při tuhnutí taveniny; a musí být schopny přípravy jemného kulovitého prášku o velikosti několika desítek mikronů, který je nutný k dosažení dobré hustoty a homogenity výsledného materiálu výrobku. Běžně dostupnými materiály jsou zejména slitiny a nerezové/nástrojové oceli. Běžné (levnější) oceli nejsou pro AM technologie zatím k dispozici. V současné době se používá ca 40 různých slitinových složení ve formě prášku a trh se stále rozrůstá. Vedle nerezových a nástrojových ocelí se používají slitiny titanu, hliníkové slitiny, kobaltové slitiny, slitiny mědi, niklové superslitiny a drahé kovy. Drahé kovy jako zlato, stříbro nebo platina, bývaly zpracovávány nepřímo 3D tiskem pomocí ztracených voskových modelů. V současné době se již zpracovávají přímo pomocí technologií PBF. [3, 5]

Dále jsou blíže představeny vybrané materiály používané v AM kovů:

- **Nerezové oceli** – Od uhlíkových se odlišují zejména množstvím přítomného chromu. Jedná se o slitiny s minimálním obsahem 10,5 hm. % Cr. Příkladem nerezových ocelí pro AM jsou: **316 L (1.4404)** (pozn. v závorce je uvedeno číselné označení oceli dle norem DIN – W. Nr. neboli Warenummer) – jedná se o austenitickou nerezovou ocel, která se vyznačuje vysokou pevností a odolností proti korozi. Využívá se v leteckém, kosmickém, petrolejovém průmyslu a ve zdravotnictví. **15-5 PH (1.4540)** – jedná se o maraging nerezovou ocel s vysokou pevností a houževnatostí. Používá se v leteckém a petrochemickém průmyslu. Dalším příkladem nerezové maraging oceli je ocel **17-4 PH (1.4542)**. [6, 7]

- **Slitiny titanu** – Příkladem titanových slitin pro AM jsou: **Grade 2 (3.7035)** – ve většině aplikací je odolná vůči korozi. Využívá se ve zdravotnictví, má skvělou biokompatibilitu, zejména pokud je vyžadován přímý kontakt s tkání nebo kostí. **Ti6Al4V (3.7165)** – má vynikající pevnost a houževnatost v kombinaci s protikorozní odolností. Využití nachází v leteckém, automobilovém průmyslu a ve zdravotnictví. **Ti6Al4V ELI (3.7165 ELI)** – čistší verze předchozí oceli, využívá se pro implantáty. [6, 7]

- **Hliníkové slitiny** – Příkladem hliníkových slitin pro AM jsou: *AlSi12 (3.3581)* – hodí se na výrobu lehkých dílů s dobrými tepelnými vlastnostmi. Typickými aplikacemi jsou tenkostěnné součásti tepelných výměníků a komponenty v automobilovém a leteckém průmyslu. *AlSi10Mg (3.2381)* – kombinace křemíku a hořčíku vede k významnému zvýšení pevnosti a tvrdosti součástí. Využití je stejné jako u předchozí slitiny. [6]

- **Niklové superslitiny** – Příkladem niklových superslitin pro AM jsou např.: *Inconel 625 (2.4856)* – Poskytuje vynikající nosnost pro krátkodobé aplikace do teplot ca 815 °C. Je používána pro nízkoteplotní aplikace v petrochemickém průmyslu a podmořských podmínkách. *Inconel 713 (2.4670)* – Nabízí vynikající odolnost proti tepelné únavě. Používá se pro lopatky plynových turbín. *Hastelloy X (2.4665)* – Vyznačuje se vysokou pevností a oxidační odolností ve vysokých teplotách, až do 1200 °C. Používá se v letecké a kosmické technice pro součásti plynových turbín a spalovacích zón. [6]

- **Kobaltové slitiny** – Vyznačují se vysokou pevností, vynikající odolností proti korozi, nemagnetickým chováním a skvělou biokompatibilitou. Příkladem kobaltových slitin je: *Co28Cr6Mo (2.4723)* – Používá se pro chirurgické implantáty, komponenty motorů, větrné turbíny nebo šperky. [6]

- **Slitiny mědi** – Příkladem je *CuSn10 (2.1050)* – Slitina známá pod názvem bronz má vynikající tepelně a elektricky vodivé vlastnosti. Vynikající tepelná vodivost v kombinaci s AM lze využít pro účinnější chlazení např. polovodičových zařízení. [6]

- **Nástrojové oceli** – Nástrojová ocel označuje řadu uhlíkových a legovaných ocelí, které jsou zvláště vhodné pro výrobu nástrojů. Jejich vhodnost vychází z jejich vynikající tvrdosti, odolnosti vůči otěru a deformaci, a schopnosti uchování si ostré špičky za zvýšených teplot. Příkladem nástrojové oceli je ocel *H13 (1.2344)* – často se používá pro zápustky a je schopna velmi dobře odolat procesním podmínkám. [6]

- **Maraging oceli** – “Martensitic-aging“ oceli jsou známé kombinací vysoké pevnosti, houževnatosti a rozměrové stability v průběhu stárnutí. Od ostatních ocelí se liší tím, že jsou zpevňovány metalurgickou reakcí, která nezahrnuje uhlík, ale precipitaci intermetalických sloučenin bohatých na nikl, kobalt a molybden. Příkladem je ocel *Maraging 300 (1.2709)*, která se mimo jiné používá v automobilovém a leteckém průmyslu. Předmětný materiál zkoumaný v praktické části práce odpovídá právě této oceli – blíže bude představen dále. [6]

V následující tabulce jsou ještě znázorněny nejpoužívanější kovové materiály v AM.

**Tab. 1** – Nejpoužívanější kovové materiály v AM [7]

	Materiál	DIN
Hliníkové slitiny	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Kobaltové slitiny	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Nástrojové oceli	AISI420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357
Niklové slitiny	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Nerezové oceli	SS 304	1.4301
	SS 316L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542
Titanové slitiny	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Drahé kovy	Zlato (šperky)	18 Carat
	Stříbro	930 Sterling
Slitiny mědi	CC 480 K	2.1050

Tento výběr dostupných materiálů pro aditivní výrobu je poněkud omezený, je potřeba zvýšit “vyspělost“ dostupných materiálů pro zlepšení kvality, umožnění výroby kritických součástí, lepší velkoobjemovou výrobu a umožnění kombinace slitin pro funkčně odstupňované součásti. Dále je potřeba zvýšit rozmanitost kompatibilních materiálů, aby vyplnily mezeru mezi aditivní výrobou a konvenčními technologiemi lití a kování. [5]

## 2.4 Metody výroby kovového prášku

Konzistence a kvalita kovového prášku má v aditivní výrobě zásadní vliv na finální vlastnosti a jakost výrobku. Většina kovových prášků je obvykle vyráběna pomocí dobře zavedených metod, jako je atomizace plynem nebo plazmou. Zejména v oblasti titanu

a titanových slitin se poté používají i levnější metody jako např. elektrolytické metody, metalotermické procesy (např. TiRO proces), nebo hydride-dehydride proces. [5, 8]

Různé způsoby výroby vedou k různým vlastnostem prášků. Důležitá je zejména morfologie částic, velikost částic a chemické složení. Požadovaná velikost částic se pro laserové spékání pohybuje v rozmezí 15-45  $\mu\text{m}$  a pro spékání elektronovým paprskem v rozmezí 45-105  $\mu\text{m}$ . V zásadě AM procesy vyžadují: dobré "tokové vlastnosti" prášku – aby se dosáhlo homogenního rozprostření prášku na stavěcí platformě; optimální hustotu rozložení prášku – předcházení pórovitosti a neúplnému spečení; a co nejvyšší čistotu prášku. Důraz musí být kladen i na skladování, manipulaci a případné přísné zotavování (recyklaci nespečeného práškového lože). [5, 8]

Dále jsou stručně představeny vybrané metody výroby.

#### 2.4.1 Atomizace vodou

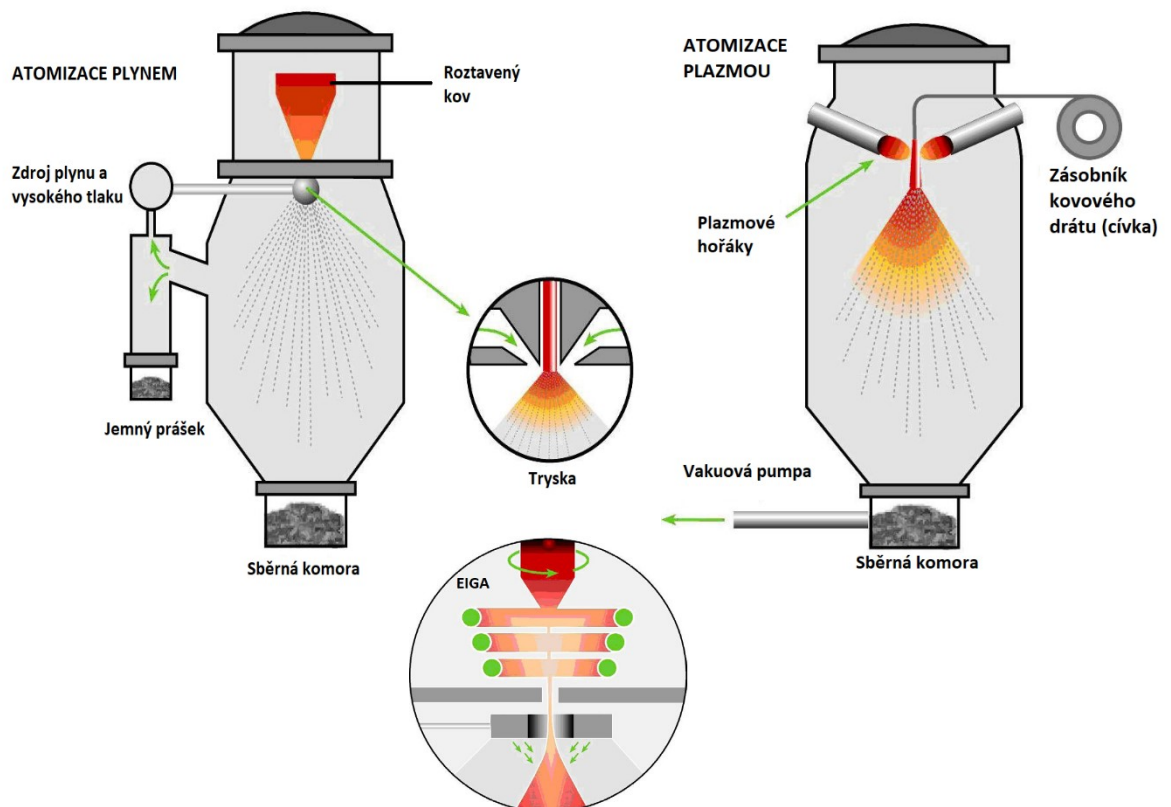
Surovina je nejprve roztavena v peci, odkud je následně přemístěna do tzv. mezipánve (kelímek, který reguluje průtok taveniny do rozprašovače). Tekutý kov odtud shora vtéká do atomizační komory, kde jsou symetricky rozmístěny vodní trysky. Kov volně padá mezi tryskami, je rozprašován vodou a tuhne. Prášek se shromažďuje na dně komory. Vzhledem k velké rychlosti ochlazování vznikají částice nepravidelného tvaru a velikosti od několika  $\mu\text{m}$  až do 500  $\mu\text{m}$ . Kvůli nepravidelnému tvaru částic a vzniku oxidace, se v oblasti AM tyto prášky téměř nepoužívají. [5, 8]

#### 2.4.2 Atomizace plynem a plazmou

U **atomizace plynem** je princip procesu stejný jako v předchozím případě, s tím rozdílem, že jako atomizační medium je použit plyn. Tento plyn může být vzduch, ale většinou se jedná o inertní plyn (argon, dusík), který snižuje riziko vzniku oxidace. Tavení kovu pro důležité aplikace se provádí pomocí vakuových indukčních pecí (VIM pece). Tyto pece jsou umístěny nad atomizační komorou, do které tekutý kov vtéká přímo z pece – tím je zamezeno oxidaci a je zajištěna větší čistota. Proud tekutého kovu je rozprašován vysokotlakými tryskami plynu. Kvůli nižší tepelné kapacitě plynu (oproti vodě), mají kovové kapičky zvýšenou dobu tuhnutí, což vede k relativně kulovitému tvaru částic. Princip metody je znázorněn na **obr. 12** vlevo. Metoda se používá při výrobě prášku MS1, který byl použit pro výrobu testovaných vzorků. [8]

Další možností pro zajištění co nejlepší čistoty kovového prášku je použití metody EIGA (induction melting gas atomisation). V této metodě se zamezuje kontaktu tekutého kovu s okolními materiály tím, že je surovina ve formě kovové tyče tavena indukční cívkou přímo nad atomizační komorou, viz. *obr. 12* dole. [5]

Při **atomizaci plazmou** vznikají kulovité částice o nejmenší velikosti ze všech používaných metod (průměrně mají ca 40  $\mu\text{m}$ ). Surovina je většinou ve formě drátu přiváděna do atomizační komory, kde je tavena plazmovými hořáky a rozprašována inertním plynem, viz *obr. 12* vpravo. [5, 8]



*Obr. 12* – Metody výroby kovového prášku [8]

### 2.4.3 Procesy Hydride-Dehydride a TiRO

Proces **Hydride-Dehydride** na rozdíl od předchozích metod nevyužívá tavení kovu. Kovová surovina je zde frézována, drcena a prosévána, aby byly větší kusy materiálu zjemněny – prášek se tedy tvoří mechanicky. Metoda je založena na vodíkové křehkosti kovů. Například u titanu vznikají hydridy titanu, materiál je pak křehčí a lépe se drtí. Přebytečný vodík je poté z prášku odstraněn. Výsledné částice prášku mají velmi nepravidelný tvar, mohou se použít jako surovina pro atomizaci plazmou. [8]

**TiRO** je dvoustupňová výrobní metoda pro prášek čistého titanu. Chlorid titaničitý ( $\text{TiCl}_4$ ) je nejprve tepelně redukován za přítomnosti hořčíku na kompozit  $\text{MgCl}_2/\text{Ti}$ . Poté se tento kompozit separuje za pomoci vakuové destilace, čímž vznikne titanový prášek o vysoké čistotě. Prášek má velikost částic v rozmezí ca 150–600  $\mu\text{m}$ , proto bývá následně ještě mechanicky zpracován, aby byl vhodný pro procesy AM. [8]

## 2.5 Metody 3D tisku kovů

Jak již bylo zmíněno, hlavními technologiemi využívanými pro AM kovů jsou technologie PBF (Powder Bed Fusion) a DED (Direct Energy Deposition). Jedná se o dvě skupiny technologií lišící se principem tvorby objektů. Dále jsou stručně představeny oba principy a konkrétněji popsána metoda DMLS (Direct Metal Laser Sintering) spadající do oblasti PBF technologií, představen je také postup od modelu k součásti. Metodou DMLS byly vytvořeny všechny díly testované v praktické části práce.

### 2.5.1 Direct Energy Deposition (DED)

DED označuje skupinu technologií, které jako základní surovinu používají kovový drát nebo tok jemného kovového prášku, které jsou vpravovány do zdroje energie (tepla). Zdrojem energie je laserový nebo elektronový paprsek nebo oblouk, který taví a ukládá materiál na podklad. Tyto technologie lze rozdělit do dvou hlavních kategorií právě na základě typu vstupního materiálu. První kategorie zahrnuje metody vyvinuté z tradičních svařovacích technik, kde je vstupním materiálem kovový drát (např. EBF, RPD). Druhou kategorií představují metody LENS (Laser Engineered Net Shaping) a DMD (Direct Metal Deposition), kde je vstupním materiálem tok jemného kovového prášku. DED technologie se kromě výroby samostatných dílů používají k efektivním opravám a úpravám komponent. Vybrané metody jsou dále stručně popsány. [2, 19]

U metod **LENS** (Laser Engineered Net Shaping) a **DMD** (Direct Metal Deposition) se k roztavení kovového prášku používá vysoce výkonný laser. Speciálně navržené trysky pro dodávání kovového prášku vstříkují proud prášku přímo do laserového paprsku. Tyto trysky jsou integrovány do laserové hlavy a při tisku se pohybují jako jedna jednotka. Prášek je distribuován po obvodu laserové hlavy gravitací nebo pomocí natlakovaného plynu. Laser vytváří malou tavnou lázeň na stavěcí platformě nebo předchozí vrstvě materiálu – lázeň tuhne

a zajišťuje postupný růst součástí. X-Y platforma se posouvá a natáčí dle místa potřeby tvorby vrstvy. Po dokončení každé vrstvy se hlava svisle posouvá nahoru, případně se natáčí. [20]

Metoda **EBF** (Electron Beam Freeform Fabrication) byla vyvinuta společností NASA. Na rozdíl od předchozích metod je materiálem kovový drát. Přední konec drátu je taven elektronovým nebo laserovým paprskem a je selektivně nanášen na kovový podklad platformy nebo předchozí vrstvu materiálu. Proces probíhá ve vakuu. Metoda **RPD** (Rapid Plasma Deposition) využívá argonovou plazmu, která taví kovový drát. Roztavené kapičky kovu jsou unášeny plynem argonu a nanášeny na podklad nebo předchozí vrstvu materiálu. Pohyby stavěcí platformy a tiskové hlavy jsou shodné s předchozími metodami. [2, 19]

### 2.5.2 Powder Bed Fusion (PBF)

PBF označuje skupinu technologií, které využívají vysoce energetického zdroje pro selektivní tavení nebo spékání kovového práškového lože. Podle typu zdroje energie lze technologie PBF rozdělit do dvou hlavních kategorií. První kategorie používá jako zdroj energie vysoce výkonný laser, patří sem např. metody SLS/SLM nebo DMLS. Výkon laseru je obvykle v rozsahu 100–1000 W v závislosti na výrobcu a konkrétní metodě. U laserových metod může být tloušťka každé vrstvy velmi malá – až 20  $\mu\text{m}$ . To je vzhledem k ostatním AM technologiím výhodné, je tím zajištěno větší rozlišení a možnost tvorby lepších detailů. Druhá kategorie využívá jako zdroj energie elektronový paprsek a zastupuje ji metoda EBM (Electron Beam Melting). Výkon elektronového paprsku je mnohem vyšší než laserového zdroje, metoda je schopna pracovat s většími tloušťkami jednotlivých vrstev a tím vytvářet díly rychleji. PBF technologie mají stavěcí platformu uzpůsobenou tak, aby udržela práškové lože a laser nebo elektronový paprsek jej spéká nebo taví shora. Nespečený prášek je ponecháván na platformě v okolí spečeného a tvoří jakousi podporu vznikajících struktur. Po dokončení výroby je prášek odstraněn a recyklován. Jedná se o jedny z nejpoužívanějších AM technologií. Vybrané metody jsou dále stručně popsány. [2, 19]

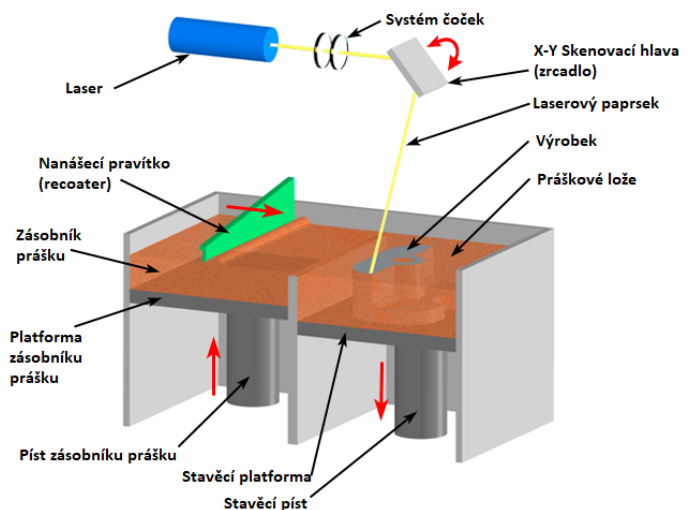
Metoda **EBM** (Electron Beam Melting) byla v podstatě vyvinuta z techniky rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM). Prášek je taven elektronovým paprskem, který je napájen vysokým napětím (obvykle 30-60 KV). Proces probíhá ve vakuové komoře, aby se zabránilo možné oxidaci. Zdroj elektronového paprsku je umístěn v horní části komory a pohyb paprsku je řízen pomocí systému čoček. Prášek je dávkovačem nasypán na okraj stavěcí platformy a následně pomocí pravítka potažen na vrch předchozí vrstvy a taven. Platforma se s každou vrstvou úměrně posouvá dolů. [19, 20]

V metodě **SLS** (Selective Laser Sintering) je jemný prášek spékán pomocí laserového paprsku. Laserový paprsek prochází ze zdroje systémem čoček a pomocí zrcadla je usměrňován na povrch stavěcí platformy, zrcadlo také řídí pohyb laserového paprsku v rovině X-Y. Ještě před spékáním práškového lože laserem je celé lože předehřáto těsně pod teplotu tavení spékaného materiálu, to usnadňuje následné propojení přidávaného materiálu s předchozí vrstvou. Po spečení vrstvy se stavěcí platforma posune dolů úměrně tloušťce vytvořené vrstvy. Následně je z práškového zásobníku pomocí nanášecího pravítka nebo štětce aplikována vrstva čerstvého prášku a proces se opakuje. Metoda SLS není určena pouze pro kovové prášky, používají se i např.: vosk, nylon, plasty, kompozity. Metoda **SLM** (Selective Laser Melting) se od metody SLS liší tím, že je prášek místo spékání taven. Proto je výkon laserového paprsku obvykle vyšší. Pracovní komory jsou obvykle naplněny inertním plynem (argon) pro zamezení oxidace kovových prášků za vysokých teplot. [19, 20]

### 2.5.3 DMLS

Metoda DMLS (Direct Metal Laser Sintering) je představena v samostatné podkapitole zejména proto, že se jedná o nejvyužívanější metodu v oblasti 3D tisku kovů a veškeré díly testované v praktické části práce byly touto metodou vyrobeny.

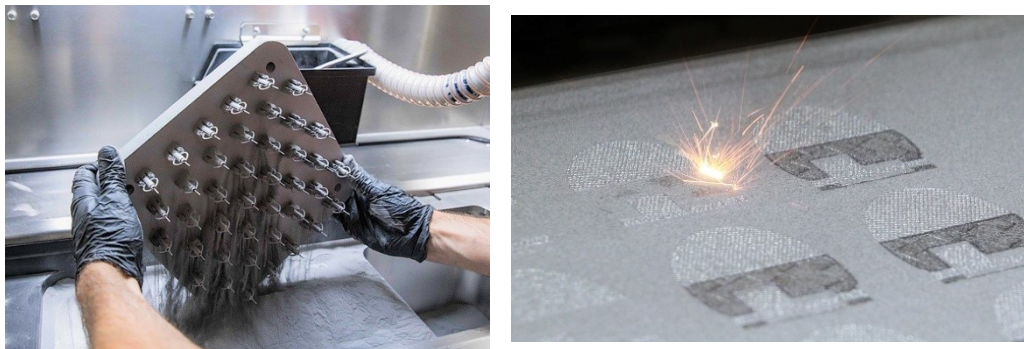
Metoda DMLS byla vyvinuta německou společností EOS, jedná se tedy o obchodní název s registrovanou ochrannou známkou. Technologie je téměř shodná s metodami SLS/SLM. Hlavním rozdílem je, že DMLS pracuje pouze s kovovými prášky a oproti SLM je prášek méně zahříván. Důležitými částmi DMLS stroje jsou: stavěcí platforma, jednotka zajišťující zásobování prášku, nanášecí jednotka (recoater), laserový systém, přesná optika, vysokorychlostní skener a počítač s příslušným softwarem. Kovový prášek je uložen v dávkovací jednotce, odkud je pomocí nanášecího pravítka rovnoměrně rozprostírán po stavěcí platformě. Tloušťka spékaných vrstev prášku se pohybuje v rozmezí ca 20-60  $\mu\text{m}$ . Naproti zásobníku prášku může být umístěn i přepadový zásobník. Princip stroje je znázorněn na **obr. 13** a je dále popsán. [2, 20]



**Obr. 13** – Princip metody DMLS [2]



Na stavěcí platformu je přidělena základní ocelová deska. Na tuto desku je nanesena první vrstva kovového prášku o velikosti zrn menší než je požadovaná tloušťka spékané vrstvy. Poté je vrstva přehřívána těsně pod teplotu tavení spékaného materiálu. Následně je vrstva laserově spečena a stavěcí platforma se posune úměrně tloušťce vrstvy dolů. Zásobník prášku se pohybuje nahoru tak, aby nanášecí pravítko odebralo dostatečné množství prášku pro rovnoměrné rozprostření čerstvé vrstvy prášku na již spečenou vrstvu. Laserový paprsek speče druhou vrstvu a proces se opakuje, dokud není kompletní součást vytvořena. Pracovní komora je opatřena inertním plynem pro zabránění oxidace kovového materiálu. Po vychladnutí součástí se odstraní okolní nespečený prášek a součásti se zpracují v rámci postprocessingu. Rychlost výroby závisí na požadované přesnosti a drsnosti součástí. Na základní desce mohou být vedle sebe tvořeny různé součásti. Na *obr. 14* je zobrazen detail na spékání lože a odstraňování desky s vytištěnými díly ze stavěcí platformy. [2, 21]



*Obr. 14* – Ukázky z procesu výroby (DMLS) [21]

#### 2.5.4 Postup od modelu k součásti

Každý AM proces obsahuje stejné základní kroky a operace [2, 22]:

- Vytvoření CAD modelu – konstruktér nebo návrhář vytvoří 3D CAD model vyráběného objektu. Při tvorbě může být použita topologická optimalizace.
- Převod CAD modelu do modelu STL. – jedná se o standardní formát využívaný v AM procesech. STL formát představuje povrchy trojrozměrného modelu jako sadu trojúhelníků. Pro každý trojúhelník ukládá souřadnice vrcholů a směry normál. Důležitá je správná hustota trojúhelníkové sítě.
- Úprava modelu pro tisk – uživatel pomocí speciálního softwaru upraví soubor STL. – označí se umístění a orientace součásti ve stroji, upraví se ostré hrany a přechody součásti, a stanoví se podpurné struktury. Orientace součásti ve stroji ovlivňuje výsledný čas výroby, pevnost

součásti a přesnost. Podpůrné struktury jsou potřeba např. u stěn, které svírají se základní deskou menší uhly než  $45^\circ$ .

- Rozdělení (rozřezání) STL modelu ve směru stavby na jednotlivé vrstvy – software rozřeže model na velmi tenké vrstvy podél roviny X-Y. Každá vrstva bude poté stavěna na předchozí vrstvě nahoru ve směru osy Z. Tento rozřezaný soubor je poté uložen ve formátu SLI. a přesunut do programu výrobního stroje.
- Nastavení stroje a parametrů tisku + výroba součásti vrstvu po vrstvě – dle typu výrobní metody a stroje je součást tištěna.
- Post-processing – po dokončení tisku je základní deska vyjmuta ze stroje a očištěna od kovového prášku. Jsou odstraněny podpůrné struktury a většinou proběhne povrchová úprava součásti pro zajištění lepšího vzhledu a delší životnosti. Součásti mohou být také tepelně zpracovávány.

### 3 Vysokopevné oceli pro automotive

V této kapitole jsou stručně představeny vybrané vysokopevné oceli používané v automobilovém průmyslu (AHSS) a maraging oceli. Předmětný typ oceli zkoumaný v praktické části práce je maraging ocel, proto jsou tyto oceli představeny podrobněji. AHSS oceli se používají především v konstrukci karoserií automobilů a maraging oceli na součásti převodného ústrojí (hnací hřídele, ozubená kola) zejména těžkých a soutěžních vozidel.

#### 3.1 AHSS oceli

Pokročilé vysokopevné oceli – AHSS (Advanced High-Strength Steels) jsou složité, propracované materiály s pečlivě vybraným chemickým složením a vícefázovými mikrostrukturami, které jsou výsledkem přesně řízeného procesu ohřevu s následným ochlazováním. Jedná se o oceli, které jsou navrženy tak, aby efektivně splňovaly požadavky dnešních vozidel na přísné bezpečnostní předpisy, emisní limity a solidní výkon. To vše musí být dosaženo za přijatelných výrobních nákladů. Nízká hmotnost, vysoká pevnost, tažnost a další vlastnosti těchto ocelí se dosahují využitím různých zpevňovacích mechanismů. Do skupiny AHSS ocelí se řadí: Dvoufázové oceli (DP), Komplexně fázové oceli (CP), Feriticko – Bainitické oceli (FB), Martenzitické oceli (MS), TRIP oceli, TWIP oceli a Mangan-Bórové oceli. Tyto oceli jsou dále stručně představeny. [23]

**Dvoufázové oceli** (DP – Dual Phase) jsou tvořeny primární feritickou maticí, ve které je rozptýlen martenzit ve formě osamělých ostrůvků. Obsah martenzitu je ca 10-20 % objemu. Tohoto složení se dosahuje kontrolovaným ochlazováním oceli z austenitické fáze. Ve finální matici může být přítomno i malé množství bainitu a zbytkového austenitu. DP oceli mají velkou tažnost a vysoký koeficient deformačního zpevnění. Hodnoty meze pevnosti v tahu se pohybují v poměrně širokém rozsahu (ca 500-1300 MPa), může být využito BH efektu. Používají se na vnější díly karoserií a součásti bezpečnostních klecí. [23]

**Komplexně fázové oceli** (CP – Complex Phase) mají vícefázovou mikrostrukturu, která je tvořena feriticko – bainitickou maticí s malým množstvím martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu. V porovnání s DP oceli poskytují CP oceli vyšší mez kluzu a mez pevnosti v tahu ( $R_m$  je ca 800-1500 MPa a  $R_{p0,2}$  ca 500-1000 MPa), tažnost je výrazně nižší ca 10 %. Používají se na součásti podvozku, výztuhy a nosné prvky. [23, 24]

**Feriticko – Bainitické oceli (FB)** se zpracovávají válcováním za tepla. Mají jemnou mikrostrukturu feritu a bainitu. Požadovaná pevnost je získávána zjemněním zrna a přítomností bainitické fáze. Mez pevnosti v tahu bývá ca 500–900 MPa, tažnost je ca 15–30 %. Používají se na závěsné a ovládací ramena, výztuhy nárazníků a podvozkové díly. [24]

**TRIP oceli** (Transformation-Induced Plasticity) mají mikrostrukturu tvořenou zbytkovým austenitem v primární feritické matici. Kromě minimálně 5 % zbytkového austenitu obsahují i různé množství tvrdých sekundárních fází (martenzit, bainit). V průběhu deformace zajišťuje přítomnost tvrdých sekundárních fází v měkké matici deformační zpevnění. Toto zpevnění je výrazně ovlivněno tzv. TRIP efektem, kdy při zvyšujícím se napětí dochází k mechanické přeměně zbytkového austenitu na martenzit. Mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí ca 600–1100 MPa a tažnost bývá 20–30 %. Používají se na různé výztuhy, rámy, střešní ližiny a součásti uchycení motoru. [23]

**TWIP oceli** (Twinning-Induced Plasticity) mají za pokojových teplot plně austenitickou strukturu (obsah Mn ca 20 %). Jedná se o stabilní austenit, který při zatížení tíhne k tvorbě mechanických dvojčat. Vznik mechanických dvojčat zjemňuje mikrostrukturu a hranice dvojčat působí jako hranice zrn. Tím je dosaženo deformačního zpevnění. Mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí ca 900–1300 MPa a tažnost bývá až 60 %. Používají se v deformačních zónách automobilů. [23]

**Martenzitické oceli (MS)** jsou vytvářeny rychlým řízeným ochlazováním z austenitické fáze. Mikrostruktura je téměř plně martenzitická s malým množstvím bainitu a feritu. Do martenzitických ocelí lze zahrnout i tzv. **Mangan-Bórové oceli**. U těchto ocelí probíhá ochlazování a přeměna austenitu na martenzit ve speciálně upraveném lisovacím nástroji. Aby bylo možné dosáhnout plně martenzitické přeměny, jsou tyto oceli legovány bórem – bór tuto přeměnu podporuje. Celý výrobní proces se nazývá kalení lisováním. Ze všech AHSS ocelí mají MS oceli nejvyšší mez pevnosti v tahu – až 1700 MPa, tažnost se pohybuje kolem 5 %. MS oceli vykazují velkou spotřebu deformační energie, proto se používají na bezpečnostní a nosné prvky (A, B sloupky, výztuhy, nárazníky, středový tunel, a další součásti bezpečnostních klecí). [24]

## 3.2 Maraging oceli

Maraging oceli jsou speciální třídou ultra – vysokopevných ocelí. Svoji pevnost získávají vytvrzováním (stárnutím), které probíhá po dobu několika hodin při teplotách ca 480–510 °C. Při vytvrzování vznikají precipitáty intermetalických fází v matici nízkouhlíkového martenzitu. Z anglického názvu pro stárnutí martenzitu je poté odvozen název Maraging neboli Martensitic–Aging. Tyto oceli mají velmi nízký obsah uhlíku ( $C < 0,03 \%$ ) a jsou legovány niklem, kobaltem, molybdenem a titanem. Nízký obsah uhlíku poskytuje velmi dobrou kalitelnost, tvařitelnost, a kombinaci pevnosti a houževnatosti. Podle hodnoty meze kluzu jsou maraging oceli rozděleny do pevnostních tříd. Obsah legur a mez kluzu některých tříd vyvinutých firmou International Nickel Ltd. (Inco) jsou zobrazeny v **tab. 2**. [25]

**Tab. 2** – Obsah legur (hm.%) a mez kluzu vybraných pevnostních tříd [25]

Název	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Rp <sub>0,2</sub> (MPa)
18Ni (200)	18	3,3	8,5	0,2	0,1	1400
18Ni (250)	18	5,0	8,5	0,4	0,1	1700
18Ni (300)	18	5,0	9,0	0,7	0,1	2000
18Ni (350)	18	4,2	12,5	1,6	0,1	2400
18Ni (Litá varianta)	17	4,6	10,0	0,3	0,1	1650

Martenzit se v těchto ocelích získá snadno díky vysokému obsahu niklu. Poté jediná transformace nastávající při běžných rychlostech ochlazování je tvorba martenzitu. Konečná mikrostruktura nízkouhlíkového martenzitu před vytvrzováním je relativně měkká, tažná a dobře obrobitelná, s hodnotou tvrdosti ca 30 HRC. Vysokých tvrdostí (ca 60 HRC) a pevností ( $R_m$  i  $R_{p0,2}$  až nad 2000 MPa) se dosahuje vytvrzováním. Během této fáze se metastabilní martenzit rozkládá. Nicméně precipitační vytvrzení za daných teplot probíhá mnohem rychleji než fázové přeměny na austenit a ferit. Vznikají tak intermetalické fáze  $Ni_3(Mo, Ti)$ , které ocel výrazně zpevňují. Množství legur potřebných pro dosažení těchto vlastností je veliké, proto jsou maraging oceli v porovnání s většinou ostatních konvenčních ocelí drahé. Nejdražší legurou je kobalt, proto byla a je snaha o redukci nutného množství jeho použití. Vnikly levnější tzv. Cobalt–Free maraging oceli s redukováným množstvím kobaltu. Avšak tyto oceli nedosahují takových pevností jako běžné maraging oceli ( $R_m$  do 2000 MPa). Obecně maraging oceli nabízejí vynikající houževnatost, dobrou odolnost proti deformaci a dobrou svařitelnost. Používají se pro aplikace vyžadující vynikající mechanické vlastnosti a vysokou spolehlivost. Využití nachází v automobilovém, leteckém a vojenském průmyslu a výrobě odolných nástrojů (např. zápustky). [25, 26]

### 3.2.1 Předmětná ocel

Vzorky zkoumané v praktické části práce byly vyrobeny metodou DMLS z materiálu maraging oceli s označením MS1. MS1 je kovový prášek speciálně vyvinutý pro výrobu spékáním práškového lože a svým složením odpovídá oceli 1.2709 (X3NiCoMoTi 18-9-5). Chemické složení testované oceli v porovnání se složením konvenční maraging oceli je zobrazeno v **tab. 3**. Charakteristiky a využití této oceli jsou obdobné jako u běžných maraging ocelí popsaných dříve. Součásti jsou po procesu 3D tisku dobře obrobitelné a vytvrditelné na více než 50 HRC. Vytvrzování probíhá při teplotě ca 490 °C po dobu 6 hodin. Disponují také vynikající svařitelností a leštitelností. Testované vzorky byly po primární fázi výroby – tzn. nebyly vytvrzeny z důvodu zjištění vlivu použité technologie včetně přirozeného povrchového reliéfu. Aplikováno bylo pouze rozpouštěcí žíhání: byl aplikován ohřev v ochranné atmosféře na austenitizační teplotu – výdrž na této teplotě byla 1 hodinu, poté následovalo prudké ochlazení pod 500 °C s následným dochlazením na vzduchu. [27]

**Tab. 3** – Chemické složení testované oceli v porovnání (hm.%) [27]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Ti	Al
<b>MS1</b>	≤ 0,03	≤ 0.1	≤ 0,1	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,5	4.5	17.0	8.5	0.6	0.05
							5.2	19.0	9.5	0.8	0.15
<b>1.2709</b>	≤ 0,03	≤ 0.1	≤ 0,15	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,25	4.5	17.0	8.5	0.8	-
							5.2	19.0	10	1.2	

## 4 Obdržený materiál, optický systém ARAMIS

Obdrženým materiálem je maraging ocel s označením MS1 (viz. kap. 3.2.1), vyrobena metodou DMLS. Tato nízkouhlíková ocel po procesu precipitačního vytvrzování dosahuje obrovských pevností. Avšak veškeré obdržené vzorky byly pouze po primární fázi výroby – tzn. nebyly vytvrzeny z důvodu zjištění vlivu použité technologie včetně přirozeného povrchového reliéfu (bez úpravy povrchu, pouze vyžeháno rozpouštěcím žiháním). Obdržené vzorky jsou dále představeny.

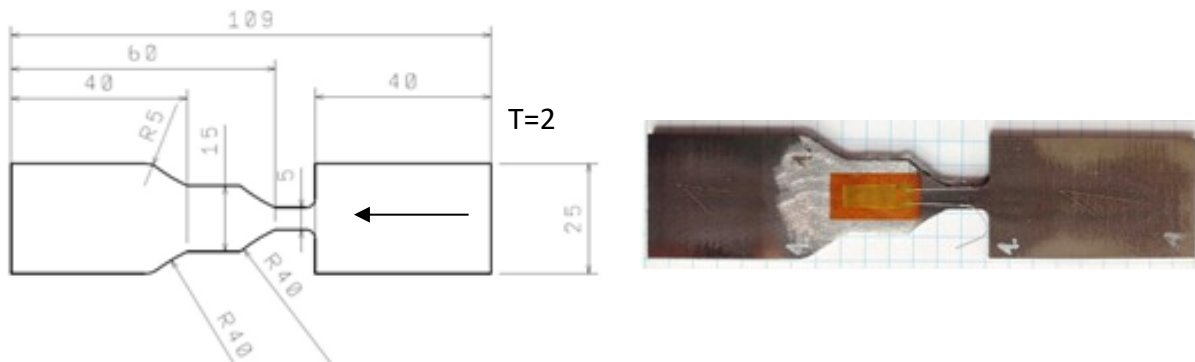
Stručně představen je také bezkontaktní, optický 3D měřicí systém pro měření deformací – optický systém ARAMIS společnosti GOM mbH. Tento systém byl využit pro snímání deformací při testování válcových vzorků.

### 4.1 Vzorky pro hodnocení

Obdržené vzorky byly primárně určeny pro testování tahovými zkouškami při různých rychlostech zatížení. Tyto rychlosti byly stanoveny při testování první sady plných, tvarově stejných vzorků ( $0,02 \text{ ms}^{-1}$  /  $5 \text{ ms}^{-1}$  /  $10 \text{ ms}^{-1}$ ). Další sada vzorků již obsahovala různé typy vzorků, kde jedny byly testovány při rychlosti zatížení  $0,02 \text{ ms}^{-1}$  a druhé při rychlosti  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

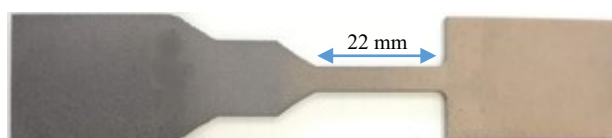
#### 4.1.1 Plné vzorky pro hodnocení dynamického zpevnění

Vzorky byly obdrženy ve dvou sadách. První sada vzorků prezentovala plnou tištěnou strukturu, tištěnou v jednom směru. Byly provedeny vstupní analýzy dynamické odezvy, a návrh a ověření tvaru vzorků, vč. rychlosti zatěžování. Definovaná geometrie vzorků je zobrazena na **obr. 15**, směr tisku je znázorněn šipkou. V pravé části je zobrazen vzorek před tahovou zkouškou.



**Obr. 15** – Geometrie vzorků, první sada [27]

Následující sada vzorků vycházela ze vstupní sady. Byl použit stejný typ vzorků s prodlouženou deformační délkou, viz. **obr. 16**. Vzorky byly vyříznuty z vytištěného plechu – byl posuzován možný vliv orientace tisku ( $0^\circ$  - 3ks,  $45^\circ$  - 3ks,  $90^\circ$  - 5ks) na dynamickou pevnost, resp. dynamické zpevnění. Rychlost zatížení byla  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Pro možnost porovnání byla na 2 plochých vzorcích o orientaci  $90^\circ$  provedena statická zkouška při rychlosti zatížení  $0,02 \text{ ms}^{-1}$ .



**Obr. 16** – Plochý vzorek, druhá sada

#### 4.1.2 Vzorky s pórovitou vnitřní strukturou

Druhá sada obsahovala různé typy vzorků, jejichž testování bylo zaměřeno na mechanickou odezvu materiálu s lehčenými vnitřními strukturami, a na vliv různé orientace směru tisku, resp. zatěžování na směr tisku. Při rychlosti zatížení  $0,02 \text{ ms}^{-1}$  (statické zkoušky) byly testovány různé válcové vzorky, duté a prezentující dva typy vnitřních struktur – gyroid a kubickou mřížku (BCC). V případě BCC vzorků byl zkoumán i vliv různé orientace tisku. Dále je uveden přehled testovaných válcových vzorků. [29]

##### Válcové vzorky

1. Duté, bez vnitřních struktur, ve variantách:

- S dutinou po celé deformační délce vzorku (tj. 62 mm, viz. **obr. 17**) ..3 ks (4-6)
- Se zkrácenou dutinou (pouze v délce 52 mm) .....3 ks (1-3)

2. Vzorky s vnitřními strukturami, ve variantách:

a) S gyroidní strukturou

- S dutinou po celé deformační délce vzorku .....3 ks (7-9)
- Se zkrácenou dutinou .....3 ks (10-12)

b) S BCC strukturou (orientace tisku  $90^\circ$ )

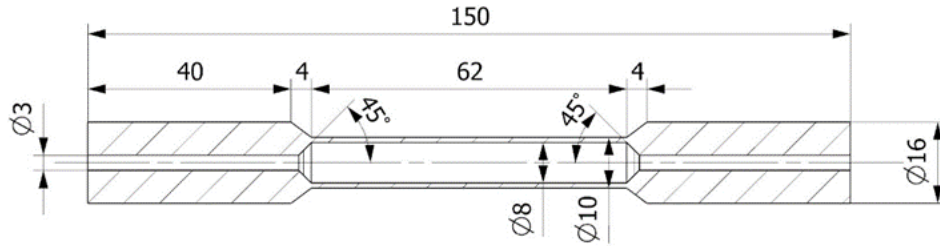
- S dutinou po celé deformační délce vzorku .....3 ks (16-18)
- Se zkrácenou dutinou .....3 ks (13-15)

c) S BCC strukturou (orientace tisku  $45^\circ$ )

- S dutinou po celé deformační délce vzorku .....5 ks (20-24)
- Se zkrácenou dutinou .....3 ks (19-21)

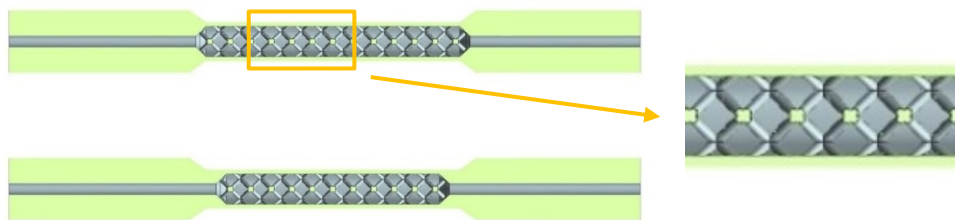


Válcové vzorky byly tedy v několika variantách, které se lišily vnitřním uspořádáním vzorků, vnější rozměry byly pro všechny shodné, viz. **obr. 17**.



**Obr. 17** – Geometrie válcových vzorků [33]

Na **obr. 18** jsou graficky znázorněny řezy vzorky s BCC strukturou s orientací tisku 90°. Horní obrázek zobrazuje vzorek s dutinou po celé deformační délce vzorku a spodní se zkrácenou dutinou. Vpravo je zobrazen detail na vnitřní uspořádání struktury. U BCC vzorků s orientací tisku 45°, bylo toto uspořádání poupraveno z důvodu vyrobitelnosti vzorku pod daným úhlem. [33]



**Obr. 18** – Vnitřní uspořádání BCC (90°) [33]

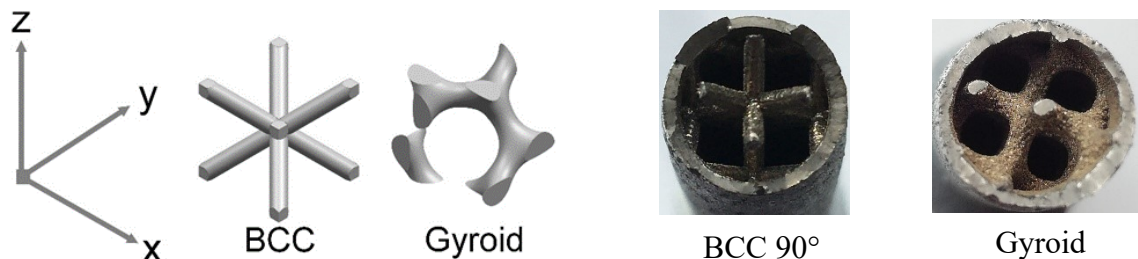
**Obr. 19** graficky znázorňuje řez vzorkem s gyroidní strukturou (nahore) a ve spodní části reálný vzorek před zkouškou. Reálný vzorek je opatřen stochastickým nástřikem, který je pro využití systému ARAMIS nezbytný.



**Obr. 19** – Vnitřní uspořádání gyroidu a reálný vzorek před zkouškou [33]

### 4.1.3 Použité vnitřní struktury

V předmětných vzorcích byly použity 2 typy vnitřních struktur – gyroidní struktura a kubická mřížka (BCC). Tyto struktury vedou k cílenému odlehčování nebo vyztužování součástí. Principem je rozkopírování základní buňky v prostoru, což vede ke vzniku rozsáhlých struktur. Základní buňky jsou znázorněny na **obr. 20** vlevo, vpravo jsou zobrazeny pohledy do vnitřních prostor přetržených válcových vzorků. Délka hrany základní buňky je u všech vzorků 5 mm, dalším ukazatelem je objemový podíl hmoty v základní buňce, který je 13,5 % (tzn., že je prostor buňky vyplněn hmotou ze 13,5 %). [29, 33]



**Obr. 20** – Vnitřní struktury válcových vzorků [33]

**BCC buňka** představuje základ jedné z nejpoužívanějších vnitřních struktur pro výrobu pomocí AM. Jedná se o jednoduchý geometrický útvar, který může být různě vyztužován přidáním různých vzpěr. Z tvaru buňky této základní verze vyplývá předpoklad stejné tuhosti ve 3 navzájem kolmých směrech x, y, z. Naproti tomu **gyroidní buňka** představuje matematicky popsaný, složitý prostorový útvar, který se řadí mezi tzv. minimální povrchy. Navzdory vzhledu základní buňky, vykazuje gyroid, obdobně jako BCC buňka, téměř stejné tuhosti v navzájem kolmých směrech x, y, z. Tužší variantou této struktury je struktura D - gyroid (double gyroid). Důležitou informací je také to, že zmíněné varianty buněk nepotřebují k AM výrobě žádné podpurné struktury, což je v aplikaci pro vnitřní struktury vhodné. [30]

## 4.2 Použití optického systému ARAMIS

Bezkontaktní optický systém ARAMIS GOM 4M byl využit při testování válcových vzorků k průběžnému zachycení heterogenního rozvoje povrchových deformací, resp. napjatosti.

Ve verzi 4M je systém vybaven senzorem se dvěma kamerami a světelnou jednotkou, který je umístěn na stativu. Senzor je řízen pomocí velmi výkonného počítačového systému,

který je umístěn v pojízdném boxu – s celým systémem lze tedy poměrně jednoduše manipulovat. Princip funkce je takový, že ARAMIS pomocí senzoru pořizuje časově odstupňované snímky snímaného objektu (první snímek je bez deformace a následující jsou již pořizovány po nebo v průběhu deformování objektu). Systém dokáže rozeznat na digitálním obraze z kamer povrchovou strukturu, které přiřadí souřadnice, resp. přiřadí souřadnice pixelům snímků. Následně systém porovnává po sobě jdoucí digitální záznamy a propočítává posuv a vznikající deformace. Pokud povrch vzorku nevykazuje dostatečně zachytitelnou povrchovou strukturu, musí být objekt opatřen vhodným barevným vzorkem, např. již zmiňovaným stochastickým nástříkem barvy. Snímání může být prováděno při statickém i dynamickém zatížení. [28]

Před každým měřením musí být systém zkalibrován na míru měřenému objektu. S daným senzorem lze totiž měřit malé i velké objekty (od 1 mm do 2000 mm) při deformacích od 0,01% až do několika stovek procent. To znamená, že snímací jednotka musí být pomocí stativu umístěna vhodně tak, aby snímala požadovaný měřený objem na objektu. Poté se provede pořízení veškerých snímků. Výpočet projektu je závislý na definování sledované oblasti (tzv. výpočetní masky), kterou uživatel v programu definuje, a zadání tzv. počátečního bodu. Při výpočtu, sleduje systém deformace objektu na snímcích pomocí tzv. fazet (kvadratické nebo pravoúhlé výřezy snímků – např. 15x15 pixelu). Velikost fazet v pixelech lze nastavit softwarově. Systém kombinuje snímky z obou kamer senzoru a pomocí fotogrammetrické metody určuje 3D souřadnici jednotlivých fazet → výsledek měření je k dispozici jako 3D náhled. Program také disponuje možností tvorby reportů a exportu naměřených dat. Skutečný vzhled některých možných výstupů z programu je uveden na obrázcích v kapitole 6. [28]

Dále jsou uvedeny kroky při provádění obvyklého měření [28]:

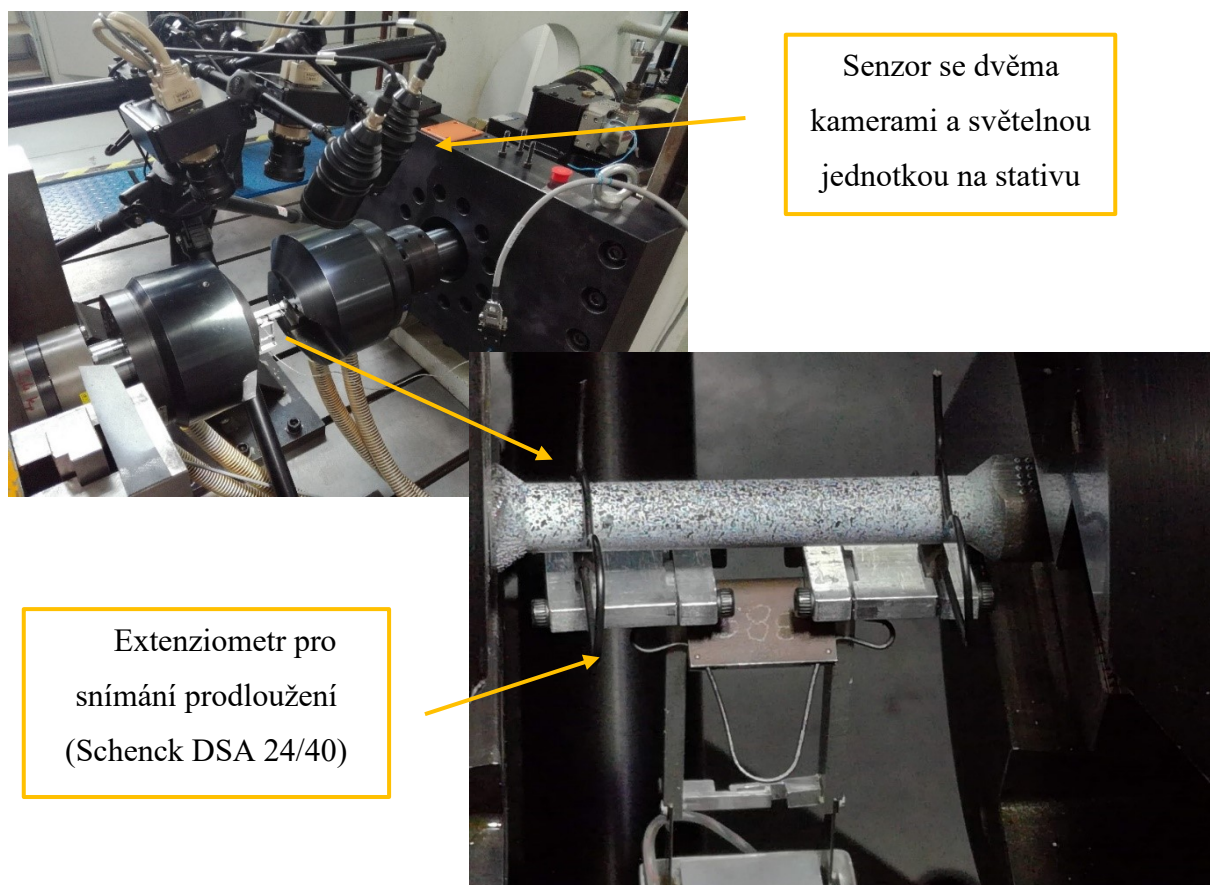
- Stanovení velikosti potřebného měřeného objemu a příprava vzorku (nanesení vzoru)
- Kalibrace měřícího objemu
- Vytvoření nového měření (projektu) v softwaru a definování potřebných parametrů (fazety ...)
- Nastavení režimu pořizování snímků a poté samotné měření
- Definování výpočetní masky a počátečního bodu
- Výpočet projektu
- Transformace projektu do vhodného souřadnicového systému a volba zobrazení výsledků
- Následné zpracování dat

V případě válcových vzorků bylo vhodným zobrazením výsledků tzv. technické prodloužení v ose x [%]. Toto zobrazení vhodně znázorňuje rozložení deformací na povrchu vzorku, příklad zobrazení je uveden na obrázcích v kapitole 6. V uživatelské příručce ARAMIS je technické prodloužení pro jednodimenzionální případ definováno následujícími vztahy:

$$\varepsilon^T = f(\lambda) = \lambda - 1 \quad (1)$$

$$\text{kde: } \lambda = \lim_{l \rightarrow 0} \left( \frac{l + \Delta l}{l} \right) \quad (2)$$

$\lambda$  představuje tzv. míru deformace (rozpínání) lineárního prvku, jedná se o relativní změnu prodloužení infinitesimálního lineárního prvku. Pro dvoudimenzionální případ se poté vychází z tenzoru gradientu deformace, resp. tenzoru rozpínání. [28]



**Obr. 21** – Sestava (uspořádání) statických tahových zkoušek

**Obr. 21** zobrazuje uspořádání statické tahové zkoušky válcových vzorků. V horní části obrázku je zobrazeno umístění snímacího senzoru ARAMIS, pro řízení průběhu zkoušky bylo využito systému Inova TestControl. Spodní část obrázku zobrazuje upnutí válcového vzorku se stochastickým nástřikem, použit byl i extenziometr pro snímání podélného prodloužení vzorku.

## 5 Materiálové analýzy

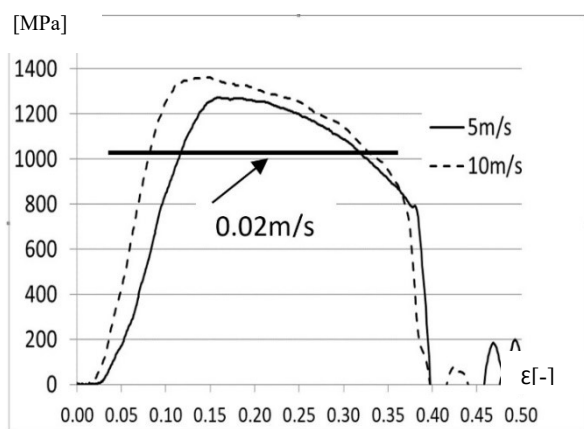
### 5.1 Zkoušky dynamického zpevnění

Na tomto typu vzorků (viz. *obr. 15*) byly prováděny tahové zkoušky při třech rychlostech zatěžování ( $0,02 \text{ ms}^{-1}$ /  $5 \text{ ms}^{-1}$ /  $10 \text{ ms}^{-1}$  – od každého 3 vzorky). Získané výstupy slouží pro optimalizaci návrhu konkrétních konstrukčních dílů. Statické tahové zkoušky u nevytvrzených vzorků nabývají typicky meze pevnosti v tahu  $1100 \text{ MPa}$  a meze kluzu kolem  $1000 \text{ MPa}$ , což se z výsledků potvrdilo. V případě dynamických tahových zkoušek se výrazně projevilo dynamické zpevnění materiálu. Při rychlosti zatěžování  $5 \text{ ms}^{-1}$  byl oproti statickým zkouškám zaznamenán téměř  $25 \%$  nárůst meze pevnosti v tahu, v případě rychlosti zatěžování  $10 \text{ ms}^{-1}$  byl tento nárůst až  $38 \%$  - *Graf 1*. Ve všech případech byl zachován tvárný mód lomu, který byl potvrzen fraktografickou analýzou.

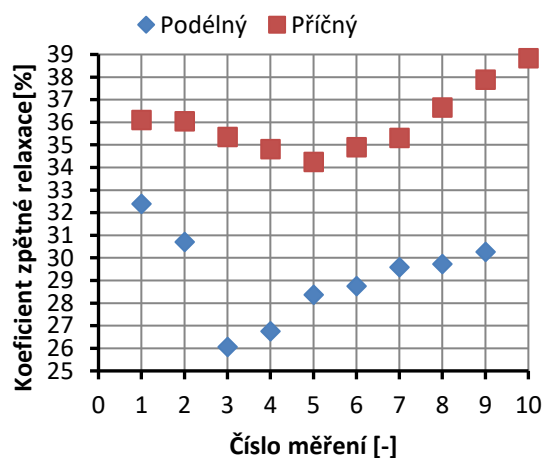
Jedním z možných negativních vlivů předmětné oceli je anizotropie mechanických vlastností vznikající vlivem výrobní aditivní metody. Pro porovnání anizotropie vzorků bylo využito válcové indentační metody ( $\varnothing 0,5 \text{ mm}$ ) v podélném a příčném směru. Hodnocen byl koeficient zpětné relaxace (3), který je měřítkem zbytkové plastické kapacity materiálu – *Graf 2*. Dále na základě hypotézy o chování materiálu při vtlačování válcového indentoru (Hencky) byla stanovena tzv. srovnávací mez kluzu (CYS) [ $\text{N/mm}^2$ ] v obou rovinách. Průměrná hodnota koeficientu zpětné relaxace byla pro příčný řez  $36 \%$  a pro podélný  $29 \%$ . Rozdíl průměrné hodnoty CYS byl ca  $250 \text{ MPa}$  ( $2350 \text{ MPa}$  pro příčný a  $2100 \text{ MPa}$  pro podélný). [27]

$$\eta = (W_{elast}/W_{total}) \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

kde  $W_{elast}$  je elastický podíl spotřebované energie při vtlačování indentoru a  $W_{total}$  celkový.



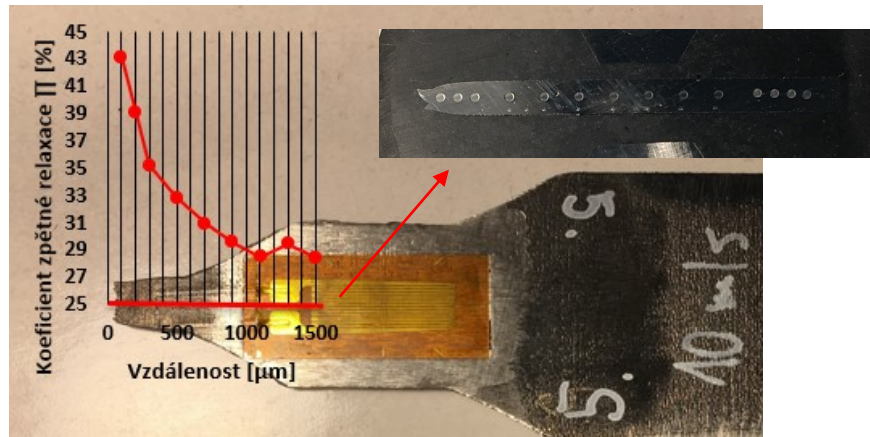
*Graf 1* – Dynamické zpevnění první sada [27]



*Graf 2* – Koeficient zpětné relaxace obou řezů

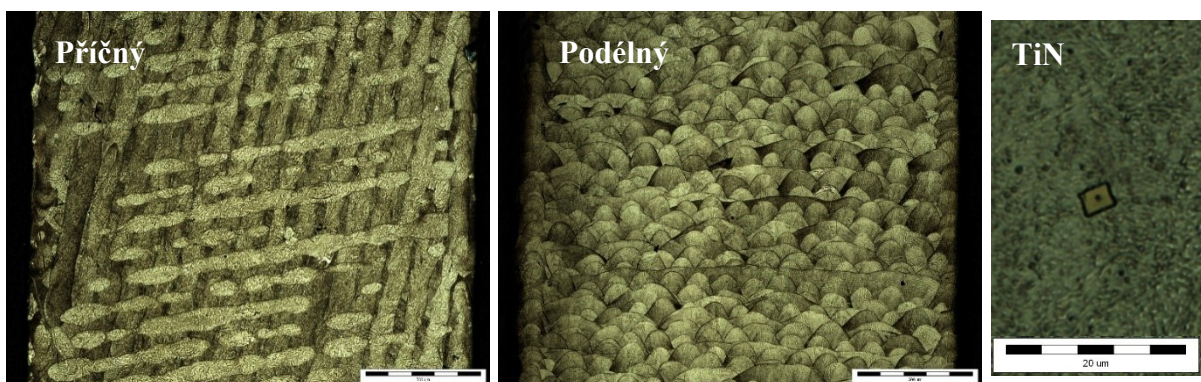


**Graf 2** slouží pouze pro znázornění hodnot koeficientu zpětné relaxace, který byl měřen na deformaci neovlivněných výbrusech. Znázorněné hodnoty tedy nelze chápat jako postupnou linii hodnot, slouží pouze pro znázornění zřejmého rozdílu mezi testovanými řezy. Z výsledků je patrná vyšší pevnost příčného výbrusu, tedy vyšší pevnost ve směru tisku. Měření linie hodnot bylo využito pro zachycení dosahu dynamického zpevnění u podélného výbrusu. Dosah zpevnění je zřejmý z **obr. 22**, kde koeficient zpětné relaxace výrazně roste směrem k místu lomu.



**Obr. 22** – Dosah dynamického zpevnění (zatížení 10 m/s)

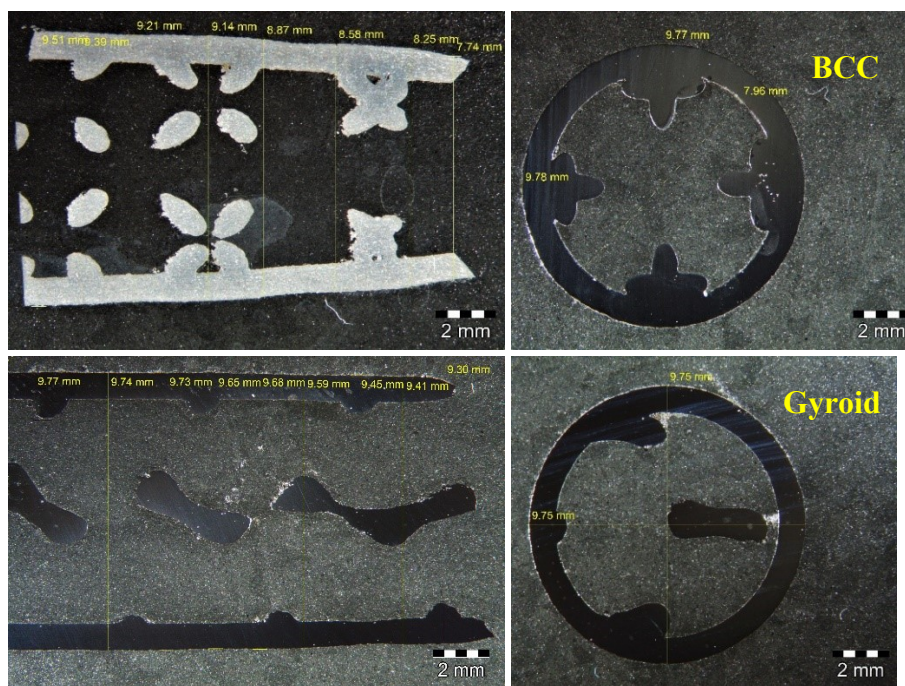
Zmíněná anizotropie může být redukována i zcela odstraněna pomocí vhodně zvoleného tepelného zpracování. Rozdíl u předmětných vzorků je patrný i na naleptaných plochách výbrusů, které jsou znázorněny na **obr. 23**. V levé části je zobrazen příčný výbrus a v pravé části výbrus podélný, z obrázku je patrný vliv výrobní metody a tvorby vrstvy po vrstvě. Při zkoumání mikrostruktury byly objeveny mikronečistoty ve formě TiN (TiCN), které v pozorovaném rozsahu u hodnocených vzorků, neměly významný vliv na lomové chování materiálu.



**Obr. 23** – Příčný (vlevo), podélný výbrus vzorku první sady + nitrid

## 5.2 Válcové vzorky s různou vnitřní geometrií

Válcové vzorky byly podrobeny statickým tahovým zkouškám. Následující část je zaměřena na metalografické a fraktografické hodnocení vzorků. *Další hodnocení průběhu a výsledků samotných zkoušek je uvedeno v následujících kapitolách a příloze.* V rámci **metalografického hodnocení** byly provedeny výbrusy vzorků v podélném a příčném směru, viz. *obr. 24*.

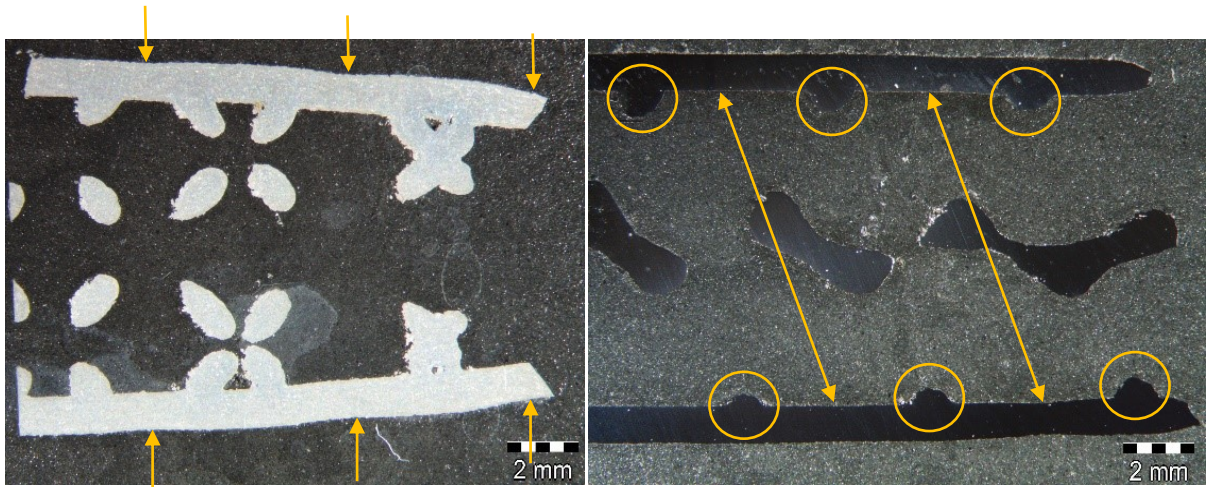


*Obr. 24* – Metalografické výbrusy válcových vzorků

Levá část *obr. 24* zobrazuje podélné výbrusy o délce ca 15 mm od místa lomu, pravá část zobrazuje výbrusy příčné – ty byly provedeny ve větší vzdálenosti od místa lomu, aby nebyly příliš ovlivněny deformací. V horní části je vzorek s vnitřní BCC strukturou a v dolní části s vnitřní gyroidní strukturou. Zkoumání samotných vnitřních struktur a zvolení místa pro zhotovení výbrusu je, z důvodu “neviditelnosti“ do vnitřních prostor vzorků, velmi složité. Z provedeného optického měření vzdálenosti je zřejmé postupné zaškrvcování vzorků směrem k místu lomu. V případě BCC se vnější průměr postupně změnil z 9,51 mm na 7,74 mm a vnitřní průměr z 7,53 mm na 5,81 mm. U gyroidního vzorku nebyla v tomto případě změna tak markantní – změna vnějšího průměru z 9,77 mm na 9,30 mm a vnitřního průměru z 7,89 mm na 7,60 mm. Za povšimnutí stojí i naměřené průměry na příčných výbrusech u obou vzorků ca 9,75 mm. Z tohoto rozměru je patrné, že kontrakce se ve střední části (krčku) vzorku projevila i dále od místa lomu. Deformace vnitřních struktur směrem k místu lomu je z podélných výbrusů zřejmá.



Z podélných výbrusů je také zřejmý vliv vnitřní struktury na průběh zaškrcování vzorků, což je znázorněno na **obr. 25**. Vícenásobné zaškrcování bylo zachyceno systémem ARAMIS a je popsáno v kapitole 6, důvodem je zde zřejmé uspořádání vnitřních struktur. V levé části obrázku je patrná větší míra deformace v místech, kde není obálka vzorku spojena s vnitřní BCC strukturou, zaškrcování je viditelné okem (žluté šipky). V pravé části (gyroid) není zaškrcování příliš patrné, nicméně je zde zřejmá souvislost se zaznamenanými nerovnoměrnými povrchovými deformacemi na **obr. 36**. Větší deformace se projevily opět v místech, kde není obálka spojena s vnitřní geometrií – tato místa zde nejsou kolmá jako u BCC vzorku, ale svírají k příčné rovině úhel ca 30° (znázorněno šipkami).

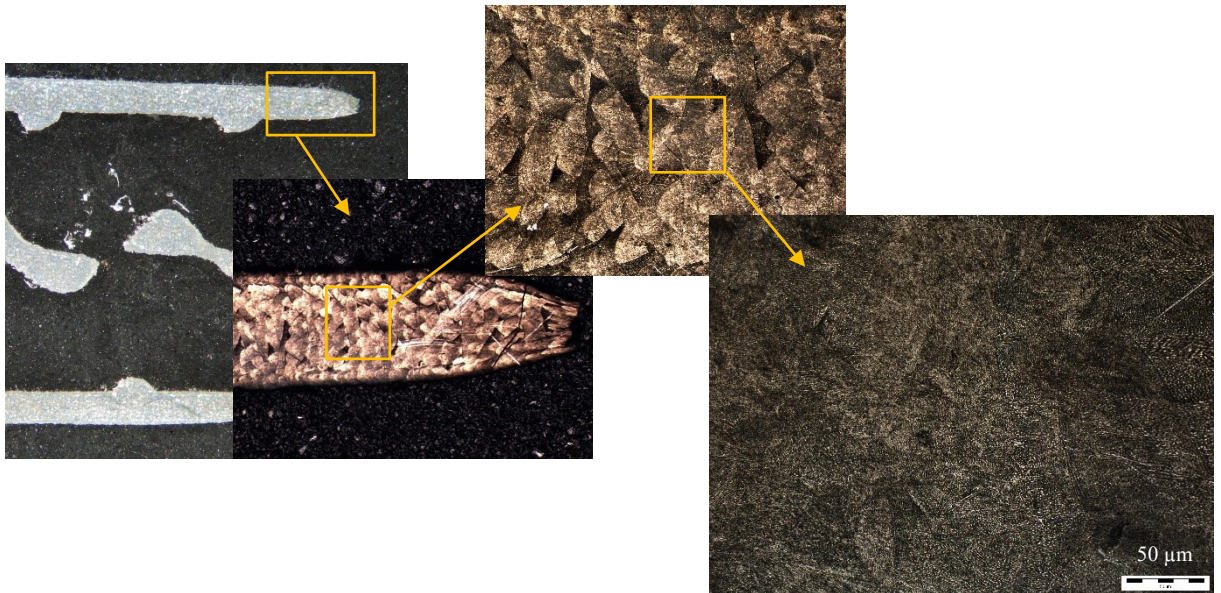


**Obr. 25** – Podélné výbrusy: vliv vnitřní struktury na deformaci

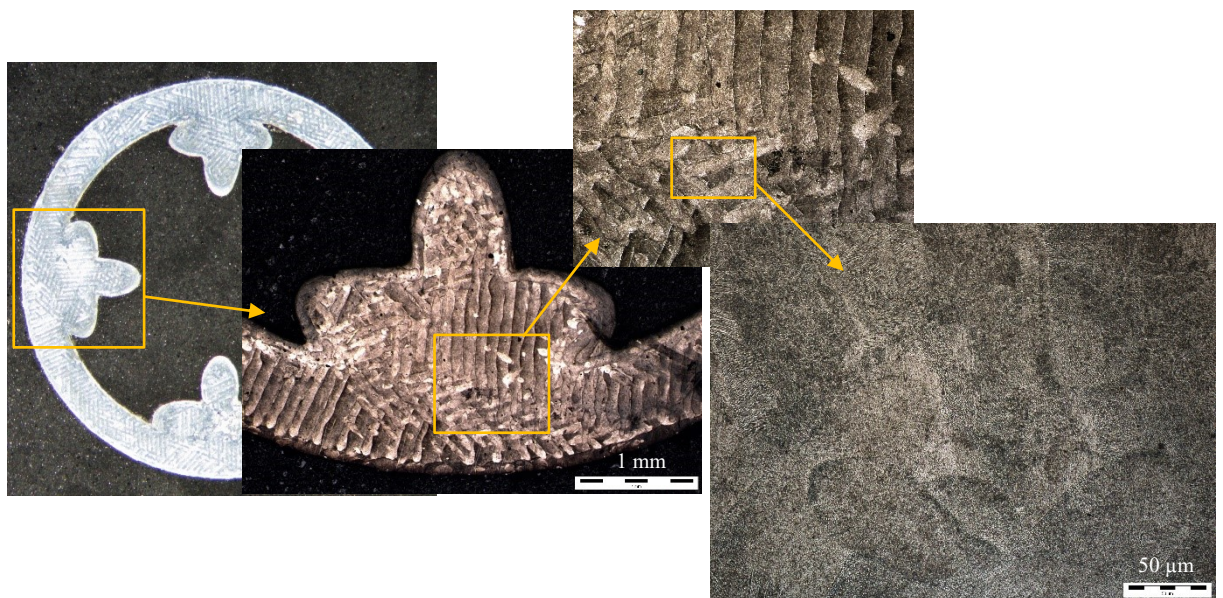
Po naleptání výbrusů pomocí leptadla Nital byla zkoumána mikrostruktura vzorků. Obdobně jako u vzorků z první sady, byl zřejmý vliv výrobní metody na vzhled struktur v obou vzájemně kolmých výbrusech. Kvalita výsledného dílu vyrobeného metodou DMLS záleží zejména na kvalitě vstupního prášku, tzn.: velikosti částic, jejich morfologii, chemickém složení. Špatnou vstupní surovinou může docházet např. ke vzniku vnitřní porozity, přítomnosti vměstků nebo ke změně chemického složení. Z tohoto důvodu byla zkontrolována přítomnost nedokonalostí ve struktuře. Mikroskopickým pozorováním nebyly odhaleny žádné vady samotného výrobního procesu ani vstupní suroviny – vměstky, pórovitost, nebo nedokonalé propojení jednotlivých vrstev nebylo zaznamenáno. V této fázi zpracování má ocel velmi jemnou buněčnou mikrostrukturu, v daném rozlišení bez pozorovatelné martenzitické morfologie – viz. **obr. 26** a **27**.



Mikrostruktura v různém měřítku je zobrazena na následujících obrázcích, postupným přiblížením je patrná velmi jemná struktura materiálu v obou výbrusech. Typická martenzitická morfologie nebyla při daných rozlišeních pozorována. Mikrostruktura podélného výbrusu vzorku s gyroidní strukturou je zobrazena na *obr. 26*, *obr. 27* poté zobrazuje mikrostrukturu příčného výbrusu vzorku s BCC strukturou.

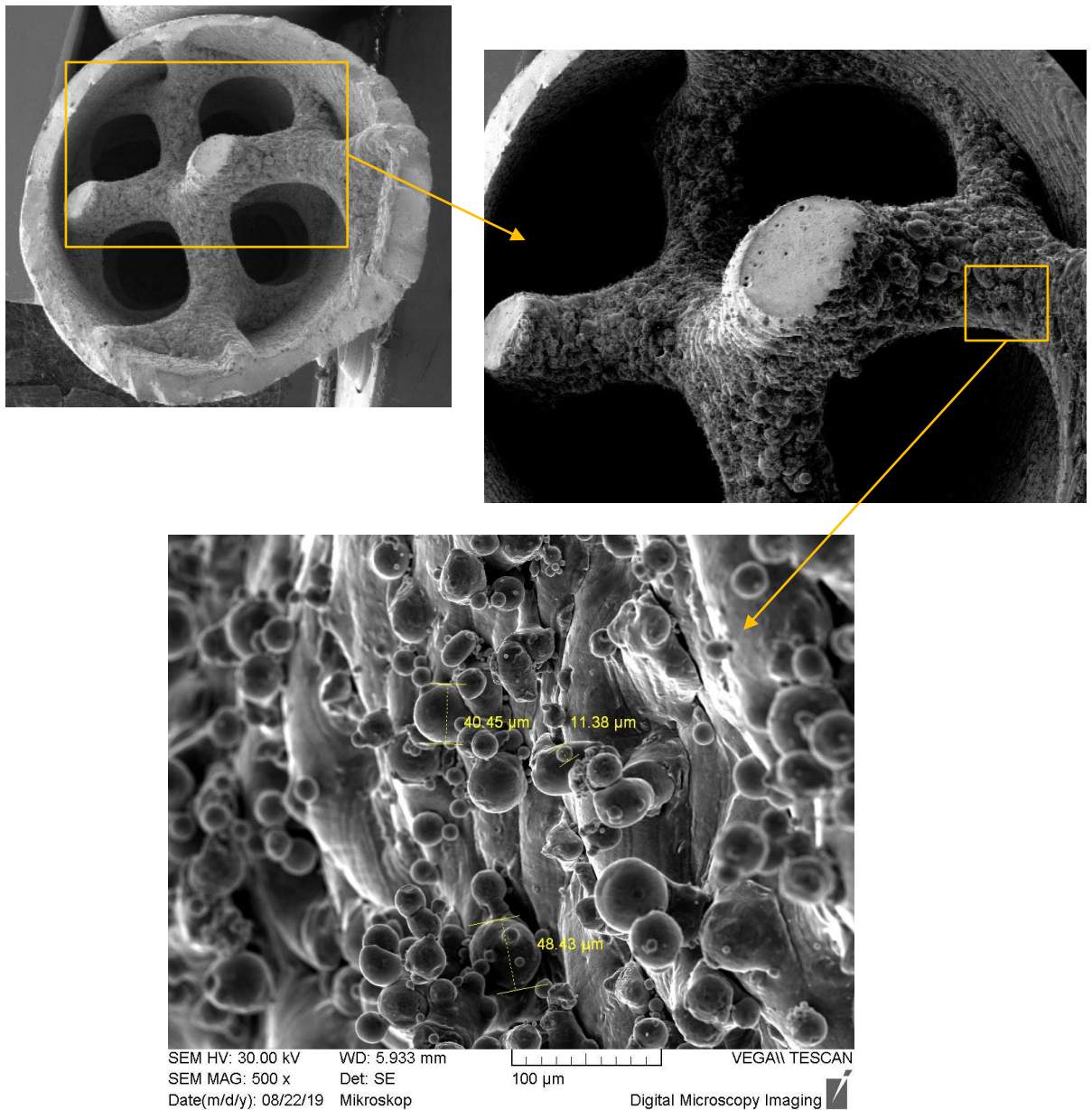


*Obr. 26* – Mikrostruktura podélného výbrusu (gyroid)



*Obr. 27* – Mikrostruktura příčného výbrusu (BCC)

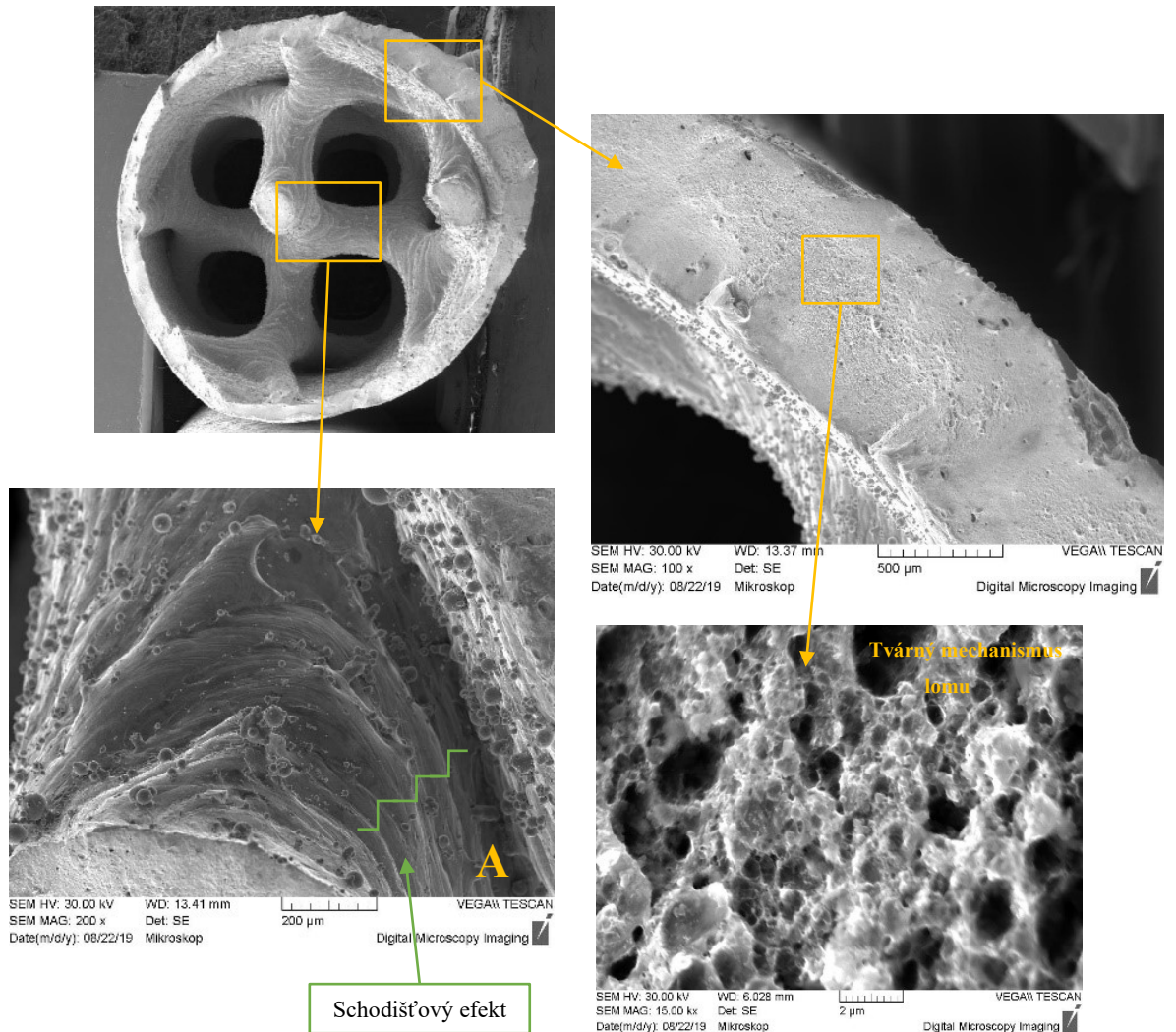
V rámci **fraktografických analýz** byl zkoumán referenční vzorek s gyroidní strukturou. Bylo využito rastrovacího elektronového mikroskopu TESCAN VEGA 5130SB. Hodnocen byl stav vnitřního povrchu tištěné struktury a mechanismus lomu. Z následujících obrázků je patrný rozdíl kvality vnitřního povrchu v závislosti na směru pohledu, resp. vliv nanášení vrstev shora. **Obr. 28** zobrazuje spodní pohled na vnitřní strukturu. Je patrné velké množství prášku ulpívajícího na vnějším povrchu struktury – typická velikost je uvedena ve spodní části obrázku. Na tento jev je odkazováno i v kapitole 7.1 při hodnocení statické pevnosti vzorků BCC 45°.



**Obr. 28** – Fraktografie: Spodní pohled na vnitřní strukturu (gyroid)



Na **obr. 29** je zobrazen pohled shora, z detailu A je patrný rozdíl oproti předchozímu pohledu, tj. mnohem menší počet částic na povrchu. Znatelný je zde také tzv. schodišťový efekt, který je spojený s daným způsobem výroby (přidávání vrstev materiálu). Množství ulpívajícího prášku na vnitřním povrchu nevedlo ke změně mechanismu lomu – v hodnocených oblastech, byl zaznamenán výhradně tvárný lom.



**Obr. 29** – Fraktografie: Pohled shora na vnitřní strukturu, lomová plocha (gyroid)

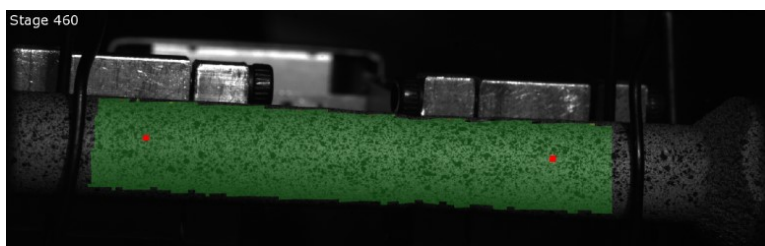
## 6 Metodika pro hodnocení nerovnoměrné deformace, resp. heterogenního rozvoje plasticity

Válcové vzorky s vnitřními strukturami při tahových zkouškách vícenásobně zaškrcovaly. Toto vícenásobné zaškrcování se v jisté části zatěžování začalo výrazněji projevovat v blízkosti místa lomu vzorku. Zaškrcování bylo na porušených vzorcích viditelné okem, a je zřejmé, že došlo k heterogennímu rozvoji plasticity. To potvrzuje i nerovnoměrnost povrchových deformací, které stejně jako místa zaškrcování, závisí na geometrii vnitřních struktur. Projev zaškrcování a nerovnoměrnosti povrchových deformací se u jednotlivých typů struktur (BCC x Gyroid) liší. Zmíněný efekt významně ovlivňuje stav napjatosti a deformace v místě finálního lomu, i celkovou deformaci do lomu, tj. de facto zkresluje standardní záznam tahové zkoušky. Navržen byl proto postup hodnocení deformační odezvy pomocí optického systému ARAMIS. V softwaru ARAMIS a MS Excel byla vypracována metodika pro hodnocení předmětných válcových vzorků. Metodika je dále představena na dvou referenčních vzorcích BCC 90° a gyroid.

### 6.1 Vzorky s BCC strukturou (BCC 90°)

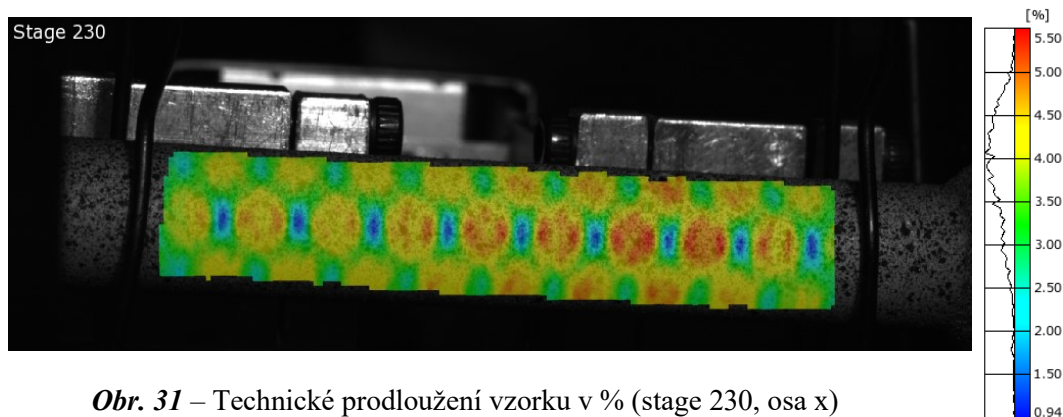
Vzorky s touto vnitřní strukturou vykazovaly výrazně nerovnoměrné deformace. Nerovnoměrnost deformací byla zjevná z vícenásobného zaškrcování okolo místa lomu a z povrchových posuvů vyhodnocených měřícím systémem ARAMIS. Dále jsou představeny výstupy z tohoto systému (pozn. veškeré obrázky jsou pořízeny levou kamerou 3D senzoru).

Na *obr. 30* je zobrazen upnutý vzorek s naneseným stochastickým černobílým vzorem, v pozadí je také vidět extenziometr použitý pro snímání deformace. Zeleně zvýrazněná oblast je tzv. výpočetní maska, což je oblast, kde je prováděn výpočet posunutí. Červeně vyznačené body jsou počáteční body, jejichž určení je pro provedení výpočtu nezbytné. Snímek je pořízen ve stage 460, což znamená v čase 46 sekund od počátku měření a ca 0,2 vteřiny před lomem vzorku.



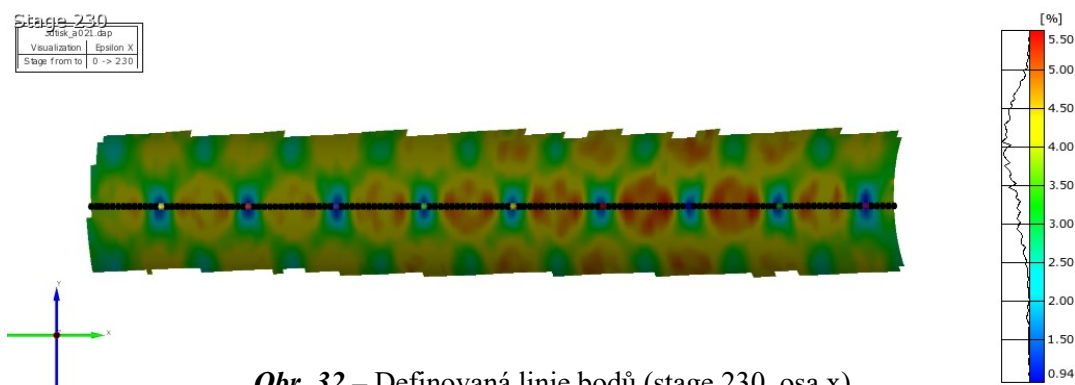
*Obr. 30* – Výpočetní maska s počátečními body (BCC 90°)

Na **obr. 31** je vidět již provedený výpočet pro stage 230, tzn. v čase 23 sekund od počátku měření. Znázorněno je zde tzv. technické prodloužení v % v ose x. Toto zobrazení vhodně znázorňuje rozložení deformací na povrchu vzorku, patrný je vliv vnitřní struktury na deformaci. Stage 230 je zde znázorněna proto, že přibližně v tomto čase dochází k výraznějším projevům deformací právě v okolí místa lomu (červené oblasti).



**Obr. 31** – Technické prodloužení vzorku v % (stage 230, osa x)

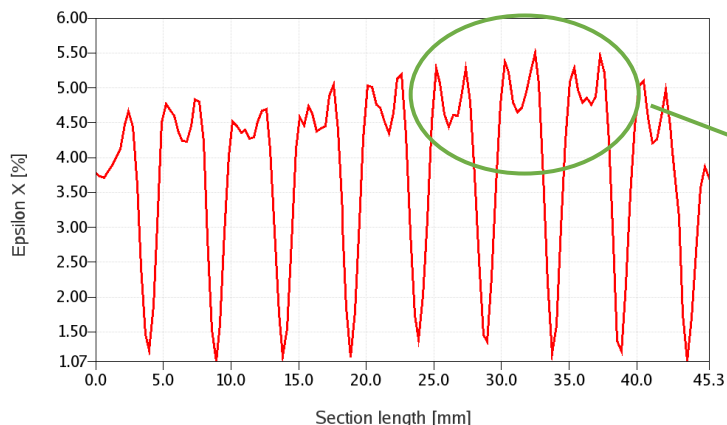
Pro reprodukovatelnost zachycení a vyjádření deformací po délce hodnocené oblasti, bylo nutné definovat vztažnou linii bodů (řez) v ose měřeného vzorku. Počet bodů v linii je omezen počtem prvků (fazet), ze kterých je sestavena výpočetní maska. Linie bodů je znázorněna na **obr. 32**, kde jsou také zvýrazněny body v lokálních minimech deformací a okrajích výpočetní masky. Tyto body byly využity pro hodnocení, které bude popsáno dále.



**Obr. 32** – Definovaná linie bodů (stage 230, osa x)

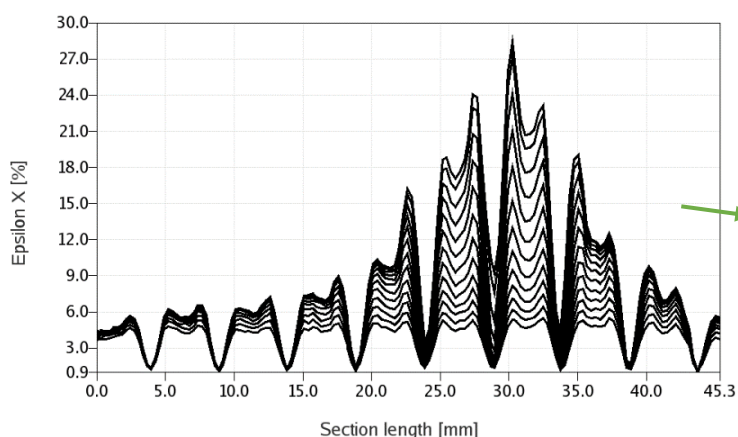
S využitím dané linie bodů je možné vytvořit graf, který zobrazuje technické prodloužení v % (Epsilon X) po délce linie – tzv. Multi-Section diagram. **Graf 3** znázorňuje tuto závislost pro stage 230 – z grafu je patrné, že se deformace začíná lokalizovat v oblasti lomu, kde postupně začne zaškrcovat (zeleně vyznačená oblast). Toto prodloužení lze vyjádřit pro různé vhodně odstupňované časové okamžiky (Stage) v Multi-Stage-Section diagramu. **Graf 4** zobrazuje časově odstupňované křivky od stage 230 do stage 460.

Stage 230



Oblast lomu a vícenásobného zaškrcování. Označené špičky povrchových deformací začínají převládat nad okolními.

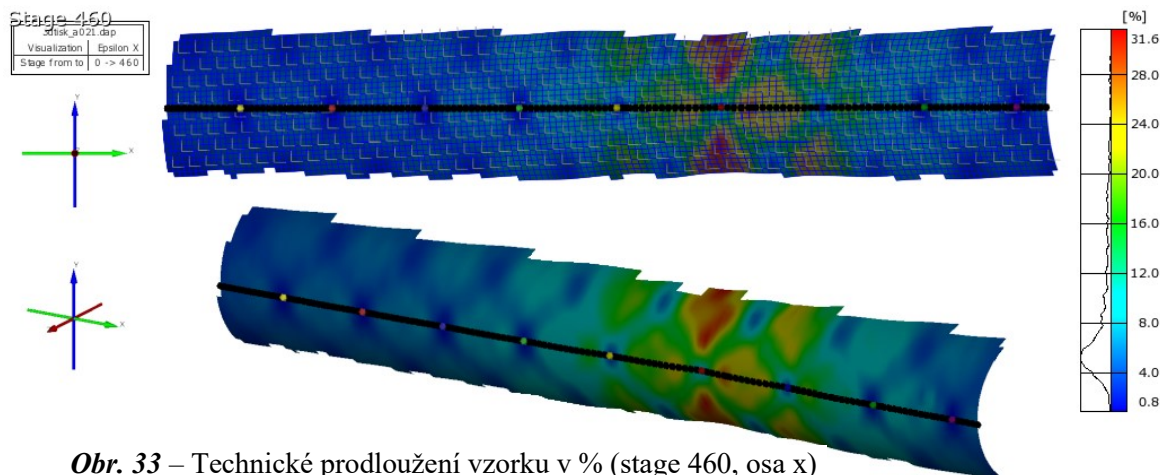
**Graf 3** – Multi-Section diagram pro stage 230



Na **grafu 4** je znázorněn vývoj povrchových deformací v čase. Spodní křivka znázorňuje stage 230 (čas 23 s) a vrchní křivka stage 460 (čas 46 s), tzn. těsně před porušením vzorku. Z grafu je patrný vývoj a lokalizace deformací v časovém průběhu zatěžování.

**Graf 4** – Multi-Stage-Section diagram (stage 230-460)

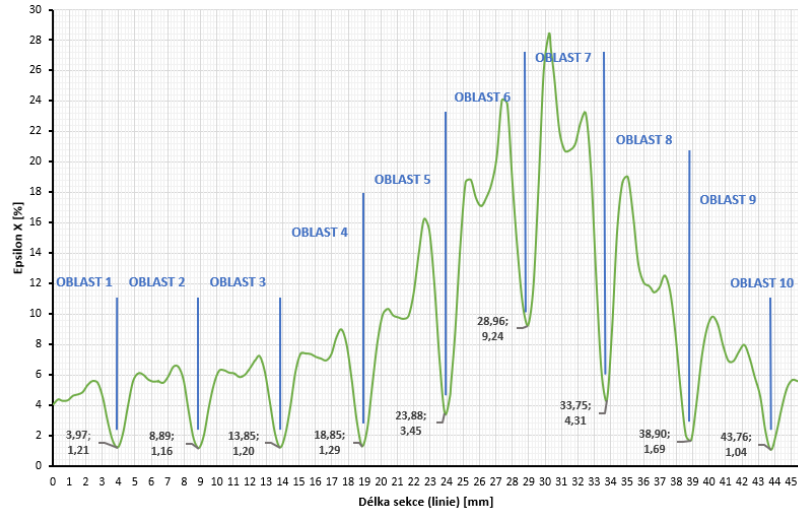
Technické prodloužení odpovídající stage 460 je zobrazeno na **obr. 33**. Jedná se o povrchové deformace těsně před porušením vzorku (ca 0,2 s před porušením). Ve vrchní části obrázku je vidět síť fazet (prvků) s lokálními souřadnými systémy, které jsou orientovány rovnoběžně s linií řezu (ve směru osy x). Spodní část obrázku znázorňuje natočení plochy výsledků, oblast vzniku lomu je zřejmá – při bližším pohledu lze vidět zaškrcování vzorku, které se projevuje mírným zakřivením zobrazené linie bodů.



**Obr. 33** – Technické prodloužení vzorku v % (stage 460, osa x)

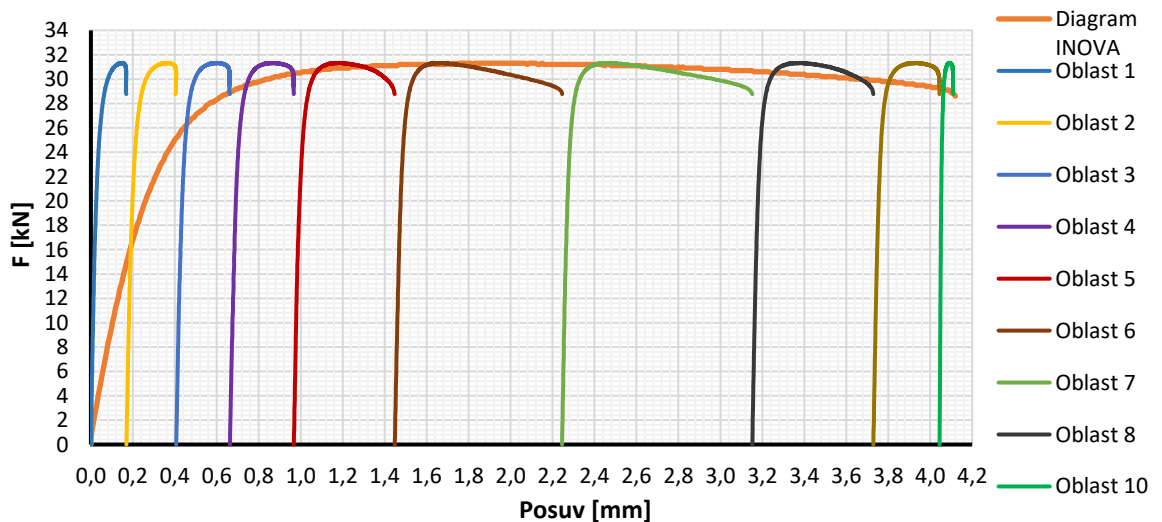


Pro další hodnocení byl Multi-Section diagram pro stage 460 rozdělen do 10 oblastí, což je zobrazeno na **grafu 5**. Oblasti jsou ohraničeny lokálními minimy technického prodloužení - tyto minima jsou na předešlých obrázcích (obr. 32 a 33) vyznačeny barevnými body na linii řezu, krajní body jsou dány okrajem výpočetní masky.



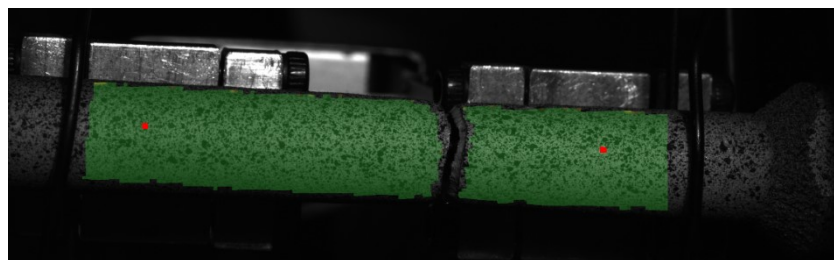
**Graf 5** – Multi-Section diagram pro stage 460, rozdělen na oblasti

Systém ARAMIS umí obdobně jako technické prodloužení, znázornit posuv jednotlivých bodů. Toto grafické znázornění má ale význam pouze pro odečet prodloužení celé výpočetní oblasti. Proto byly zvoleny dané oblasti (v grafu 5) a v programu Excel vypočítáno prodloužení těchto jednotlivých oblastí. Při znalosti zatěžovací síly v čase bylo možné vykreslit tahové digramy pro zvolené oblasti – viz. **graf 6**. Velikost prodloužení jednotlivých oblastí je z grafu zřejmá. V grafu je také znázorněn tahový diagram ze zařízení INOVA, na kterém byl vzorek testován. Kumulované prodloužení vypočítané v programu Excel, prodloužení z použitého extenziometru, a prodloužení odečtené z grafického znázornění ARAMIS, se liší až v řádu setin milimetru.



**Graf 6** – Tahové diagramy, oblasti + INOVA, kumulace prodloužení

**Obr. 34** zobrazuje již přetržený vzorek. Zelená výpočetní maska zůstává zachována na obou oddělených oblastech, to je z důvodu určení 2 červených počátečních bodů výpočtu.

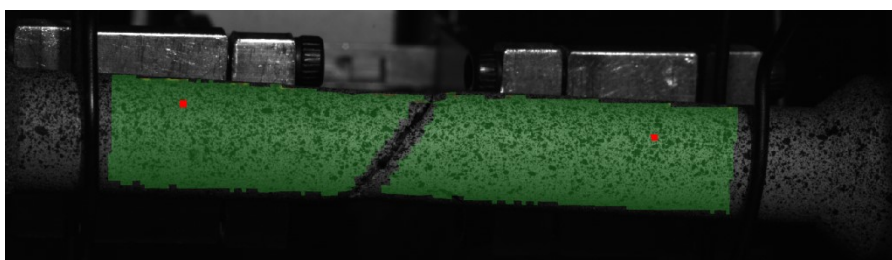


**Obr. 34** – Aramis, přetržený vzorek 15

## 6.2 Vzorky s gyroidní strukturou

I vzorky s touto vnitřní strukturou, obdobně jako BCC vzorky, vykazovaly nerovnoměrné deformace. Nerovnoměrnost deformací byla zjevná z vícenásobného zaškrcování okolo místa lomu a z povrchových posuvů vyhodnocených měřícím systémem ARAMIS. Hodnocení bylo provedeno analogicky jako v předchozím případě, veškeré obrázky jsou pořízeny levou kamerou 3D senzoru.

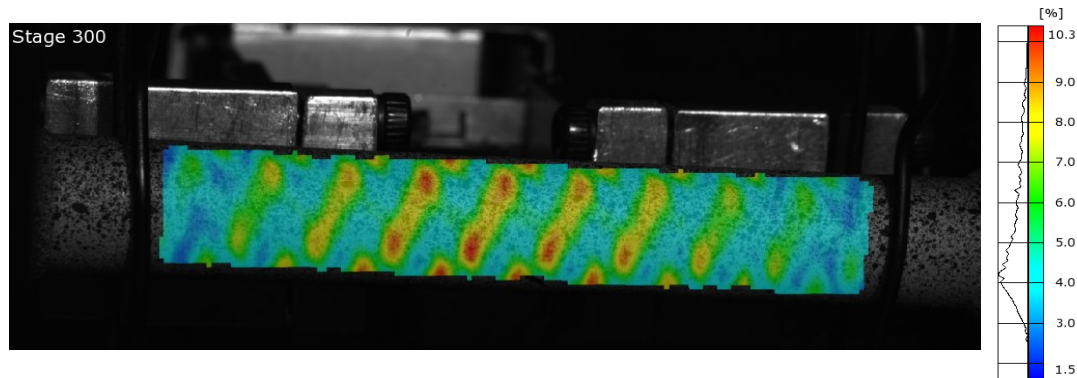
Na **obr. 35** je znázorněn už přetržený vzorek. Při porovnání obr. 34 a 35, je zřejmý vliv vnitřní struktury na orientaci lomu. Vliv vnitřní struktury je znatelný i ze snímků technického prodloužení, kde jsou místa s výraznějšími projevy deformací orientována obdobně jako finální lom (u gyroidu je úhel lomu k příčnému řezu vzorku ca 30°). Vliv je patrný i z podélných výbrusů – viz. **obr. 25**.



**Obr. 35** – Přetržený vzorek 10

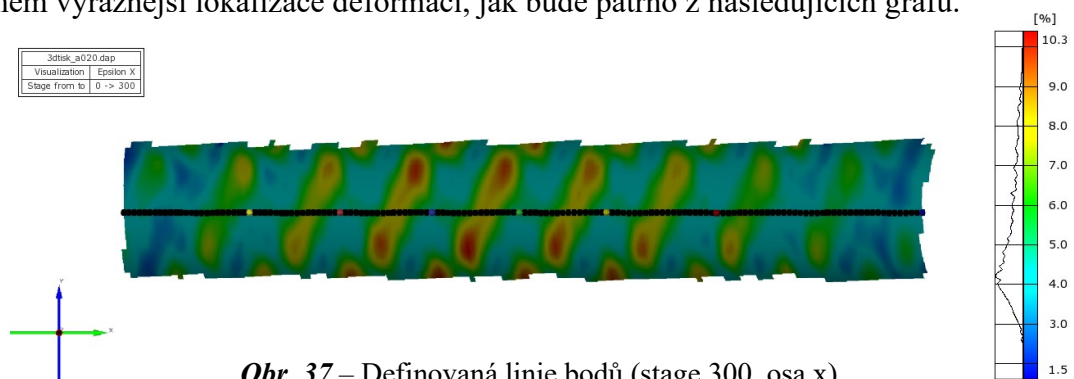
Na **obr. 36** je vidět již provedený výpočet pro stage 300, tzn. v čase 30 sekund od počátku měření. Znázorněno je zde technické prodloužení v % v ose x. Je patrné, že nerovnoměrnost rozložení deformací na povrchu vzorku se projevuje jinak než u vzorku s BCC strukturou. Stage 300 je zde znázorněna proto, že přibližně v tomto čase dochází k výraznějším projevům deformací právě v okolí místa lomu (červené oblasti). Oproti předchozímu vzorku dochází k lokalizaci výraznějších projevů deformací později – v tomto konkrétním případě o ca 7 vteřin později.





**Obr. 36** – Technické prodloužení vzorku v % (stage 300, osa x)

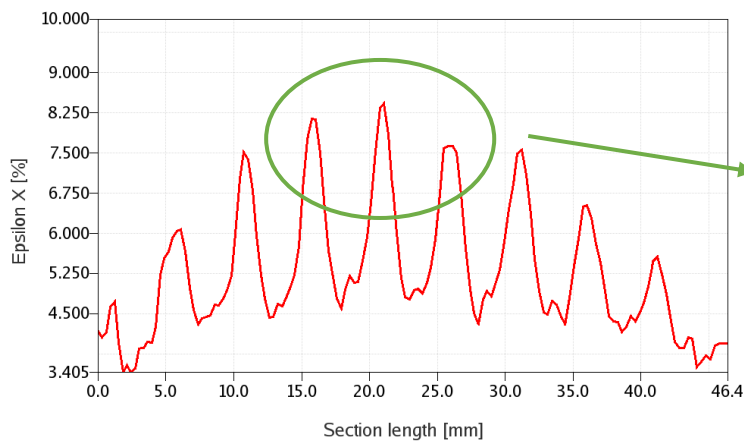
Pro reprodukovatelnost zachycení a vyjádření deformací po délce hodnocené oblasti byla opět definována linie bodů (řez) v ose měřeného vzorku. Linie bodů je znázorněna na **obr. 37**, kde jsou také zvýrazněny body v lokálních minimech deformací a okrajích výpočetní masky. V případě vzorku s gyroidní strukturou je těchto bodů méně než u struktury BCC, je to z důvodu mnohem výraznější lokalizace deformací, jak bude patrné z následujících grafů.



**Obr. 37** – Definovaná linie bodů (stage 300, osa x)

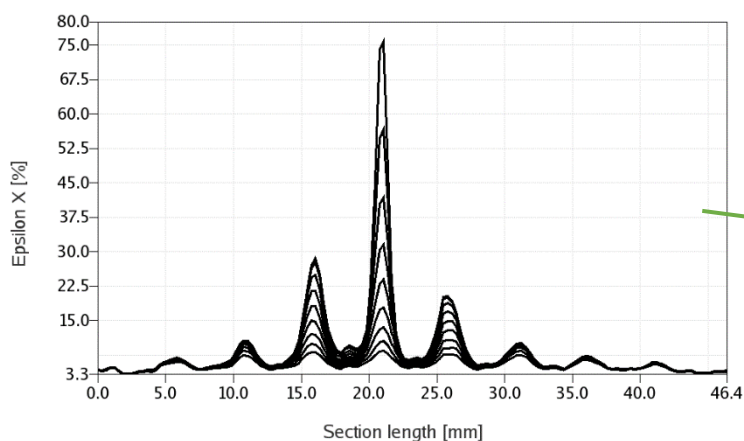
S využitím dané linie bodů byl opět vytvořen Multi-Section diagram pro stage 300 (**graf 7**) a Multi-Stage-Section diagram pro časově odstupňované křivky od stage 300 do stage 454 (**graf 8**).

Stage 300



Oblast lomu a vícenásobného zaškrcování. Označené špičky povrchových deformací začínají převládat nad okolními.

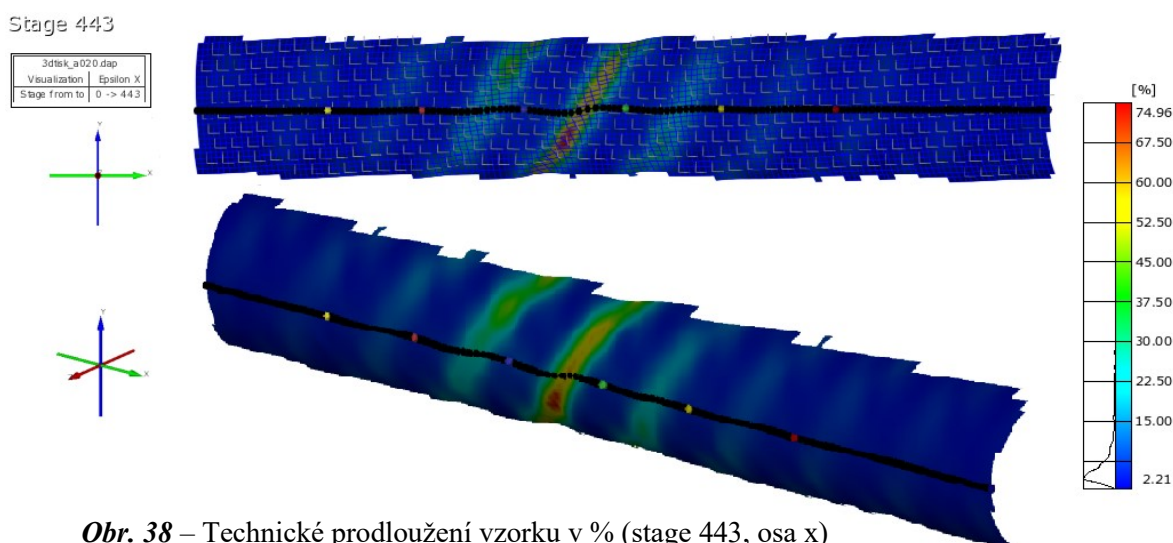
**Graf 7** – Multi-Section diagram pro stage 300



**Graf 8** – Multi-Stage-Section diagram (stage 300-454)

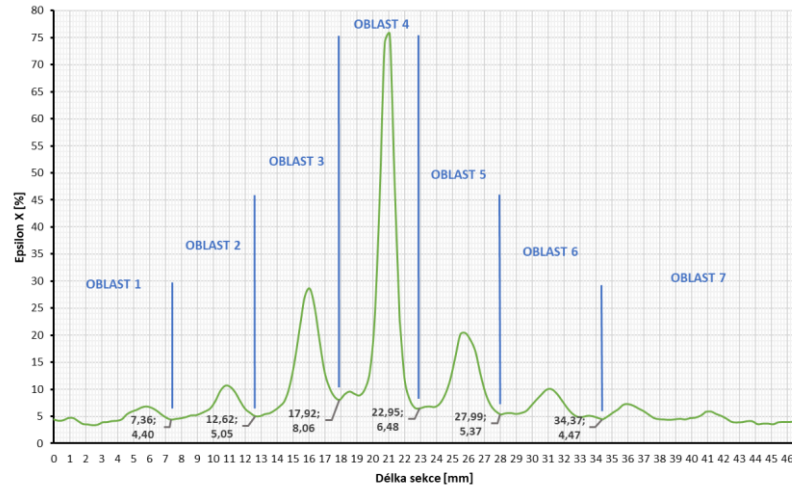
Na **grafu 8** je znázorněn vývoj povrchových deformací v čase. Spodní křivka znázorňuje stage 300 (čas 30 s) a vrchní křivka stage 454 (čas 45,4 s), tzn. těsně před porušením vzorku. Z grafu je patrný vývoj a lokalizace deformací v časovém průběhu zatěžování. Oproti předchozímu vzorku je zde dosaženo výrazně většího technického prodloužení v místě lomu (vliv natočení vzorku ke kameře není výrazný).

Technické prodloužení odpovídající stage 443 je zobrazeno na **obr. 38**. Jedná se o povrchové deformace těsně před porušením vzorku (ca 1,2 sekundy před porušením). Stage 454 zde není zobrazena proto, že v této konečné fázi již došlo k porušení stochastického nástřiku barvy na vzorku, což způsobilo narušení spojitého grafického znázornění. Grafické znázornění pro stage 443 a stage 454 se ale téměř neliší, proto je znázornění v čase ca 1,2 sekundy před lomem dostatečně vypovídající. Ve vrchní části obrázku je opět vidět síť fazet (prvků) s lokálními souřadnými systémy, které jsou orientovány rovnoběžně s linií řezu (ve směru osy x). Spodní část obrázku znázorňuje natočení plochy výsledků, oblast vzniku lomu je zřejmá – při bližším pohledu lze vidět zaškrcování vzorku, které se výrazně projevuje zakřivením zobrazené linie bodů.



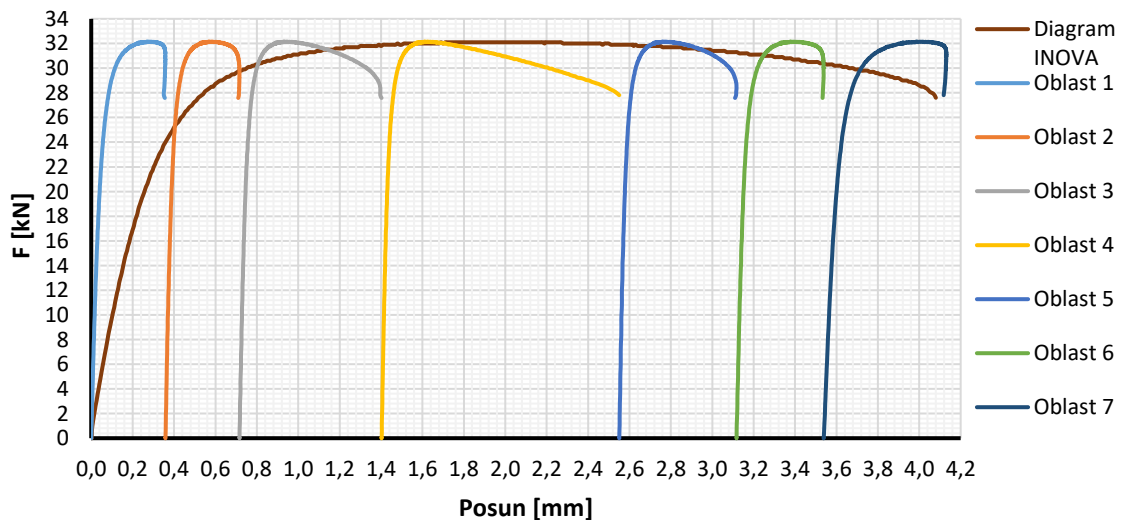
**Obr. 38** – Technické prodloužení vzorku v % (stage 443, osa x)

V tomto případě byl pro další hodnocení Multi-Section diagram pro stage 454 rozdělen do 7 oblastí – **graf 9**. Oblastí není 10 z důvodu zanedbání některých nevýznamných rozdílů v technickém prodloužení po délce sekce (viz. oblast 1 a oblast 7). Oblasti jsou ohraničeny lokálními minimy technického prodloužení a krajními body výpočetní masky.



**Graf 9** – Multi-Section diagram pro stage 454, rozdělen na oblasti

Z vyexportovaných dat z ARAMISU bylo opět vypočítáno prodloužení jednotlivých oblastí (výpočet byl proveden v programu Excel). Při znalosti zatěžovací síly v čase bylo možné vykreslit tahové digramy pro zvolené oblasti – viz. **graf 10**. Velikost prodloužení jednotlivých oblastí je z grafu zřejmá. V grafu je také znázorněn tahový diagram ze zařízení INOVA, na kterém byl vzorek testován. Kumulované prodloužení vypočítané v programu Excel, prodloužení z použitého extenziometru, a prodloužení odečtené z grafického znázornění ARAMIS, se opět liší v řádu setin milimetru. Z grafu je patrné, že největší deformace nastala v oblasti vzniku lomu (oblast 4) – jedná se o deformaci ca 1,15 mm, což odpovídá ca 27% celkové deformace sekce.



**Graf 10** – Tahové diagramy, oblasti + INOVA, kumulace prodloužení

### 6.3 Shrnutí a zhodnocení

Pomocí představené metodiky, s využitím optického systému ARAMIS a doplňujících výpočtů v programu MS Excel, lze velmi přesně vyhodnocovat nerovnoměrnost povrchových deformací. Přesnost metody vyplývá z *grafů 6 a 10*, kde se jednotlivé způsoby určení celkového prodloužení téměř neliší. Uvedený postup lze tedy použít pro samostatné lokalizování deformace, včetně limitní deformace, vedoucí k destrukci vzorku. Nevýhodou, která vyplývá z principu systému ARAMIS, je limitování pouze na snímání povrchu, a tedy záznam pouze povrchových deformací. Dále má vliv natočení vzorku směrem ke snímacímu senzoru, a tedy vliv natočení vnitřní struktury na průběh povrchových deformací – řez (sekce) v ose vzorku nemusí vždy vést nejvíce deformovanou oblastí. Vzhledem k předchozímu tvrzení nutno předpokládat relativně stejnou deformaci po obvodu vzorku (v daném místě) – možno ověřit pohledem na vypočtenou 3D plochu a zvážit vliv. Zpracování kompletního zhodnocení je také poměrně pracné a časově náročné.

Rozdíl mezi referenčními vzorky (BCC 90° x gyroid) je zřejmý. Pro hodnocení a porovnávání stejného typu vzorků, tedy např. BCC 90° x BCC 90°, by mohlo být využito oblastí s největšími deformacemi - na *grafu 6* např. oblast 6 a oblast 7 ku oblastem druhého vzorku. Porovnávat lze také samotnou lokalizaci deformace v čase a v závislosti na aktuální zatěžovací síle. Heterogenní rozvoj plasticity jsme nuceni vnímat předloženým projevem nerovnoměrných deformací. Síla na mezi kluzu je sice pro každou vypočtenou oblast a tím i celý vzorek shodná, ale obsah průřezu vzorku a vliv uspořádání vnitřní struktury se po délce zkušební oblasti mění. Proto není možné pomocí využitého systému zobrazit hodnoty lokálních napětí. Možným řešením by bylo provedení výpočtu pomocí FEM, kde by byl výpočtový model verifikován podle výsledků systému ARAMIS.

## 7 Souhrnné vyhodnocení výsledků se zaměřením na rozdíly statické vs. dynamické pevnosti daného typu a provedení oceli

Hodnoceny byly válcové vzorky s různou vnitřní geometrií a ploché vzorky s prodlouženou deformační délkou. Hodnocení je zaměřeno na statickou a dynamickou pevnost daného typu a provedení oceli. Důraz je kladen na zhodnocení vlivu orientace tisku, případného rozdílu délky dutiny, a vlivu vnitřních struktur na pevnost předmětné oceli. K hodnocení bylo využito hodnot v předložených tabulkách a porovnání tahových křivek přiložených v přílohách A a B.

### 7.1 Statická pevnost

Statická pevnost se v tomto případě týká pouze válcových vzorků v různých provedeních (statická pevnost 2 plochých vzorků je popsána u vyhodnocování dynamické pevnosti). **Tab. 4** zobrazuje odečtené a dopočítané ukazatele všech variant válcových vzorků pro přístup “skutečné napětí” a pro přístup “smluvní napětí” (vysvětleno dále). Vzorky č. 2, 12 a 23 nejsou v tabulce uvedeny z důvodu chybného záznamu síly nebo nedostatku potřebných údajů.

**Tab. 4** – Souhrnná tabulka výsledků válcových vzorků; Rm, Rp0,2

Mez pevnosti - "Skutečné napětí"						Mez pevnosti a Rp0,2 - "Smluvní napětí"											
Vz.	Fmax [N]	Obsah lom. plochy [mm <sup>2</sup> ]	Rm [MPa]	* X̄1	** X̄2	Varianta	Vz.	Rm [MPa]	* X̄1	** X̄2	F <sub>RP0,2</sub> [N]	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	* X̄1	** X̄2			
1	28900	17,88	1616	1579	1621	kratší ob.-tisk 90°	1	1022	1027	1037	24800	877	879	872			
3	29200	18,95	1541	3			1033	24900			881						
4	29500	17,90	1648	4			1043	24600			870						
5	29900	17,73	1686	5			1057	24800			877						
6	29300	17,69	1656	1664	6	1036	24000	849	865	1809	dlouhá ob.-tisk 90°	7	891	26300	733	727	
7	32000	18,94	1690	8	894	26100	727										
8	32100	19,11	1680	9	886	25900	721										
9	31800	19,11	1664	10	894	26000	724										
10	32100	16,17	1985	1940	11	900	26900	749	737	1629	dlouhá ob. Gyroid-90°	10	894	26000	724	737	
11	32300	17,05	1894	11	900	26900	749										
13	31400	18,58	1690	1672	13	1047	25500	850	874			kratší ob. BCC-90°	13	1047	25500		850
14	31500	19,52	1614	14	1050	25900	863										
15	31300	18,28	1712	15	1043	26200	873										
16	31200	20,38	1531	16	1040	26500	883										
17	30900	18,97	1629	1587	17	1030	26600	887	886	1729	dlouhá ob. BCC 90°	17	1030	26600	887		
18	31400	19,61	1601	18	1047	26600	887										
19	32100	18,19	1765	1769	19	928	26400	763	774			kratší ob. BCC 45°	19	928	26400	763	
20	33000	17,40	1897	1769	20	954	27300	789									
21	32300	19,62	1646	1721	21	934	26600	769									
22	31900	19,27	1655	1674	22	922	26300	760									
24	31100	18,38	1692	1674	24	899	26200	757	759	1721	dlouhá ob. BCC 45°	22	922	26300	760		

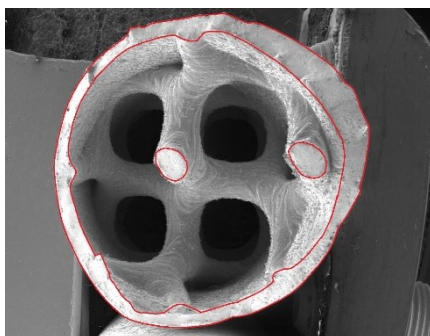
\* Zobrazuje průměr konkrétní varianty vzorku (s ohledem na délku obálky)

\*\* Zobrazuje průměr varianty vzorku bez ohledu na délku obálky (pouze dle typu struktury a orientace tisku)

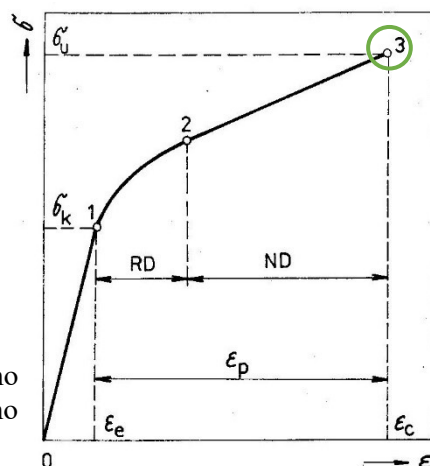


“Smluvní napětí“, neboli engineering stress: Dypočítané hodnoty dle tohoto přístupu jsou uvedeny v pravé části přiložené tabulky. Bylo tedy využito běžné metody, kdy je příslušná pevnost získána podílem síly ku počáteční ploše příčného průřezu zkoušené délky ( $S_0$ ). U vzorků s vnitřními strukturami se plocha průřezu mění v závislosti na poloze zvoleného příčného průřezu (poloze řezu vnitřní struktury). Pro výpočet pevností byly zvoleny minimální hodnoty ploch průřezů, které byly odečteny z CAD modelů daných vzorků. Hodnoty dle typů vzorků byly: Gyroid -  $35,9 \text{ mm}^2$ ; BCC  $90^\circ$  -  $30 \text{ mm}^2$ ; BCC  $45^\circ$  -  $34,6 \text{ mm}^2$  [33]. Z porovnání hodnot s hodnotami obsahu plochy v levé části tabulky, je zřejmý značný rozdíl plochy. Tento rozdíl se odráží ve výsledných hodnotách pevnosti dle zvoleného přístupu. Síla na mezi kluzu ( $F_{Rp0,2}$ ) byla odečtena z tahových křivek, ukázka odečtu je uvedena na konci přílohy A – **graf 18 a**.

“Skutečné napětí“, neboli true stress: Dypočítané hodnoty dle tohoto přístupu jsou uvedeny v levé části přiložené tabulky. Tento přístup byl zvolen jako první varianta pro získání hodnot napětí. Důvodem byla absence CAD modelů, které byly obdrženy později. Nutno zdůraznit, že použité stanovení “skutečného napětí“ se liší od postupu uvedeného v normě ČSN ISO 10275 [31]. Za předpokladu zanedbání vlivu elastické složky deformace byl odečten obsah lomových ploch. Tento obsah byl odečítán s využitím měřicího optického mikroskopu. Lomové plochy vzorků nebyly rovinné (viz. **obr. 1 a** v příloze A), a proto bylo odečítání velmi náročné a mohly vznikat nepřesnosti. V levé části **obr. 39** je uveden ilustrativní obrázek odečítané lomové plochy (červeně vyznačena), zešikmení lomové plochy nebylo nijak zohledněno – jedná se tedy o promítnutí lomové plochy do roviny kolmé k ose vzorku. Následným podělením  $F_{max}$  a tohoto obsahu plochy, byly obdrženy hodnoty  $R_m$  v tabulce. Tyto hodnoty odpovídají zeleně vyznačenému bodu na schématu skutečného tahového diagramu na **obr. 39**. V porovnání s plnými materiály, je v tomto případě lehčených vzorků, rozdíl daných pevností mnohem dramatictější.



**Obr. 39** – Lomová plocha gyroidního vzorku a schéma skutečného tahového diagramu [32]



RD: rovnoměrná deformace  
 ND: nerovnoměrná deformace  
 $\sigma_k$ : mez kluzu  
 $\sigma_u$ : lomové napětí  
 $\epsilon_p$ : plastická část deformace  
 $\epsilon_e$ : elastická část deformace

Předchozí dva přístupy vnášejí do výsledků závislost na lomových plochách, jejichž chybné stanovení může výsledky značně zkreslovat. Oba přístupy jsou závislé na předpokladech, dle kterých byly lomové plochy odečítány. Proto je nutné brát výsledné hodnoty spíše jako hodnoty orientační – zejména z hodnot skutečného napětí je patrný značný rozptyl. Rozdíl hodnot obou přístupů je zřejmý. Zároveň zjištěné rozdíly ukazují na to, že vyhodnocení pouze smluvním napětím dle standardního přístupu není vyhovující, a to zejména při potřebě uvažovat celkovou energii do lomu (např. v souvislosti s rázovým provozním zatížením atp.). K následujícímu hodnocení vlivu orientace tisku, rozdílu délky dutiny, a vlivu vnitřních struktur, bylo využito naměřených tahových křivek, tedy závislosti  $F - \Delta L$ . Pevnost vzorku je zde představována maximální dosaženou silou, kompletní tahové křivky jsou uvedeny v příloze A. V závěru hodnocení je uveden případný rozdíl výsledků, způsobený použitím předchozích přístupů.

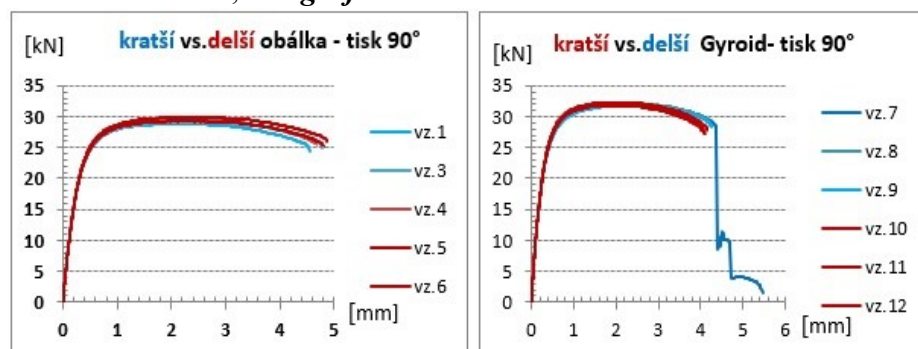
Nutno podotknout, že v interpretovaných tahových křivkách vzorků s vnitřními strukturami není nijak zohledněn vliv heterogenního rozvoje plasticity. Docházelo k nerovnoměrnému prodlužování a zužování zkušební oblasti vzorků, což dle předpokladu ovlivnilo průběh oblasti deformačního zpevnování tahových křivek. Uvedené tahové křivky jsou vytvořeny ze záznamu siloměru zařízení INOVA a údajů použitého extenziometru.

Zhodnocení dle typu a provedení vzorků:

- **Vliv délky dutiny (obálky)**

U varianty vzorků **bez vnitřních struktur** nebyl vliv délky dutiny nijak znatelný. Průběhy tahových křivek obou variant lze považovat za stejné – tažnost a maximální síla nebyla nijak ovlivněna, viz. **graf 11**. Tahové křivky nejsou nijak ovlivněny vnitřními strukturami.

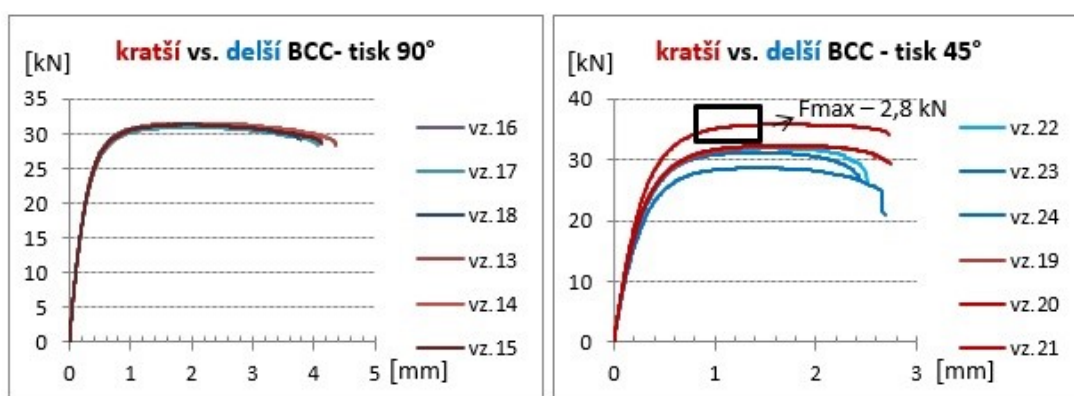
Průběhy tahových křivek vzorků **s gyroidní strukturou** se také téměř neliší – maximální dosaženou sílu lze považovat za stejnou a varianta delší obálky vykazovala nepatrně vyšší tažnost oproti kratší variantě, viz. **graf 12**.



**Graf 11-12** – Porovnání vlivu délky obálky,

U tahových křivek varianty **BCC 90°** není vliv délky dutiny vůbec patrný. Projev většího podílu vnitřní struktury u delší varianty vzorku nebyl zaznamenán, viz. **graf 13**.

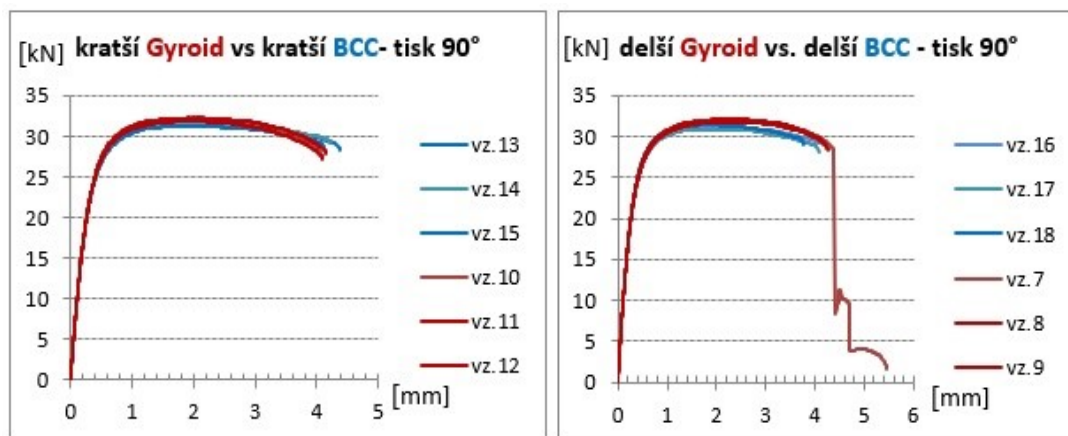
Tahové křivky varianty **BCC 45°** vykazují značný rozptyl v pevnosti jednotlivých vzorků. U kratší varianty byl zaznamenán mírný nárůst pevnosti s nepatrně vyšší tažností – viz. **graf 14**. U tahové křivky s maximální dosaženou silou (na grafu označena), byla zaznamenána chyba siloměru – proto je nutné maximální hodnotu uvažovat o 2,8 kN méně. Do rozptylu výsledků zřejmě promlouvá orientace tisku vnitřní struktury, která vykazuje více imperfekcí (ulpívajícího prášku) na povrchu, než varianta tisku 90°. Tyto imperfekce jsou poté při jednoosém zatížení nevhodně rozmístěny (natočeny) a ovlivňují pevnost a tažnost vzorků.



**Graf 13-14** – Porovnání vlivu délky obálky, BCC 90° +

- **Vliv typu vnitřní struktury**

Hodnocení vychází z porovnávání vzorků o stejné délce dutiny a strukturách o stejné orientaci tisku – tedy BCC 90° vs. Gyroid. Z průběhů tahových křivek je u obou variant délek dutiny patrná mírně vyšší pevnost vzorků s gyroidní strukturou. Tažnost, resp. dosažené prodloužení vzorku, je u obou typů vnitřních struktur téměř stejná, viz. **grafy 15–16**. Zřejmě se projevuje vyšší tuhost gyroidní varianty ve spojení s válcovou obálkou.

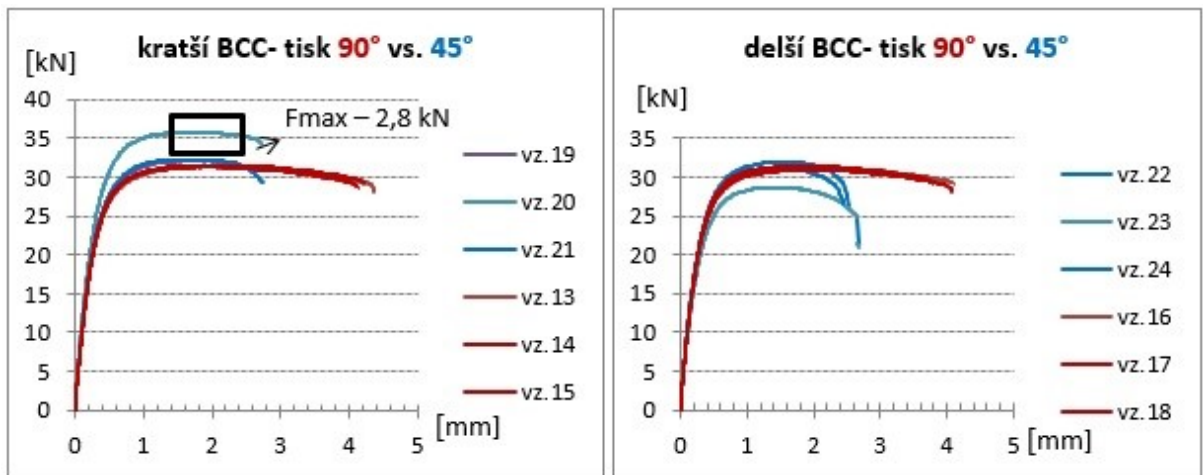


**Graf 15-16** – Porovnání vlivu typu vnitřní struktury



- **Vliv orientace tisku (90° vs. 45°)**

Vliv orientace může být hodnocen pouze u varianty BCC struktur, jiné 45° struktury nebyly testovány. Hodnocení opět vychází ze srovnání tahových křivek – *grafy 17-18*. Z porovnání tahových křivek je patrný velký vliv orientace tisku na deformaci (tažnost) u obou délek dutiny. Tažnost varianty 45° je mnohem nižší než varianty 90° - o ca 40 % (vztaženo k vyšší hodnotě). Z tahových křivek je také patrná mírně vyšší pevnost varianty 45°, velký rozptyl hodnot je ale zřejmý. Pravděpodobně se zde projevil již zmiňovaný vliv většího množství imperfekcí u varianty 45°.



*Graf 17-18* – Porovnání vlivu orientace tisku

**Vliv přístupů “skutečné napětí“ a “smluvní napětí“:**

Dle hodnot  $R_m$ , přístupu “skutečné napětí“, lze tvrdit, že u vzorků s vnitřními strukturami vykazovala každá varianta kratší dutiny vyšší skutečnou pevnost než delší varianta. To se liší od výsledků dle tahových křivek. Dále obě varianty délky gyroidních struktur vykazují výrazně vyšší pevnost oproti BCC strukturám. Také při porovnávání orientace tisku BCC vzorků, je patrná vyšší skutečná pevnost varianty 45°. Vliv obsahu odečítané lomové plochy je z výsledků zřejmý, vyplývá z něho i značný rozptyl výsledných hodnot. Rozdíl pevností mezi jednotlivými variantami je výraznější než z tahových křivek  $F - \Delta L$ .

Z hodnot  $R_m$ , přístupu “smluvní napětí“, je patrný nesoulad s hodnotami předchozího přístupu. Tento rozdíl plyne z předpokladu zvolení minimálního obsahu plochy průřezu, který nijak nezohledňuje skutečný průběh lomu, resp. obsah skutečné lomové plochy. Největší nesoulad je u vzorků s gyroidní strukturou a BCC 45°. Lomy těchto vzorků nebyly rovinné, jednalo se o více či méně zešikmené plochy. Vnitřní struktury byly porušovány v kritických místech spojení (BCC), nebo nejužších částech struktury (gyroid).

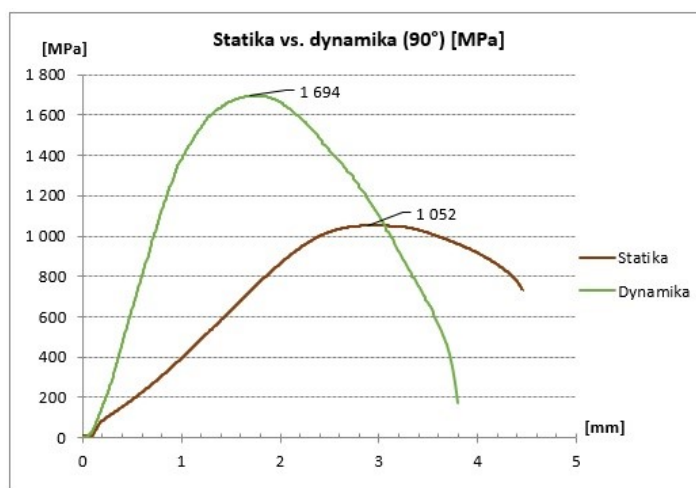
## 7.2 Dynamická pevnost

Hodnocení dynamické pevnosti se týká plochých vzorků vyříznutých pod různými úhly z vytištěného plechu. Cílem bylo posoudit možný vliv orientace tisku ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) na dynamickou pevnost, resp. dynamické zpevnění, a porovnat výsledky se statickou zkouškou. V případě plochých, plných vzorků nebyl problém se stanovením  $S_0$ , proto jsou veškeré hodnoty stanoveny dle přístupu smluvního napětí. Dynamické zkoušky byly provedeny celkem na 9 vzorcích, 2 vzorky o orientaci  $90^\circ$  byly dále použity na statické zkoušky pro možnost adekvátního porovnání výsledků dynamika vs. statika. Odečtené a dopočítané ukazatele jsou uvedeny v **tab. 5**. Souhrn a porovnání jednotlivých variant tahových křivek je poté uveden v příloze B.

**Tab. 5** – Souhrnná tabulka výsledků plochých vzorků

Dynamika - ploché (10 ms <sup>-1</sup> )					
Orientace	Vz.	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>m</sub> [MPa]	Průměr dle orientace	Průměr všech
0°	1	17160	1716	1712	1701
	2	17150	1715		
	3	17050	1705		
45°	1	17000	1700	1696	
	2	17010	1701		
	3	16880	1688		
90°	1	16920	1692	1696	
	2	17000	1700		
	3	16950	1695		
Statika - ploché (0,02 ms <sup>-1</sup> )					
90°	1	10440	1044	1049	X
	2	10530	1053		

Posouzení vlivu orientace tisku je hodnoceno podle **grafů 2-4 b** přílohy B. Z porovnání jednotlivých variant je patrné, že průběhy tahových křivek se téměř neliší. Pouze průběh vzorku  $0^\circ$ . 3 má mírně strmější gradient než křivky ostatní, dosažená pevnost, resp. zpevnění se ale shoduje s ostatními. Vliv orientace tisku na dynamickou pevnost nebyla tedy prokázána, veškeré rozdíly průběhů tahových křivek lze považovat za zanedbatelné. Toto tvrzení potvrzují i hodnoty v přiložené tabulce – rozptyl průměrných hodnot je velmi malý. Průměrná hodnota  $R_m$  je ca 1700 MPa.



**Graf 19** – Porovnání statika vs. dynamika

Porovnání dynamické vs. statické tahové křivky je uvedeno na **grafu 19**. Rozdíl záznamů v oblasti elastické deformace je způsobený nižší tuhostí použitého zařízení u statické zkoušky. Z grafu je patrný velký rozdíl zpevnění materiálu v závislosti na rychlosti deformace. Bylo zjištěno intenzivní dynamické zpevnění materiálu. Dle průměrných hodnot v tabulce činí rozdíl dynamické vs. statické  $R_m$  ca 650 MPa.

### 7.3 Shrnutí výsledků

V rámci **statických zkoušek** válcových vzorků byly využity 3 přístupy získání pevnosti. Pro adekvátní porovnání výsledků byl zvolen přístup porovnávání naměřených tahových křivek, resp. závislosti síly na deformaci ( $F - \Delta L$ ). Zbylé dva přístupy vedou na hodnoty napětí a v určitých variantách vzorků se značně odlišují. Vliv obou přístupů byl popsán dříve.

Z porovnávaných tahových křivek bylo zjištěno, že délka dutiny (obálky) nemá výrazný vliv na pevnost jednotlivých variant – největší rozdíl byl zaznamenán u vzorků s BCC strukturou tištěnou v orientaci  $45^\circ$ , kde vykazovala kratší varianta mírný nárůst pevnosti oproti dlouhé variantě. Vzorky BCC  $45^\circ$  také vykazovaly zdaleka nejvyšší rozptyl hodnot pevnosti. To lze připisovat vlivu většího množství imperfekcí (ulpívajícího prášku) na vnitřních strukturách. Z porovnání vlivu typu vnitřní struktury, tedy BCC  $90^\circ$  vs. Gyroid, vyplynula mírně vyšší pevnost variant s gyroidní strukturou. Nejmarkantnější rozdíl průběhů tahových křivek byl poté zachycen při zjišťování vlivu orientace tisku, tedy BCC  $45^\circ$  vs. BCC  $90^\circ$ . U obou délek variant vzorků byl zjištěn velký vliv orientace tisku na výslednou deformaci. Vzorky BCC  $45^\circ$  vykazovaly značně nižší tažnost oproti variantě BCC  $90^\circ$ . Ze souhrnného grafu tahových křivek – **graf 1 a** přílohy A, lze také tvrdit, že nárůst pevnosti testovaných vzorků byl doprovázen poklesem tažnosti (tedy: čím vyšší pevnost, tím nižší tažnost). Dále je

dle hodnocení tahových křivek také patrné, že přidání vnitřních struktur nezajistilo výrazný nárůst pevnosti –  $F_{max}$  zcela dutých vzorků je nižší pouze o ca 2-3 kN.

Shrnutí v bodech:

- Významný vliv orientace tisku (množství imperfekcí na vnitřním povrchu struktur)
- Vzorky s orientací  $45^\circ$  - výrazný rozptyl pevnosti + nižší tažnost
- Relativně nízký nárůst pevnosti zavedením vnitřních struktur (dle  $F_{max}$ )
- Čím vyšší pevnost, tím nižší tažnost
- BCC vs. Gyroid – mírně vyšší pevnost gyroidu

Z **dynamických zkoušek** plochých vzorků nebyl vliv orientace tisku na pevnost prokázán - veškeré rozdíly průběhů tahových křivek lze považovat za zanedbatelné, dopočítané hodnoty pevnosti tvrzení potvrzují. Z porovnání dynamické a statické tahové křivky plochých vzorků o orientaci  $90^\circ$  je zřejmé velké dynamické zpevnění materiálu – rozdíl výsledné pevnosti činí ca 650 MPa.

Shrnutí v bodech:

- Zanedbatelný vliv orientace tisku
- Velký rozdíl zpevnění materiálu v závislosti na rychlosti deformace

## ZÁVĚR

V teoretické části práce byl představen 3D tisk a aditivní technologie, a jejich současný stav. Blíže byla popsána problematika 3D tisku kovů se zaměřením zejména na oblast automotive. Obecně byly představeny používané materiály a vybrané technologie, z nichž některé byly využity při výrobě testovacích vzorků do praktické části práce. Stručně byly také představeny vysokopevné oceli používané v automobilovém průmyslu a maraging oceli.

V praktické části práce byly testovány různé varianty 3D tisknutých vzorků z maraging oceli, výrobní metodou byla metoda DMLS. Dané vzorky byly podrobeny různým tahovým zkouškám a následně zkoumány. Vzorky představovaly 2 základní typy – ploché vzorky a válcové vzorky. Ploché vzorky sloužily k dynamickým tahovým zkouškám, a válcové ke statickým tahovým zkouškám – varianty vzorků jsou v práci představeny. Bylo zhotoveno metalografické zhodnocení podélných a příčných výbrusů, kde byla ukázána typická mikrostruktura tohoto typu tisknuté oceli. Zobrazeny jsou i SEM snímky vnitřních povrchů a lomových ploch.

V rámci testování válcových vzorků byl pro snímání povrchových deformací využit optický systém ARAMIS GOM 4M. Válcové vzorky s vnitřními strukturami vykazovaly vícenásobné zaškrcování a nerovnoměrnost povrchových deformací, tedy i heterogenní rozvoj plasticity. Pro zachycení a hodnocení tohoto jevu byla vypracována metodika v softwaru ARAMIS a MS Excel. Metodika je v práci představena na dvou referenčních vzorcích.

V závěru práce je představeno souhrnné vyhodnocení výsledků tahových zkoušek se zaměřením na rozdíly statické vs. dynamické pevnosti daného typu a provedení oceli. V hodnocení statické pevnosti jsou uvedeny tři přístupy hodnocení pevnosti, z nichž jeden byl použit jako referenční. Z výsledků je patrný vliv různého provedení vzorků na výslednou pevnost. Z hodnocení dynamické pevnosti je zřejmé intenzivní dynamické zpevnění předmětného materiálu.

Diplomová práce přinesla následující podstatná zjištění. S využitím válcové indentační metody byla potvrzena anizotropie mechanických vlastností, vznikající vlivem výrobní aditivní metody. Dle hodnot koeficientu zpětné relaxace lze uvažovat na vyšší pevnost materiálu ve směru tisku. Dále bylo u zkoumaného materiálu prokázáno intenzivní dynamické zpevnění, jehož dosah v rámci testovaného vzorku byl zjištěn indentační metodou. Vliv orientace tisku na toto zpevnění nebyl prokázán. Při tahových zkouškách válcových vzorků s vnitřními strukturami byl zachycen projev heterogenního rozvoje plasticity, resp. vícenásobného zaškrcování deformační délky testovaných vzorků. Toto zaškrcování a nerovnoměrnost

deformací závisí na typu a rozložení vnitřních struktur. Vliv vnitřních struktur na deformaci je zřejmý i z provedených podélných výbrusů. Tento zmíněný efekt významně ovlivňuje stav napjatosti a deformace v místě finálního lomu i celkovou deformaci do lomu, tj. de facto zkresluje standardní záznam tahové zkoušky. Navržen byl proto postup hodnocení deformační odezvy s pomocí optického systému ARAMIS. Navržená metodika je v práci představena na 2 referenčních vzorcích. V rámci navržené metodiky je možno velmi přesně vyhodnocovat nerovnoměrnost povrchových deformací, samotnou lokalizaci deformace v čase, a i v závislosti na zatěžovací síle. V metodice bylo také provedeno ověření snímání deformace pomocí systému ARAMIS vs. extenziometr – součtová deformace systému ARAMIS ukázala odchylku pouze setin milimetru od údajů extenziometru. To potvrzuje dostatečnou přesnost měření, resp. správnost nastavení optického systému. V rámci hodnocení a porovnávání statické pevnosti válcových vzorků byly využity 3 přístupy získání pevnosti – skutečné napětí; smluvní napětí;  $F - \Delta L$ . Pro adekvátní porovnání výsledků byl zvolen přístup porovnávání naměřených tahových křivek, resp. závislosti síly na deformaci ( $F - \Delta L$ ). Zbylé dva přístupy vedou na hodnoty napětí a v určitých variantách vzorků se značně odlišují. Zároveň zjištěné rozdíly ukazují na to, že vyhodnocení pouze smluvním napětím dle standardního přístupu není vyhovující, a to zejména při potřebě uvažovat celkovou energii do lomu (např. v souvislosti s rázovým provozním zatížením, což je v řadě aplikací automotive). Z výsledků  $F - \Delta L$  byl zjištěn zejména výrazný vliv orientace tisku na pevnost a tažnost. To lze připisovat zvýšenému množství imperfekcí (ulpívajícího prášku) na vnitřních površích vzorků. Tyto imperfekce byly zachyceny v rámci fraktografických analýz.

Na základě takto nabytých poznatků lze navrhopvat následující možnosti zkoumání. Navržená metodika s využitím systému ARAMIS je limitována pouze na hodnocení povrchových deformací, bez zobrazení hodnot lokálních napětí. Možným řešením by bylo provedení výpočtu pomocí FEM, kde by byl výpočtový model verifikován podle výsledků systému ARAMIS. Dále byl při hodnocení výsledků patrný výrazný vliv vnitřních struktur na lokalizaci lomu a jeho průběh. Kritickým místem kvality je zřejmě oblast propojení vnitřních struktur s válcovou obálkou, zkoumání by se tedy mohlo zaměřit výhradně na tuto oblast. V návaznosti na dokumentovaný stav vnitřních povrchů vzorků by také mohla být otestována únavová odolnost.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BUCHANAN, C. AND GARDNER, L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*. 2019, **180**, pp.332-348.
- [2] DUDA, Thomas a L. Venkat RAGHAVAN. 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*. 2016, **49**(29), 103-110. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111. ISSN 24058963. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896316325496>
- [3] BOURELL, David, J.P. KRUTH, Ming LEU, Gideon LEVY, David ROSEN, Alison M. BEESE a Adam CLARE. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2017, **66**(2), 359-681 (23). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- [4] Best 3D Printing Materials for Jewelry Designers: Gold, Silver, Brass, Bronze. In: *Zeal 3D Printing Services* [online]. 2017 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <https://www.zeal3dprinting.com.au/best-3d-printing-materials-jewelry-designers-gold-silver-brass-bronze/>
- [5] GORSSE, Stéphane, Christopher HUTCHINSON, Mohamed GOUNÉ a Rajarshi BANERJEE. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2017, **18**(1), 584-610 (27). DOI: <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1361305>.
- [6] Available Materials for Metal Additive Manufacturing: Characteristics & Applications. *Farinia Group* [online]. [cit. 2019-07-27]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-materials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additive-manufacturing>
- [7] Metal powders – the raw materials. *Metal AM*. [online]. [cit. 2019-07-27]. Dostupné z: <http://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-powders-the-raw-materials/>

- [8] DAWES, Jason, Robert BOWERMAN a Ross TREPLETON. Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain: Exploring the production and supply of metal powders for AM processes. *JOHNSON MATTHEY TECHNOLOGY REVIEW*. 2015, **59**(3), 243–256. DOI: <http://dx.doi.org/10.1595/205651315X688686>.
- [9] MILEWSKI, John O. *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry* [online]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2019-08-02]. ISBN 978-3-319-58205-4. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=XlsqDwAAQBAJ&lpg=PP1&dq=metal%20additive%20manufacturing&pg=PA8#v=onepage&q&f=false>
- [10] Vstřikolisovny plastů, nebo slévárny kovů HLEDÁTE ÚSPORY?: S konformním chlazením dosáhneme zkrácení času chlazení forem až o 50%! . *Konformní chlazení* [online]. Inomnia, 2017 [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: <http://www.konformni-chlazení.cz/>
- [11] Oberflächennachbearbeiten eines SLM-Ventils mit Tauchgleitläppen. MASCHINENMARKET [online]. [cit. 2019-08-05]. Dostupné z: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=7502&pk=471187&fk=0&type=article#1>
- [12] Volkswagen identifies key areas for metal Additive Manufacturing in automotive applications. *METAL AM* [online]. 2018, 9. 1. 2018 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/volkswagen-identifies-key-areas-metal-additive-manufacturing-automotive-applications/>
- [13] Když se tisknou brzdy. *Výzkum Vývoj Automotive* [online]. 2016, 26. 12. 2016 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.vvautomotive.cz/kdyz-se-tisknou-brzdy/>
- [14] ADAMS, Kyle. Automotive Applications Embracing Metal Additive Manufacturing. *Lightweighting World* [online]. 13. 11. 2018 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://lightweightingworld.com/automotive-applications-embracing-metal-additive-manufacturing/>

- [15] SLM Solutions & Bugatti at avant garde of 3D Printing Automotive. *Additive News* [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://additivenews.com/slm-solutions-bugatti-avant-garde-3d-printing-automotive/>
- [16] BERROCAL, Laura, Rosario FERNÁNDEZ, Sergio GONZÁLEZ, et al. Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components. *Progress in Additive Manufacturing* [online]. Springer International Publishing, 2019, 4(2), 83-95 [cit. 2019-08-12]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0061-3>. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-018-0061-3>
- [17] MIRZENDEHDEL, Amir M. a Krishnan SURESH. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *Computer-Aided Design* [online]. 2016, (81), 1-13 [cit. 2019-08-12]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2016.08.006>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448516300951>
- [18] PAGÁČ, Marek. Začínáme s 3D tiskem kovů #3: Předvýrobní etapa (topologická optimalizace). In: *Konstrukter.cz* [online]. 2017 [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobni-etapa-topologicka-optimalizace/>
- [19] ZHANG, Yi, Linmin WU, Xingye GUO, Stephen KANE, Yifan DENG, Yeon-Gil JUNG, Je-Hyun LEE a Jing ZHANG. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2018, 2018(1), 1-13 [cit. 2019-08-19]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11665-017-2747-y>
- [20] BIKAS, H., P. STAVROPOULOS a G. CHRYSSOLOURIS. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 2016(83), 389-405 [cit. 2019-08-19]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7576-2>
- [21] JONES, Gordon. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained. *ALL3DP* [online]. [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>

- [22] Additive Fabrication. *CUSTOMPART.NET* [online]. [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [23] WorldAutoSteel: Steel Basics [online databáze]. 2009- [cit. 2019-08-22]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/>
- [24] LESCH, Christian, Norbert KWIATON a Frank B. KLOSE. Advanced High Strength Steels (AHSS) for Automotive Applications – Tailored Properties by Smart Microstructural Adjustments. *Steel research international* [online]. 2017, **88**(10) [cit. 2019-08-23]. DOI: 10.1002/srin.201700210. ISSN 16113683. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/srin.201700210>
- [25] SHA, Wei a Zhanli GUO. *MARAGING STEELS: Modelling of Microstructure, Properties and Applications* [online]. 1. Woodhead Publishing, 2009 [cit. 2019-08-25]. ISBN 978-1-84569-693-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9781845696863/maraging-steels>
- [26] KUČEROVÁ, Ludmila, Ivana ZETKOVÁ, Andrea JANDOVÁ a Martin BYSTRIANSKÝ. Microstructural characterisation and in-situ straining of additive-manufactured X3NiCoMoTi 18-9-5 maraging steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, **750**, 70-80 [cit. 2019-08-25]. DOI: 10.1016/j.msea.2019.02.041. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509319302047>
- [27] Eva Schmidová, Premysl Hojka, Bohumil Culek, Filip Klejch, & Michal Schmid. (2019). Dynamic Strength and Anisotropy of Dmls Manufactured Maraging Steel. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, *21*(3), 35-39. Retrieved from <http://komunikacie.uniza.sk/index.php/communications/article/view/1502>
- [28] ARAMIS, Uživatelská příručka – Software, GOM mbH, Braunschweig, 2007
- [29] Eva Schmidová, Bohumil Culek, Jakub Vágner, Přemysl Hojka, Filip Klejch, Sunilkumar M.R. (2019). Experimentální testování a diagnostika vzorků s porézni strukturou, Dílčí výzkumná zpráva, č.VVCD-Z-19/14. Projekt č.FV30149 MPO-TRIO

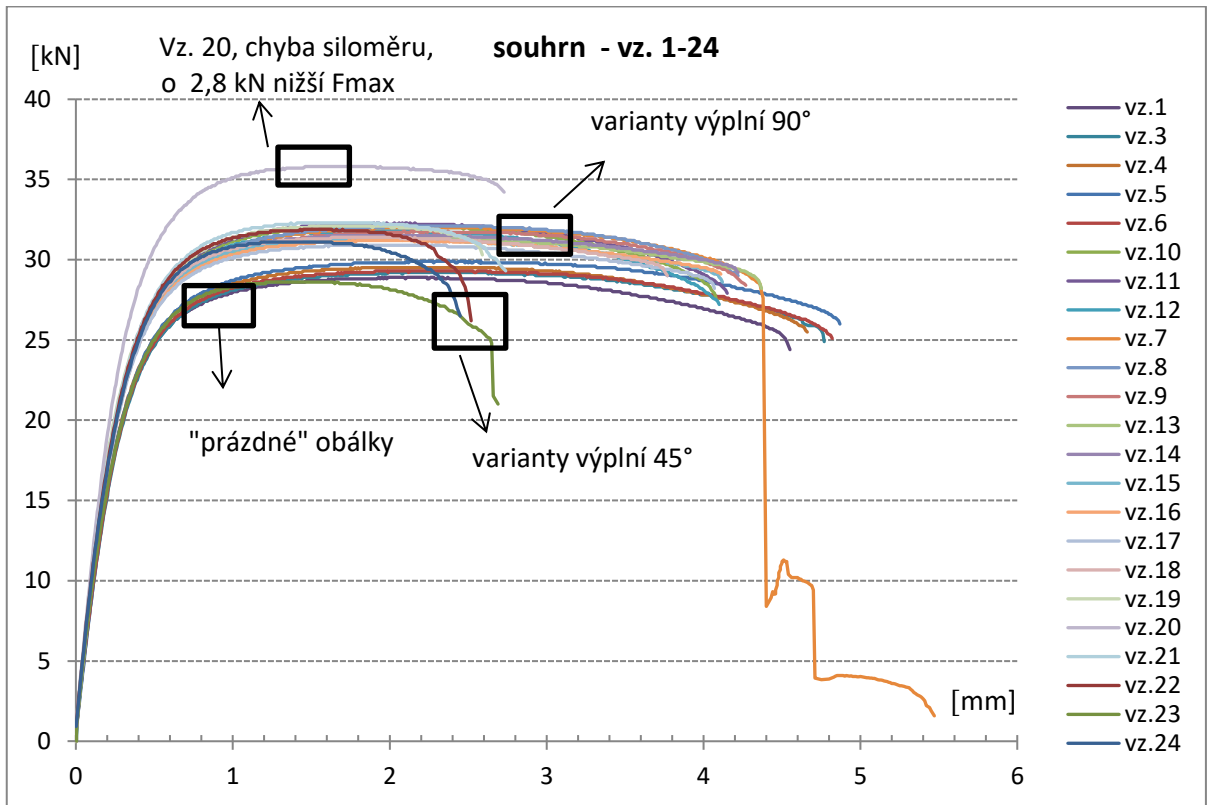
- [30] AREMU, Adedeji, Ian MASKERY, Chris TUCK, Ian ASHCROFT, Ricky WILDMAN a Richard HAGUE. A comparative finite element study of cubic unit cells for selective laser melting. 25th Solid Freeform Symposium. University of Texas at Austin, 2014 [online]. 2014, 1238-1249 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-097-Aremu.pdf>
- [31] ČSN ISO 10275. *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [32] PLUHAŘ J., PUŠKÁR A., Koutský J., Macek K., Beneš V.: *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní a hutní fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [33] Zetek M., Purš H.: Podklady v rámci dílčí výzkumné zprávy projektu „3D tisk výpočtově optimalizovaných kovových součástí s využitím technologie DMLS“, Program TRIO - FV30149, RTI, ZČU.

## **PŘÍLOHY**

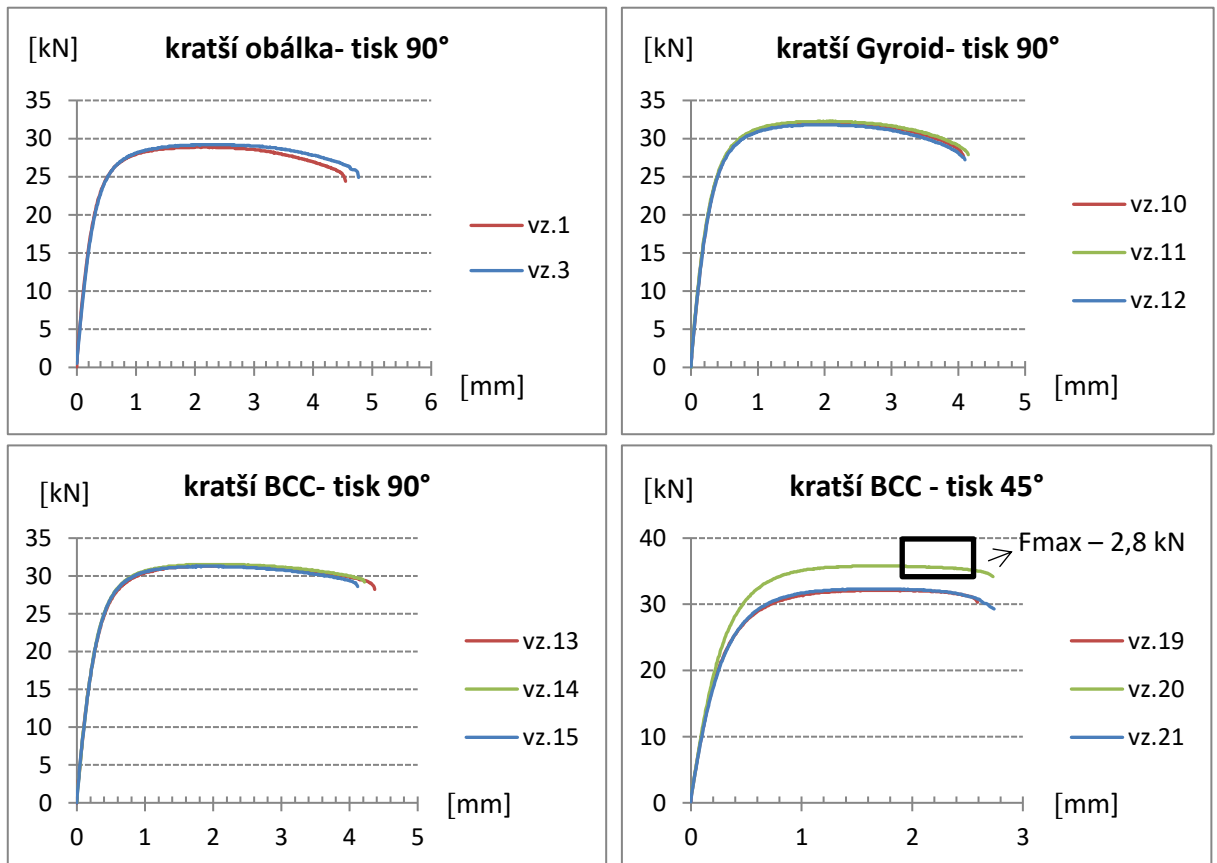
Příloha A – Tahové křivky válcových vzorků [29].....	77
Příloha B – Tahové křivky plochých vzorků .....	81



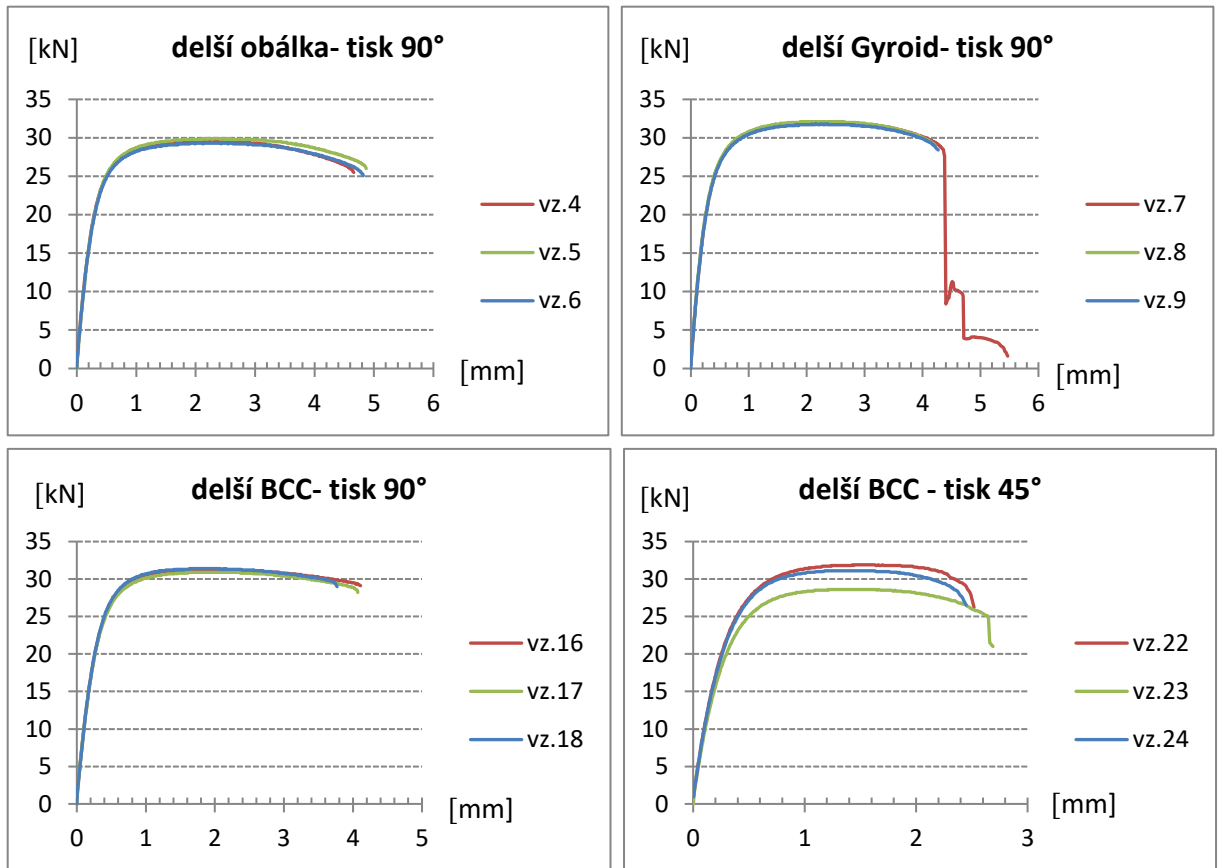
# PŘÍLOHA A – Tahové křivky válcových vzorků [29]



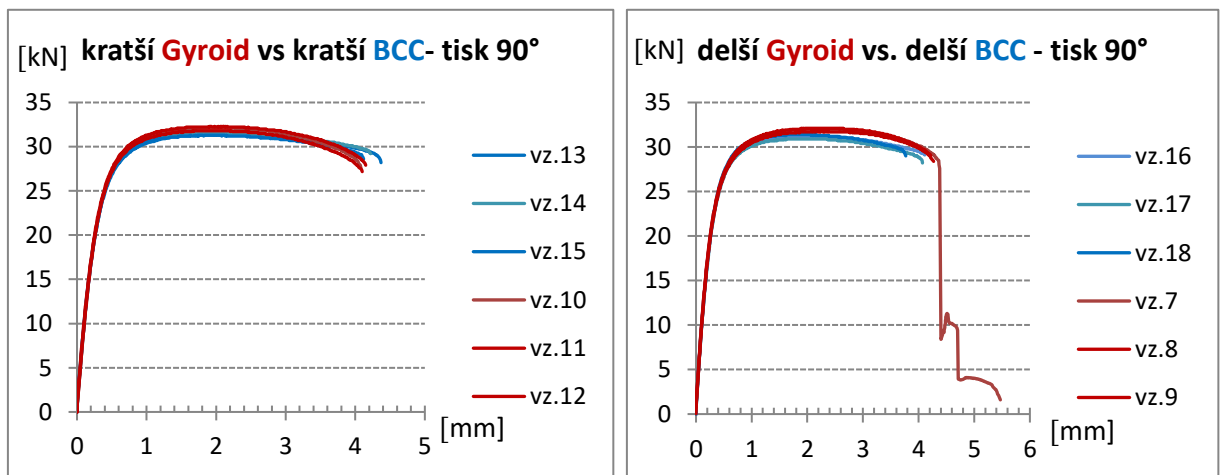
Graf 1 a – Souhrn tahových křivek



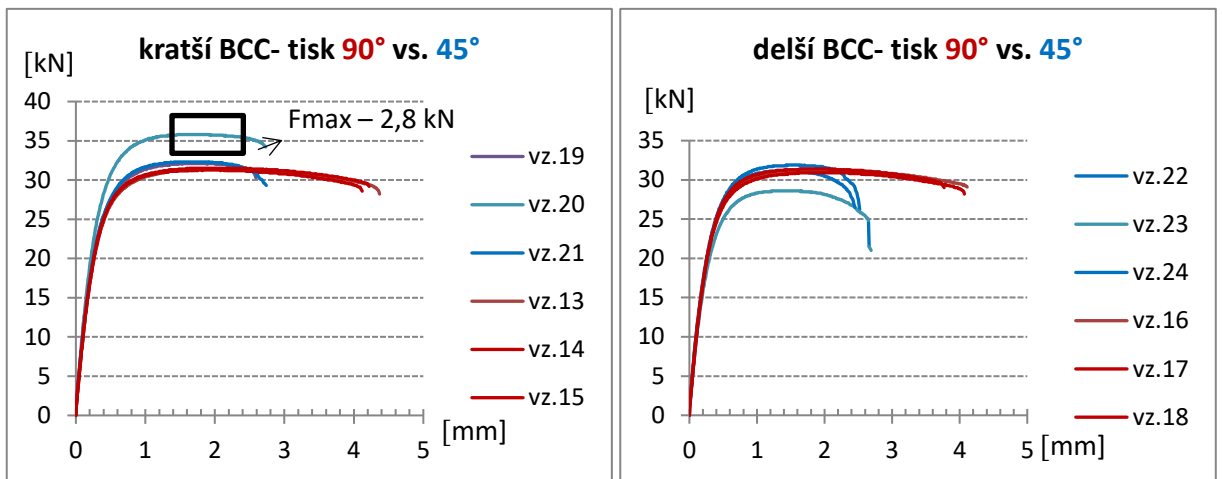
Graf 2-5 a – Tahové křivky vzorků se zkrácenou dutinou



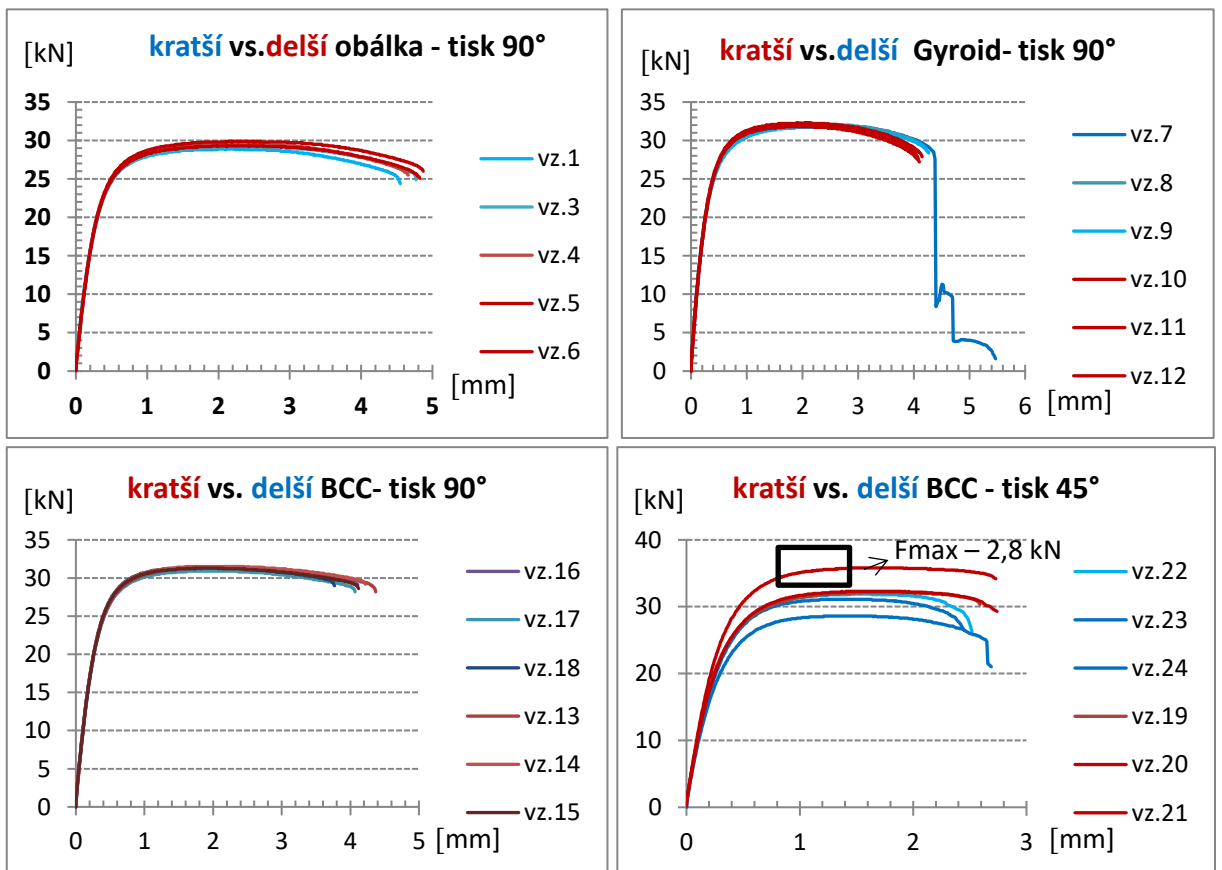
Graf 6–9 a – Tahové křivky vzorků s dlouhou dutinou



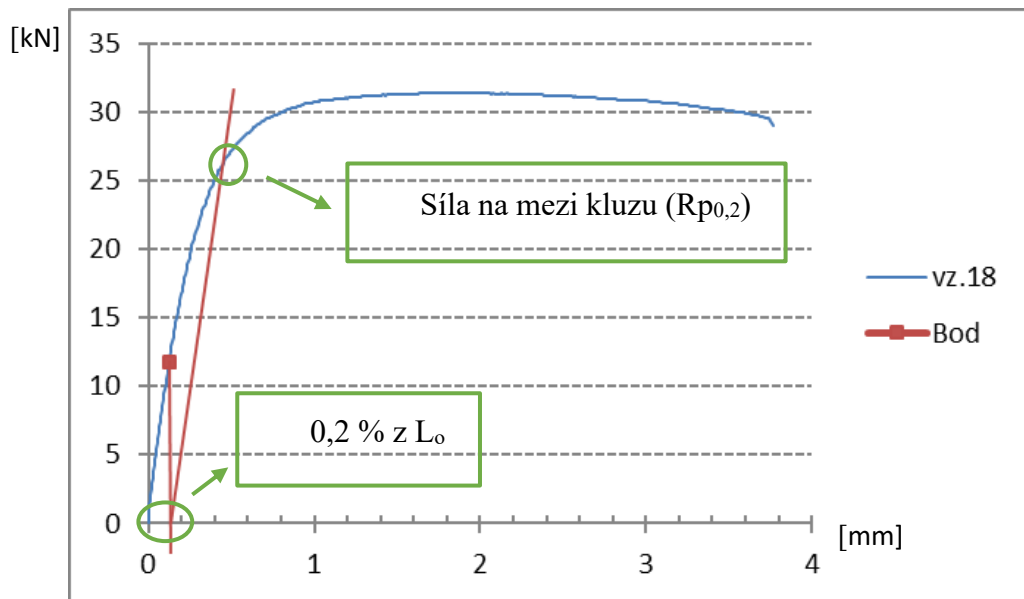
Graf 10–11 a – Tahové křivky porovnání gyroid vs. BCC 90°



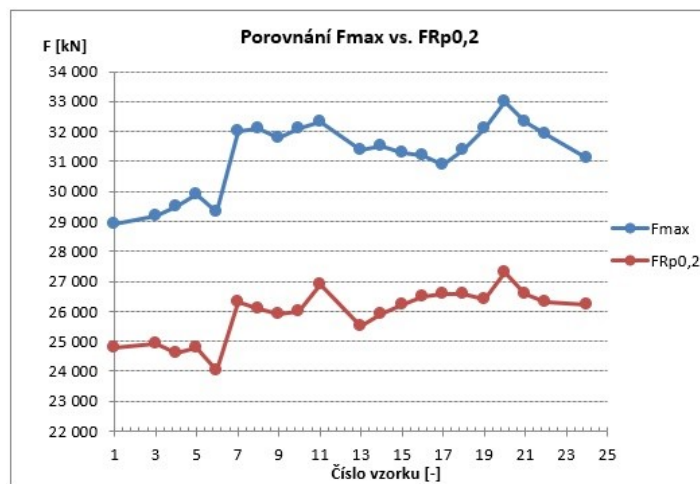
Graf 12–13 a – Tahové křivky, porovnání orientace tisku BCC



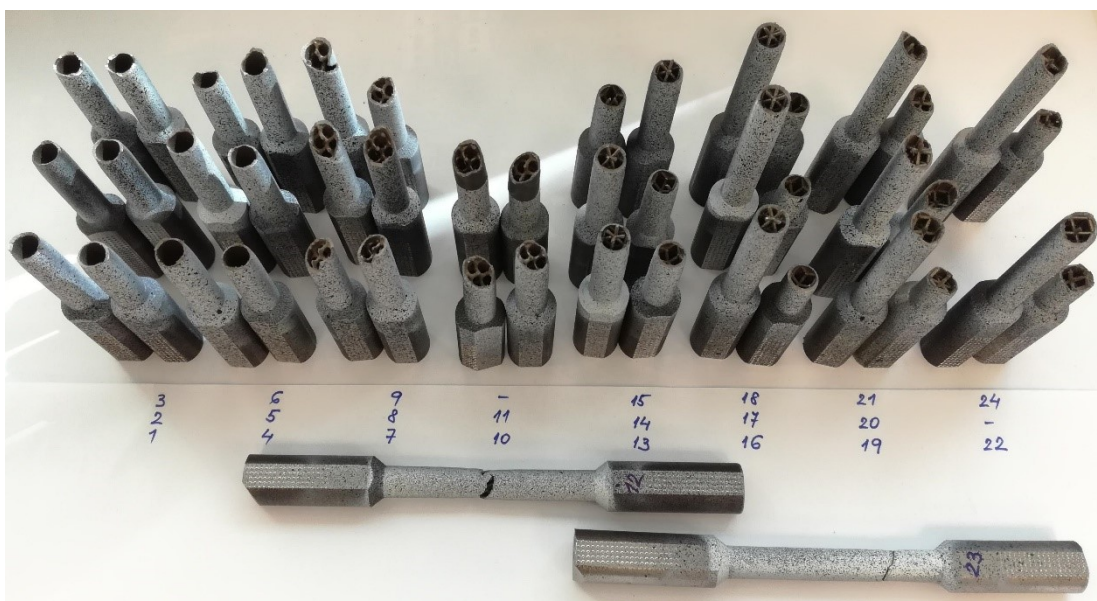
Graf 14–17 a – Tahové křivky, porovnání délky dutiny



Graf 18 a – Ukázka odečtu síly na  $R_{p0,2}$  válcových vzorků

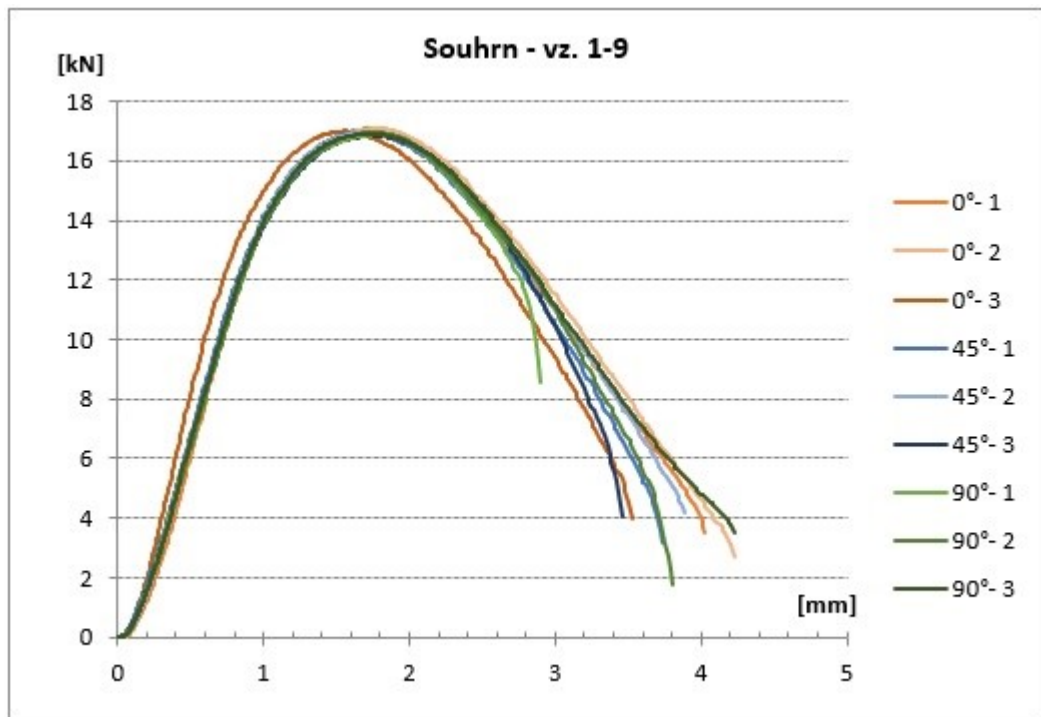


Graf 19 a – Porovnání  $F_{max}$  a  $F_{Rp0,2}$

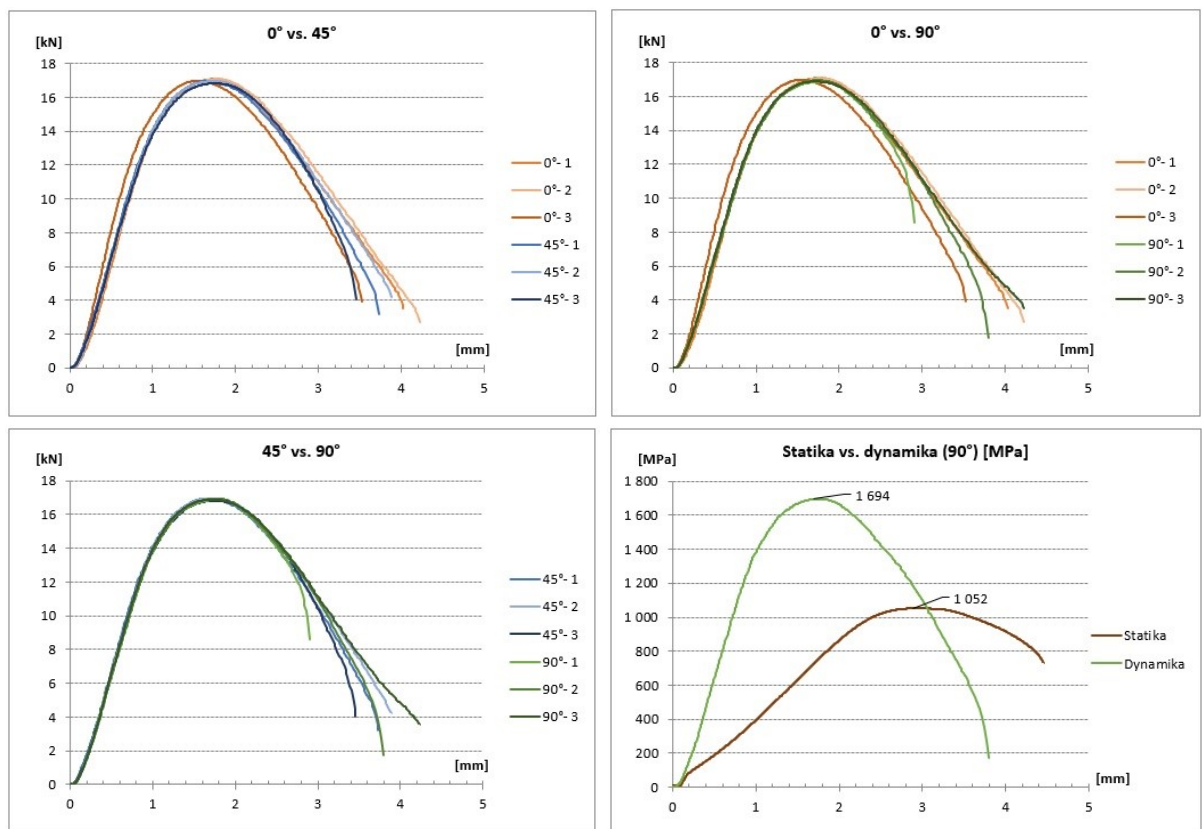


Obr. 1 a – Foto vzorků po zkoušce

# PŘÍLOHA B – TAHOVÉ KŘIVKY PLOCHÝCH VZORKŮ



Graf 1 b – Souhrn tahových křivek



Graf 2-5 b – Porovnání orientace tisku + statika vs. dynamika