

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie - obrábění

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vliv technologie výroby na pevnost šroubů z Inconelu 718

Autor: **Jakub DVOŘÁK**  
Vedoucí práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**  
Konzultant: **Ing. Jiří Sís (firma WTE)**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub DVOŘÁK**  
Osobní číslo: **S19B0409P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Téma práce: **Vliv technologie výroby na pevnost šroubů z Inconelu 718**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Porovnání různých technologií
4. Zhodnocení
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

#### Seznam doporučené literatury:

- ROSEN, D., STUCKER, B., GIBSON, I. Additive Manufacturing Technologies. New York: Springer, 2014.
- KUMAR, J., L., PANDEY, P., M., WIMPENNY, D., I. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. Singapur: Springer, 2018.
- DMLS Prototypes. THE CASTING COMPANY, INC. [online]. Dostupné z: <https://thecastingcompanyinc.com>.
- JIANG, Jingchao, Xun XU a Jonathan STRINGER. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review [online]. 2018-09. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- VERMA, Anoop, Satish TYAGI a Kai YANG. Modeling and optimization of direct metal laser sintering process [online]. 2014-08. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- MACHEK, Václav. Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Sís**  
WTE PowerBolt, s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za veškerou pomoc a informace, které mi poskytla během jejího zpracování. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Matěji Rottovi za cenné rady a pomoc při přípravě praktické části.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Dvořák	Jméno Jakub	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková, Ph.D.	Jméno Ivana	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv technologie výroby na pevnost šroubů z Inconelu 718		

<b>FAKULTA</b>	strojí	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	--------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	67	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	67	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>V této bakalářské práci bude porovnána výroba šroubů z Inconelu 718® zhotovených aditivní metodou a šroubů zhotovených konvenčními metodami výroby (třískovým obráběním a tvářením), dále se bude zabývat optimalizací navržených podpůrných struktur šroubů se závitem M12g6 pro aditivní metodu výroby pro zajištění požadovaných mechanických vlastností, minimalizaci chyb při tisku a snížení následných dokončovacích operací</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>aditivní technologie, Inconel, DMLS, SLM, závity</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Dvořák	Name Jakub		
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 „Manufacturing processes – Technology of Metal Cutting“			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková, Ph.D.	Name Ivana		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Influence of the manufacturing technology on bolt strength made of Inconel 718			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	67	<b>TEXT PART</b>	67	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor's thesis deals with comparison of bolts made of Inconel 718 made by additive technology and conventional technologies (machining, forming), further, it deals with optimization of designed support structures for M12g6 bolts, ensuring the required mechanical properties, elimination of print faults and minimalizing postprocess needs.
<b>KEY WORDS</b>	Additive technology, Inconel, DMLS, SLM, thread

## Obsah

Prohlášení o autorství .....	2
Obsah .....	6
Přehled použitých zkratk a symbolů .....	8
1 Úvod .....	9
2 Rozbor současného stavu.....	10
2.1 Vlastnosti slitiny Inconel .....	10
2.1.1 Inconel 600®.....	10
2.1.2 Inconel 625®.....	10
2.1.3 Inconel 718®.....	11
2.2 Inconel 718®.....	12
2.2.1 Tepelné zpracování Inconelu 718® .....	12
2.2.2 Mechanické vlastnosti Inconelu 718® .....	14
2.2.3 Vlastnosti Inconelu 718® při tváření za tepla a za studena.....	15
2.2.4 Vlastnosti Inconelu 718® při třískovém obrábění .....	16
2.3 Aditivní technologie výroby .....	17
2.3.1 Popis technologie .....	17
2.3.2 Podpůrné konstrukce .....	18
2.3.3 Podpůrné struktury typu line.....	18
2.3.4 Podpůrné struktury typu block.....	19
2.3.5 Další podpůrné struktury .....	20
2.3.6 Povrch součásti z Inconelu 718® vyrobených technologií AM .....	23
2.3.7 Mechanické vlastnosti součástí z Inconelu 718® vyráběných aditivní technologí .....	24
2.4 Výroba Inconelových šroubů třískovým obráběním .....	24
2.4.1 Výroba těla šroubu z Inconelu 718® .....	24
2.5 Výroba Inconelových šroubů tvářením .....	25
2.5.1 Popis technologie .....	25
3 Porovnání možných technologií.....	27
3.1 Šrouby vyrobené tvářením.....	27
3.2 Šrouby vyrobené třískovým obráběním .....	30
3.3 Šrouby vyrobené aditivní technologií .....	31
3.3.1 1. tisk .....	32



3.3.2	2. tisk .....	33
3.3.3	3. tisk .....	35
3.3.4	4. tisk .....	36
3.3.5	5. tisk .....	37
3.3.6	6. Tisk .....	39
3.3.7	7. tisk .....	40
4	Zhodnocení .....	56
4.1	Výběr variant z hlediska mechanických vlastností šroubů .....	56
4.2	Výběr variant z hlediska ekonomičnosti výroby .....	57
4.2.1	Náklady na polotovar .....	57
4.2.2	Čas výroby .....	58
4.2.3	Práce člověka .....	58
4.2.4	Odpadní materiál .....	58
4.3	Další postup řešení .....	59
5	Závěr .....	60
	<b>Použitá literatura</b> .....	61
	Seznam obrázků .....	63
	Seznam tabulek .....	65

## Přehled použitých zkratk a symbolů

3D	Three Dimensional	-
CAD	Computer-aided design	-
SLM	Selective Laser Melting	-
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	-
Inc718	Inconel 718®	-
MS1	nerozová ocel W-Nr. 1.2709	-
HRC	tvrdost dle Rockwellovy zkoušky	-
HB	tvrdost dle Brinellovy zkoušky	-
CNC	Computer Numeric Control	-
Rm	mez pevnosti	[MPa]

## 1 Úvod

S rostoucími požadavky na kvalitu zpracování a výsledných vlastností se do výroby zavádí specializované stroje pro výrobu aditivní technologií, které umožňují výrobu součástí, které by konvenčními výrobními technologiemi nebylo možné vyrobit, nebo by jejich výroba byla velice složitá, zdoluhavá a tím i finančně náročná. Použití aditivní technologie přináší možnosti použití těžko obrobitelných materiálů, vytvoření tvarově složitých ploch, žebrování, výdutí apod. Použitím aditivní technologie je možno snížit množství odpadního materiálu, je umožněna výroba atypických rozměrových řad standartních součástí, pro které by bylo obtížné najít vhodný polotovár, při správném návrhu je možno snížit hmotnost součástí pomocí odlehčení, a to při zachování požadované tuhosti a pevnosti. A právě díky těmto výhodám, které aditivní technologie poskytuje, byla tato technologie zvolena jako technologie výroby šroubů, kterou tato bakalářská práce popisuje.

Cílem této práce je porovnat jednotlivé metody výroby šroubů ze speciální slitiny zvané Inconel 718®, kterou vyvinula výzkumná skupina ve firmě Wiggin Alloys (Hereford, Anglie), poté byla převzata firmou Special Metals Corporation. Společnost Special Metals Corporation, sídlem v Huntingtonu, USA, se zabývá vývojem a výrobou speciálních slitin, např. Inconel®, Incoloy®, Nimonic®, Monel® a Udimet®, které dodává ve formě různých polotovarů a v různém tepelném zpracování. Tyto slitiny jsou používány ve velice širokém spektru oblastí průmyslu.

V této bakalářské práci bude porovnána výroba šroubů z Inconelu 718® zhotovených aditivní metodou a šroubů zhotovených konvenčními metodami výroby (třískovým obráběním a tvářením). Dále se práce bude zabývat optimalizací navržených podpůrných struktur šroubů se závitem M12g6 pro aditivní metodu výroby pro zajištění požadovaných mechanických vlastností, minimalizaci chyb při tisku a snížení následných dokončovacích operací (operace spojené s odstraněním podpor, doříznutí nebo kalibrací závitu apod.).

Zadavatelem práce je společnost WTE Powerbolt s.r.o., sídlem v Českém Brodě, která se zabývá výrobou spojovacího materiálu ze speciálních slitin a obráběním speciálních slitin.

Výstupem práce je stanovení podmínek a konkrétního řešení výroby aditivní technologií, porovnání navržených způsobů výroby s konvenčními metodami a volba nejvýhodnější varianty. Metody výroby budou porovnány z hlediska přesnosti výroby, mechanických vlastností výsledného produktu, konkrétně pevnosti v tahu, dále budou vzorky porovnány z hlediska ekonomičnosti výroby, a to z hledisek pořizovacích nákladů na technologii, množství odpadního materiálu, náročnosti postprocesu a samotných nákladů na výrobu jednoho šroubu. Tyto způsoby výroby budou následně vyhodnoceny bodovou metodou.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Vlastnosti slitiny Inconel

Inconel je slitina s hlavním obsahem prvků niklu a chromu, kde nikl převládá. Poměr těchto dvou hlavních prvků se liší dle konkrétní slitiny. Obecně jsou tyto slitiny korozivzdorné a jsou vhodné pro aplikace v extrémním prostředí, kde jsou vystavené vysokým tlakům a teplotám. Při vysokých teplotách si slitina vytvoří ochranou, stabilní vrstvu oxidů na svém povrchu, která brání hlubšímu poškození. Inconel si zachovává pevnost svou pevnost ve velkém rozsahu teplot i tam, kde by běžné oceli a slitiny hliníku nebylo možné použít.

Nejčastěji používané slitiny jsou Inconel 600®, Inconel 625® a Inconel 718®. Tyto slitiny se používají v různých oblastech průmyslu. Běžné je použití v turbínách jako materiál pro výrobu lopatek turbín, dále může být použit na výrobu rotorů u vysokotlakých kompresorů, na výrobu spojovacího materiálu pro vysokoteplotní aplikace, různé aplikace najdeme i v chemickém průmyslu, tepelných výměníků ve výrobě tlakových nádob a v jaderném průmyslu.

#### 2.1.1 Inconel 600®

Slitina Inconel 600 je tvořena niklem (spolu s kobaltem, minimálně 72 %), chromem (14-17 %) a železem (6-10 %) jako hlavními prvky, jako vedlejší prvky obsahuje mangan (max. 1%), měď (max 0,5 %), křemík (max 0.5 %), uhlík (max 0,15 %) a síru (max 0,015 %). Jedná se o standardní konstrukční slitinu pro aplikace vyžadující odolnost proti korozi a vysokým teplotám. Tato slitina má skvělé mechanické vlastnosti a reprezentuje výhodnou kombinaci vysoké pevnosti a dobré zpracovatelnosti. [7]

Vysoký obsah niklu zajišťuje korozivzdornost proti mnoha organickým i anorganickým sloučeninám. Chrom způsobuje odolnost proti sirnatým sloučeninám a zajišťuje odolnost proti oxidaci za vysokých teplot a roztokům způsobující korozi. Tuto slitinu není možné precipitačně vytvrzovat, je jí možné vytvrdit pouze tvářením za studena. [7]

Univerzálnost materiálu Inconel 600® vedla k jeho použití v různých oblastech průmyslu zahrnujících použití za kryogenických teplot a teplot až do výše 1095 °C. [7]

Tato slitina je často využívána v chemickém průmyslu pro její pevnost a korozivzdornost, konkrétně na ohříváče, destilační přístroje, kondenzátory pro zpracování mastných kyselin, potrubí odpařovačů aj. Pevnost a korozivzdornost při vysokých teplotách je vhodná pro oblast tepelného zpracování, konkrétně pro části pecí, pro zásobníky a pro koše používané při tepelném zpracování. Je to standardní materiál použitý při výrobě jaderných reaktorů pro jeho odolnost proti korozi za přítomnosti vysoce čisté destilované vody. Slitina pro použití v jaderném průmyslu je produkována pod označením Inconel 600T®. [7]

#### 2.1.2 Inconel 625®

Slitina Inconel 625 je tvořena niklem (min. 58%), chromem (20-23%), molybdenem (8-10%) a železem (max 5%) jako hlavními prvky, jako vedlejší prvky obsahuje niobium a tantal (3,15-4,15%), uhlík (max 0.1%), mangan (max. 0,5%), křemík (max. 0,5%), fosfor (max 0,015%), síru (0,015%), hliník (max 0,4%) a titan (max 0,4%). Jedná se o slitinu s vysokou pevností, výbornou zpracovatelností a nesmírnou korozivzdorností. Provozní teploty se pohybují mezi kryogenickými teplotami a teplotami dosahující 982°C. [8]

Pevnost slitiny je způsobena vyztužujícím efektem molybdenu a niobu v nikl-chromové mřížce. Z tohoto důvodu není potřeba provádět precipitační vytvrzování. Tato kombinace prvků je také zodpovědná za neskutečnou odolnost proti široké škále korozních prostředí neobvyklých intenzit, a také proti vysokoteplotní vlivům jako například oxidaci nebo karburizaci. [8]

Díky těmto vlastnostem je Inconel 625® výbornou volbou pro použití pro aplikace v mořské vodě, a to také pro svou odolnost proti důlkové a štěrbinové korozi, vysokou pevnost při korozivní únavě a vysoké pevnosti v tahu. Je používána pro výrobu kotevních lan, lopatek lodních šroubů pro motorové hlídkové čluny, opláštění podvodních kabelů pro komunikaci, pomocných motorů ponorek a pro další aplikace ve vojenském námořním průmyslu. [8]

Tato slitina je využívána také v letectví pro svou vysokou pevnost v tahu, odolnost proti tečení a excelentní odolnosti proti únavě a tepelné únavě, korozivzdornosti, výborné svařitelnosti a pájitelnosti. Konkrétně je využívána při výrobě systémového potrubí a výfukové soustavy letadel, odporově svařovaných plástvových struktur pro ovládání skříně motoru, palivové a hydraulické ústrojí, hadic pro výměníky tepla. Je také vhodná jako materiál pro vložky přechodu spalovacího systému, těsnění turbín a lopatek kompresorů. [8]

### 2.1.3 Inconel 718®

Slitina Inconel 718® je tvořena niklem (50-55%) a chromem (17-21%) jako hlavními prvky, jako vedlejší prvky obsahuje niobium a tantal (4,75-5,5%), molybden (2,8-3,3%), titan (0,65-1,15%), hliník (0,2-0,8%), kobalt (max 1%), uhlík (max 0,08%), mangan (0,35%), křemík (max 0,35%), fosfor (max 0,015%), síru (max 0,015%), bór (max 0,006%) a měď (max 0,30%). Jedná se o slitinu s vysokou pevností a korozivzdorností. Provozní teploty se pohybují mezi teplotami -452,78°C a 704°C. Hustota slitiny se pohybuje v rozmezí 8193,2 – 8220,9 kg/m<sup>3</sup> v závislosti na tepelném zpracování. Teplota tání je pohybuje v rozmezí 1260°C – 1336 °C. [9] [10]

Vytvrzení stárnutím je snadno dosažitelné i v případě tvarově složitých součástí. Díky své dobré pevnosti v tahu, při únavě materiálu, při tečení a vysoké mezi tvorby trhlin je používán v celé řadě případů. Pro své vlastnosti je používána například u raket s kapalným palivem, kroužků, pláště a různé plechových součástí pro letecký průmysl a plynové turbíny, pro kryogenické nádoby, je také používána pro výrobu spojovacího materiálu. [9] [10]

Právě díky jeho vysoké pevnosti v tahu a pevnosti při opakovaném namáhání byl tento materiál zvolen pro výrobu šroubů, kterými se tato bakalářská práce zabývá.

Detailněji bude Inconel 718® popsán v kapitole 2.2 .

## 2.2 Inconel 718®

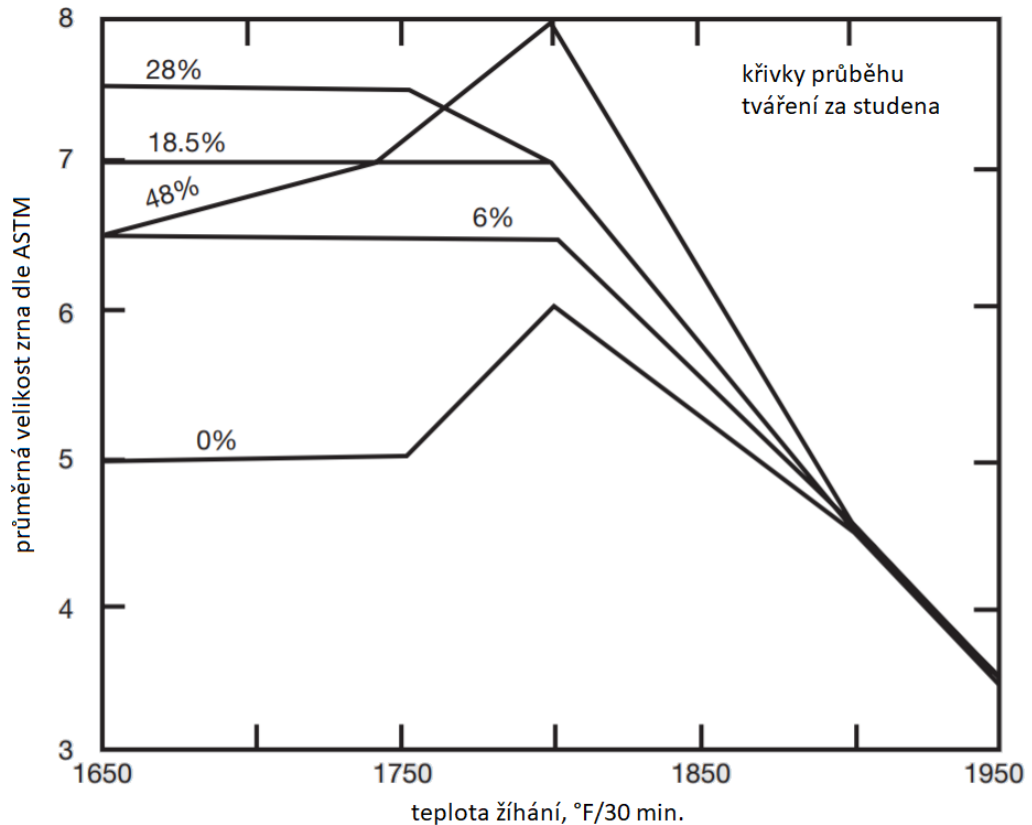
### 2.2.1 Tepelné zpracování Inconelu 718®

Pro většinu aplikací se Inconel 718® zpracovává žíháním a precipitačním vytvrzováním (jiným názvem vytvrzování stárnutím). Tato slitina je vytvrzována druhou precipitační fází do kovové mřížky. Precipitace fází niklu-(hliníku, titanu, niobia) jsou vyvolány tepelným zpracováním při teplotách mezi 593°C a 815°C. Složky účastníci se procesu (hliník, titan, niob) precipitační reakce musí tvořit roztok (musí být rozpuštěny v mřížce). Pokud jsou sloučeny jako další fáze nebo jsou jiným způsobem sloučené, nebude dosaženo správné precipitace a tím i požadované pevnosti slitiny. Pro správné chování složek je nutné nejdříve materiál vyžít. [9]

Nejvíce jsou používány tyto dva procesy tepelného zpracování:

- Žíhání při teplotách 1427°C – 1577°C s prudkým ochlazením nejčastěji do vody, Následuje precipitační vytvrzování při teplotě 1052°C po dobu 8 hodin, po zchlazení pece na 877°C je teplota na této hodnotě držena po celkovou dobu stárnutí 18 hodin, posledním krokem je zchlazení vzduchem. Tímto procesem je možné dosáhnout tvrdosti až 331 HB.[9]
- Žíhání při teplotách 1627°C – 1677°C s prudkým ochlazením nejčastěji do vody, Následuje precipitační vytvrzování při teplotě 1127°C po dobu 10 hodin, po zchlazení pece na 927°C je teplota na této hodnotě držena po celkovou dobu stárnutí 20 hodin, posledním krokem je zchlazení vzduchem. Tímto procesem je možné dosáhnout tvrdosti až 341 HB.[9]

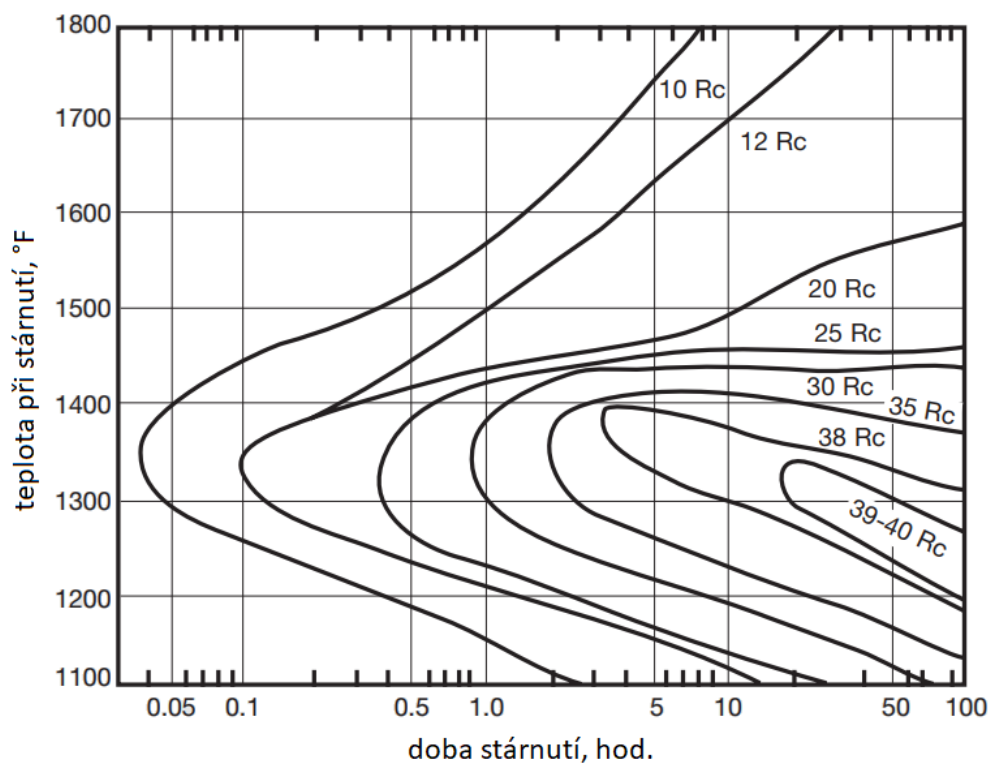
Rychlost ochlazování pece v průběhu stárnutí není kritická, ale je doporučeno zchlazování o přibližně 40°C za hodinu, avšak celková doba stárnutí by měla být dodržena. Při různých teplotách žíhání můžeme sledovat různou velikost zrna. Vliv teploty žíhání na velikost zrna je znázorněn na Obr. 1. [9]



Obr. 1: Vliv teploty žhání na velikost zrna [9]

Odezva slitiny s vytvrzené pomocí niobu, hliníku a titanu je pomalejší v porovnání se slitinami vytvrzenými pomocí hliníku a titanu. Tím pádem může být ve většině velikostech/objemech zahříván a ochlazován na a z teploty stárnutí normální rychlostí a stále si zachovat poddajnost a kujnost. [9]

V průběhu prvních 2-3 minut stárnutí není pozorováno žádné zvýšení tvrdosti, díky tomu je umožněno zahájení chlazení vzduchem po svařování nebo žhání. Tato závislost je znázorněna na Obr. 2. Slitiny vytvrzené pomocí hliníku a titanu mají dostatečný obsah vytvrzující fáze pro dosažení stejných hodnot pevnosti a plné tvrdosti jako ostatní slitiny Inconelu 718, a to za stejný čas. [9]



Obr. 2: Vliv teploty stárnutí na tvrdost slitiny [9]

Pokud bude materiál dále obráběn, tvářen nebo svařován je nakupován v podobě válcováním žíhaných nebo vyžíhaných pro snížení vnitřního pnutí. Materiál má po tomto tepelném zpracování nejlepší poddajnost. Po výrobě polotovaru může být dále tepelně zpracován dle požadavků a oblasti použití. [9]

### 2.2.2 Mechanické vlastnosti Inconelu 718®

Slitina Inconel 718® kombinuje excelentní mechanické vlastnosti napříč širokým rozpětím teplot s vynikající odolností proti oxidaci a korozi. Z tohoto důvodu je používána pro výrobu nejrůznějšího spojovacího materiálu pro aplikace s vysokým zatížením a nepříznivými podmínkami okolí. [9]

Tab. 1 obsahuje příklad mechanických vlastností materiálu Inconel 718® namáhaného tahem při pokojové teplotě, válcovaného za tepla, ve vyžíhaném stavu a ve stavu vyžíhaném a vytvrzeném stárnutím:

Stav materiálu	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu v tahu [MPa]	Poměrné prodloužení [%]	Poměrné zúžení [MPa]
Žíhaný	986,0	686,0	32,0	32,0
Žíhaný a vytvrzený	1318,6	1169,0	10,5	20,0

Tab. 1: Mechanické vlastnosti při namáhání tahem [9]



Pro aplikace, kde je kladen důraz na vysokou únavovou pevnost je vhodné dát přednost Inconelu 718® ve vyžíhaném stavu před stavem po vyžíhání a vytvrzení stárnutím. Stárnutí způsobí pouze malé zvýšení pevnost při únavě (méně než 30 MPa). Hlavní vliv na únavovou pevnost má velikost zrna. Nízkoteplotní tepelné zpracování podporuje tvorbu požadovaného jemného zrna. Tab. 2 obsahuje porovnání mechanických vlastností materiálu žíhaného a materiálu žíhaného a stárnutím vytvrzeného. [9]

Stav materiálu	Velikost zrna [mm]	Únavová pevnost [MPa] při:		
		10 <sup>6</sup> cyklech	10 <sup>7</sup> cyklech	10 <sup>8</sup> cyklech
Žíhaný	0,0584	510,2	465,4	458,5
Žíhaný a vytvrzený	0,0533	534,3	489,5	479,2

Tab. 2: Mechanické vlastnosti při únavovém namáhání [9]

### 2.2.3 Vlastnosti Inconelu 718® při tváření za tepla a za studena

Díky své pevnosti je Inconel 718® odolnější k deformacím než ostatní materiály při tváření za tepla. Je ale snadno tvářitelný, pokud je použito dostatečně výkonné vybavení. Pracovní teploty se pohybují v rozmezí 900 – 1120 °C. V poslední fázi tváření za tepla by měl být materiál pozvolně a rovnoměrně zpracovávám při postupně se snižující teplotou s konečnou teplotou v rozmezí 900-950 °C. Tento postup je nezbytný pro zajištění vrubové houževnatosti pro aplikace vyžadující materiál žíhaný a vytvrzený. Při zahřívání na pracovní teplotu by měl být materiál zahřát na požadovanou teplotu a ponechán na této teplotě po dobu nutnou pro zajištění homogenní struktury materiálu. [9]

Aby se předešlo dvojí struktuře zrna, mělo by v průběhu tváření být dosaženo jednotné redukce. Pro tváření v otevřených zápustkách je vhodný poměr redukce 20%, pro zápustky uzavřené je tento poměr 10%. Součásti by po tváření měli být spíše chlazeny vzduchem než kalené do vody. [9]

Je nutno sledovat teplotu během tváření, aby se předešlo přehřátí v důsledku akumulace tepla způsobené tvářením materiálu, na druhou stranu je také nutné při poklesu teploty pod teplotu přibližně 900°C součást znovu ohřát. Je doporučeno předešlým nástroje a zápustky na teplotu 260°C. Jakékoliv trhliny na povrchu materiálu, které se objeví v průběhu tváření, je nutno odstranit. [9]

Inconel 718 může být tvářen za studena běžnými metodami používané pro tváření ocelí a ocelí nerezových. [9]

#### **2.2.4 Vlastnosti Inconelu 718® při třískovém obrábění**

Třískové obrábění Inconelu 718 je náročné díky jeho vysoké pevnosti, ale zejména pracovní vytvrzování během obrábění, které musí být zohledněno při výběru vhodného materiálu břitů nástroje, kterým bude obráběn, při volbě pracovních podmínek obrábění a chlazení. Pro minimalizaci vlivu pracovního vytvrzování je nejvhodnější používat takové podmínky obrábění, které umožňují co největší odběr materiálu na jeden přejezd nástroje, to znamená minimalizování počtu přejezdů. [9]

Ve stavu žíhaném a vytvrzeném má slitina lepší finální kvalitu obrobeného povrchu v důsledku lepšího odlamování třísky na utvařeči třísek. V žíhaném stavu má materiál lepší obrobitelnost a životnost materiálu je větší. [9]

## 2.3 Aditivní technologie výroby

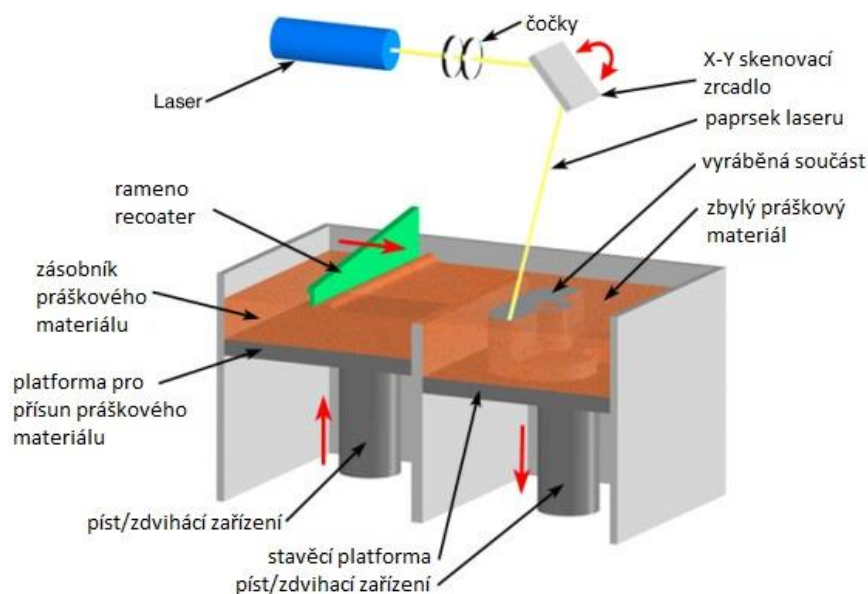
### 2.3.1 Popis technologie

Aditivní technologie výroby, výroba vrstvy po vrstvě, se v poslední době zařadila jako další metoda použitelná v sériové výrobě. Touto technologií je možné vyrábět součásti z nejdůležitějších materiálů, jako jsou například oceli, slitiny hliníku, titan a další, a to jako plné součásti, ale i součásti s dutinami, žebrováním, závity. Povrch takto vyrobených součástí mívá podobné vlastnosti jako je povrch součástí vyrobených odléváním. Pórovitost povrchu součástí vyrobené aditivní technologií je závislý na použitém práškovém materiálu a na parametrech tisku. [12] [13]

Aditivní technologie výroby lze rozdělit podle jejich podstaty a celkového stavu vstupního materiálu, také podle způsobu spojení jednotlivých vrstev materiálu. Při výrobě kovových částí se jako vstupní materiál využívá práškový kov, nebo i směs práškových kovů spíše než drátu (jako například u aditivní výroby součástí z plastů), které jsou pomocí laseru nebo elektronového paprsku nanášeny a roztaveny po jednotlivých vrstvách tvořící součást s téměř libovolnými tvary. [12] [13]

Vstupem technologie je 3D CAD model, který je vytvořen na počítači nebo pomocí 3D skenovací technologie. Model je poté virtuálně rozřezán na jednotlivé vrstvy s tloušťkou mezi 0,01 mm – 1 mm, v závislosti na použité metodě. Reálná součást je poté vytvořena nanášením jednotlivých vrstev materiálu a jejich lokálnímu tavení. [12] [13]

Metoda SLM (Selective Laser Melting) dovoluje výrobu součástí s vysokou vnitřní integritou za nízkou cenu a je kompatibilní s různými materiály. Jednou z výhod této metody je možnost různé kvality povrchu, kterou je zajištěna technická funkčnost, požadované tolerance i vzhled. Tato metoda využívá práškového kovu jako vstupního materiálu, který je nanášen na pracovní stůl ve vrstvě o tloušťkách mezi 20  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . Vysokovýkonný laser poté osvětluje povrch prášku, následkem vygenerovaného tepla se částice kovu roztaví a vytvoří tekutý kov. Poté je na stůl nanesena další vrstva a proces se opakuje, dokud není výrobek hotový. Přebytečný kovový prášek se odebere a může se znovu použít. Při metodě SLM je nutné používat ochranu atmosféru tvořenou inertním plynem, Argonem, aby nebyl ve výrobní komoře přítomen kyslík a nemohlo dojít k oxidaci výrobku. Finálním krokem je odstranění podporných struktur. [12] [13]



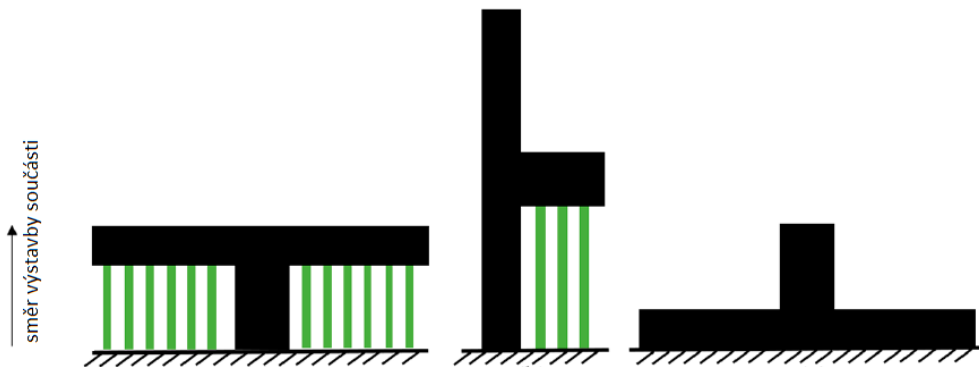
Obr. 3: Vizualizace SLM metody [13]

### 2.3.2 Podpůrné konstrukce

Jak již bylo zmíněno, technologie aditivní výroby umožňuje výrobu tvarově složitých součástí obsahující prvky jako například žebrování, odlehčení, výdutě, převislé tvary apod, je v některých případech nutné vytvořit podpůrnou konstrukci, která zabrání nebo výrazně zmírní následky způsobené tečením materiálu při samotném procesu výroby.

V ideálním případě by výrobek měl být opatřen takových množstvím podpůrných struktur, aby nedošlo k žádným deformacím. Tím ale narůstá objem odpadního materiálu a doba výroby a tím i cena výrobku. Proto je nutné optimalizovat podpůrnou strukturu součásti, a to například změnou tvaru podpůrné konstrukce a hustotou podpůrných konstrukcí. Při vhodně zvolené podpůrné konstrukci je možno dosáhnout stejných podpůrných vlastností při použití menšího objemu materiálu, nebo ještě dále zmenšit objem podpůrných konstrukcí při připuštění malých deformací, které však nebudou narušovat funkčnost součásti. [4] [12] [13] [16]

Orientace dílu na pracovní ploše hraje velikou roli při volbě druhu podpůrné konstrukce, ale má také vliv na finální vlastnosti výrobku, např. drsnost povrchu, čas výroby a cenu výrobku. Na Obr. 4 jsou znázorněny různé orientace výrobku tvaru „T“ a jeho nutných podpůrných konstrukcí. [4] [12] [13] [16]

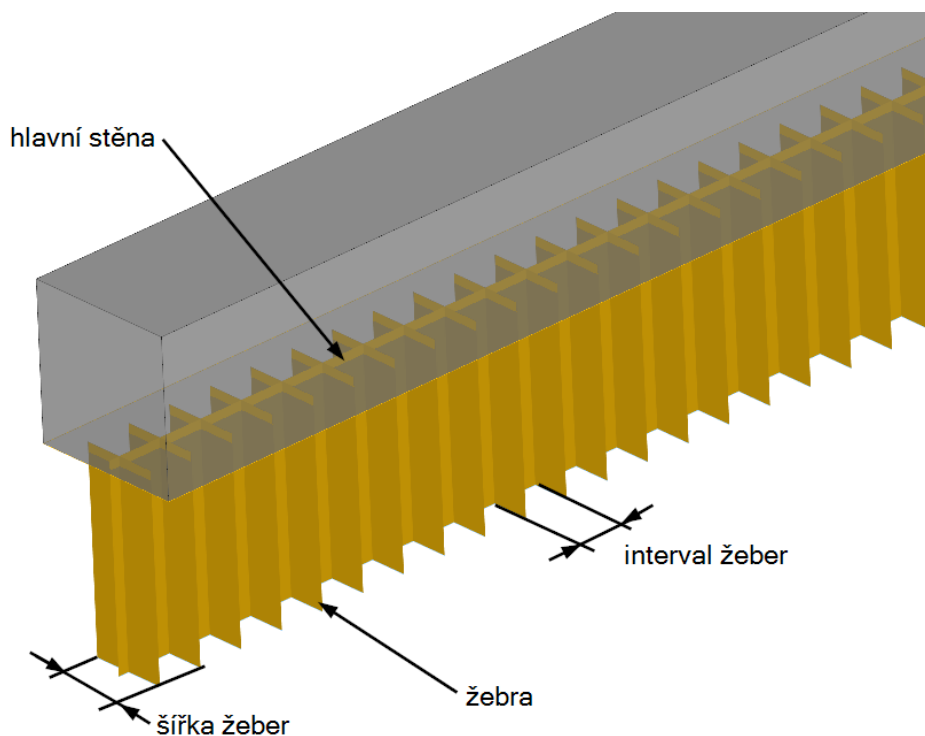


Obr. 4: Orientace součásti na pracovním stole [4]

### 2.3.3 Podpůrné struktury typu line

Podpůrné struktury typu line jsou konstrukčně velmi jednoduché podpory. Skládají se z hlavní stěny a mohou být při potřebě vyšší pevnosti a nosnosti vyztužena pomocí žebber. Tyto žebra mohou mít různou délku a mohou být po délce stěny umístěna v libovolných intervalech. Pro snazší odstranění podpor je možné ve styčné části stěny s povrchem součásti nadefinovat zuby, které sníží styčnou plochu podpor se součástí, v takovém případě již podpůrná struktura nemusí zaručovat dostatečné spojení součásti se stavěcí platformou a hrozí riziko utržení součásti při kontaktu s recoaterem.

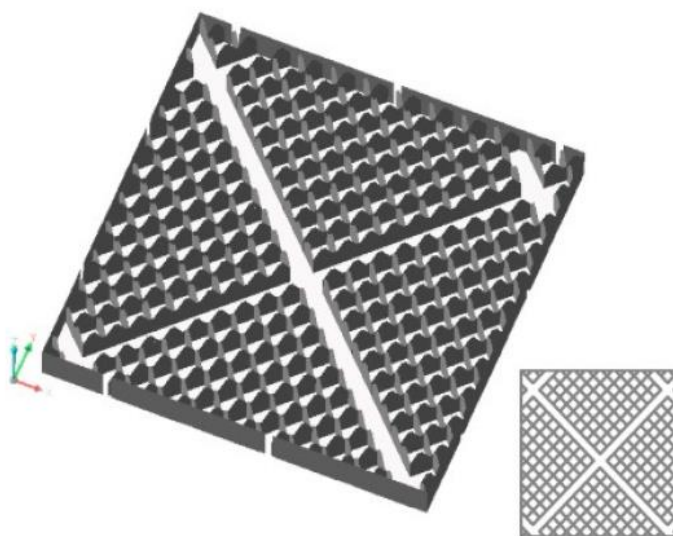
Podpory typu line s žebry jsou schematicky popsány na Obr. 5.



Obr. 5: Schéma podpor line s žebry

#### 2.3.4 Podpůrné struktury typu block

Často používaným typem podpůrných struktur jsou struktury typu block. Tyto podpůrné struktury se skládají z následujících částí: vnější hranice (border) a výplně (infill), a případě potřeby může být výplň rozdělena (fragmentace) na jednotlivé segmenty pro snadnější odstranění podpor po tisku. Příklad takovéto podpůrné struktury je znázorněn na Obr. 6. [18]



Obr. 6: Příklad podpůrné struktury typu block [21]

Skořepinu tvoří více vrstev na vnějším okraji podpůrné struktury. Pevnost skořepiny lze snadno zvýšit zvětšením tloušťky stěny bez nutnosti zvýšení hustoty výplně a tím vyšší spotřebě materiálu na výplň. Negativem zvětšování tloušťky stěny je pak nárůst výrobního času, času nutného pro postprocess pro odstranění zbytků podpůrných struktur a celkové spotřeby materiálu a tím i ceny. [18]

Při návrhu výplně je snaha zaujmout co nejmenší možný prostor při zachování potřebné pevnosti a tuhosti, aby se co nejvíce zkrátil čas potřebný pro vytištění součásti a snížila spotřeba materiálu. Na je vyobrazeno porovnání podpůrných struktur s 20% výplní (vlevo), s 50% výplní (uprostřed) a se 75% výplní (vpravo). Pokud porovnáme pevnost struktury s 50% výplní se strukturou s 25% výplní, struktura s 50% výplní je přibližně o 25% pevnější než struktura s 25% výplní. Pokud totéž porovnání provedeme mezi strukturami s 50% a 75% výplní, pevnost struktury s výplní 75% se zvýší přibližně o 10%. [18]



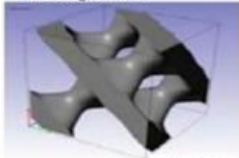

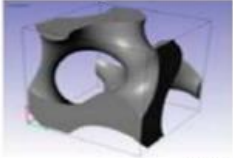
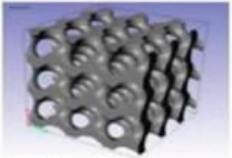
Obr. 7: Výplň struktury block [18]

Z výše uvedených důvodů je proto nezbytné zvolit vhodnou tloušťku skořepiny a vhodnou hustotu výplně pro optimální poměr pevnost a tuhosti ku spotřebě materiálu a délky tisku. Například při tisku prototypových dílů je možno zvolit nižší hustotu výplně, naopak při návrhu vysoce namáhaných součástí je vhodné zvolit výplň s vyšší hustotou.[18]

### 2.3.5 Další podpůrné struktury

Dalším používaným druhem podpůrných konstrukcí jsou konstrukce buňkové, které díky své podstatě snižují množství potřebného materiálu a tím snižují čas výroby, a i celkovou cenu výrobku. Další výhodou nízkého objemu podpůrných struktur je nízký čas nutný pro odstranění pomocných struktur po výrobě dílu. [4]

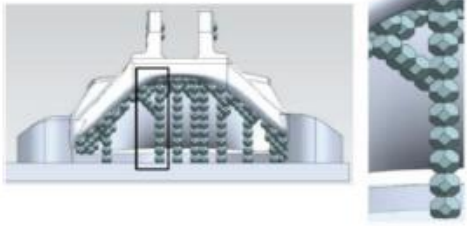
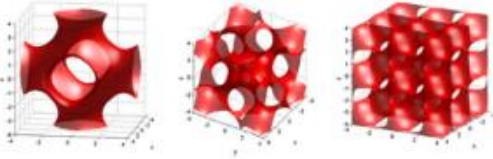


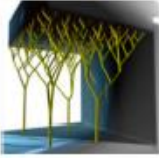


Jedním z druhů buňkových podpůrných konstrukcí jsou konstrukce mřížkové. Pro optimalizaci konstrukce z hlediska času výroby, při zachování strukturální integrity, jsou používány dva druhy mřížkových podpůrných struktur: tvar diamant a gyroid (viz Obr. 8). [4] [12] [16]

Support Methods	Suitable Techniques	Examples	
Lattice support [61]	Metal AM processes	 A single cell	 3x3x3 cells
		 A single cell	 3x3x3 cells

Obr. 8: Mřížkové struktury diamant a gyroid [4]

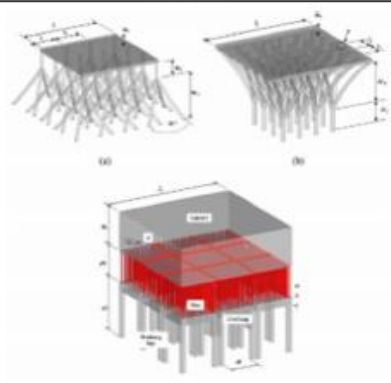
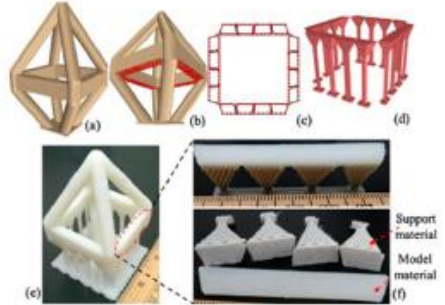
Nicméně, nízká hustota mřížkové struktury může být příliš křehká při nanášení více vrstev buněk. Nízká hustota struktury má také za následek horší odvod tepla a tím větší hodnoty vnitřního pnutí a větší odchylky. [4] [16]

Další typy podpůrných struktur jsou zobrazeny v přehledu na Obr. 9 a Obr. 10.

Support Methods	Suitable Techniques	Examples
Unit cell support [62]	All processes	
Cellular support [43]	SLM	
Honeycomb support [64]	FDM	
Sparse tree support [65]	FDM/DLP	
Tree-like support [66]	FDM	
Space-efficient branching support [67]	FDM	
Bridge support [68]	FDM	

Obr. 9: Typy podpůrných konstrukcí [4]

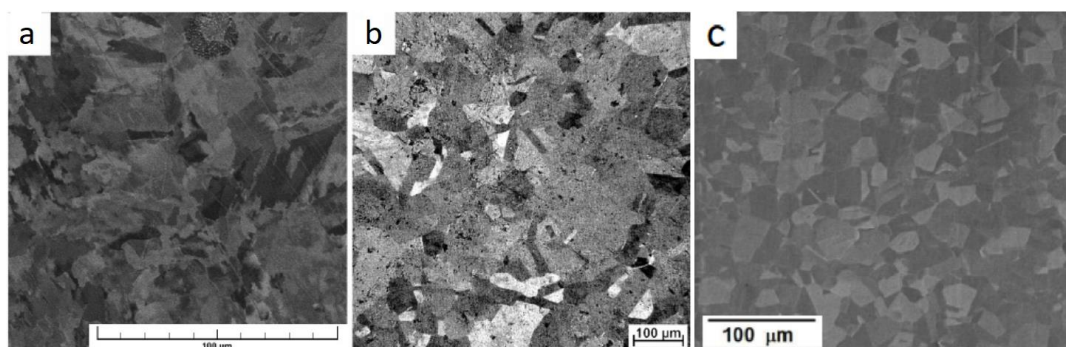


Support Methods	Suitable Techniques	Examples
"Y", "IY" and Pin support [70]	SLM	
Grain support [73]	FDM	

Obr. 10: Typy podpůrných struktur (pokračování) [4]

### 2.3.6 Povrch součástí z Inconelu 718® vyrobených technologií AM

Povrch součástí zhotovených aditivní technologií je nehledě na použitý materiál srovnatelný s povrchem odlévaných součástí. Porovnání mikrostruktur povrchu součástí z nerezové oceli vyráběné odléváním, kováním a aditivní technologií jsou uvedeny na. Povrch součásti tvoří jemnozrnná struktura, která může být vysvětlena rychlým tuhnutím materiálu, které je výsledkem přísunem energie (tepla) do velmi malé oblasti a malým množstvím roztaveného materiálu. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny řadou parametrů, například hustotou energie, tloušťkou nanášené vrstvy a teplotou předehřátí. Dalším faktorem je rozdíl v tepelných kapacitách okolního neroztaveného materiálu a již roztaveného tuhého materiálu tvořícího součást nebo podpory. Povrch součásti je také ovlivněn samotnou geometrií součásti a použitou metodou aditivní technologie (SML, DMLS, aj.). [12] [13]



Obr. 11: aditivní technologie (a), kování (b), odlévání (c) [22][23]

### 2.3.7 Mechanické vlastnosti součástí z Inconelu 718® vyráběných aditivní technologií

Při použití nízké energie zdroje tepla (laser nebo elektronový paprsek, typ v závislosti na použité technologii) nedochází k úplnému roztavení kovového prášku a tím může dojít ke snížení hustoty nebo vytvoření nehomogenní struktury materiálu součásti díky tvorbě tvarově nepravidelných dutin v materiálu. Při použití příliš velké energie zdroje tepla dochází k tvorbě větších lánů taveniny a větší pórovitosti povrchu díky úniku plynů vzniklých vypařováním materiálu. Tyto nerovnosti povrchu mohou být příčinou koncentrace napětí a tím zhoršit mechanické vlastnosti. Celková pevnost závisí na hustotě materiálu součásti ale také na struktuře povrchu vytvořeného během výroby. Při porovnání dvou součástí, jedné vyrobené klasickým odléváním a druhou, vyrobené aditivní technologií, součást vyrobená aditivní technologií má lepší vlastnosti povrchu součásti. Součásti vyrobené aditivní technologií mají obecně vyšší statickou pevnost než součásti vyrobené odléváním. Mechanické vlastnosti také závisí na orientaci nanášení vrstev materiálu. Například při nanášení vrstev materiálu kolmo na osu zatížení je pevnost v tahu nižší, zatímco při nanášení vrstev materiálu rovnoběžně s osou zatížení je pevnost v tahu vyšší. [12] [13]

## 2.4 Výroba Inconelových šroubů třískovým obráběním

Pro výrobu závitu na šroubech z Inconelu 718® může být použito soustružení nebo frézování. Díky své vlastnosti pracovního vytvrzování je nutné při obrábění zajistit co nejméně přejezdů, a to tak, že musí být zvýšen úbytek materiálu na jeden přejezd. Vlivem pracovního vytvrzování dochází k rychlému opotřebení nástroje a tím i nárůstu výrobní ceny. Proto je tato technologie využívána převážně v kusové výrobě, nebo při výrobě šroubů atypické rozměrové řady. Nástroje používané pro obrábění závitu na součástech z Inconelu 718® jsou většinou jednobřité. Příklad jednobřitého soustružnického nože pro tvorbu závitu viz Obr. 12.



Obr. 12 Jednobřitý soustružnický závitový nůž [11]

### 2.4.1 Výroba těla šroubu z Inconelu 718®

Pro výrobu těla šroubu lze využít metodu výroby tvářením za studena shodnou s metodou pro šrouby z oceli, ale s tím rozdílem, že je nutno použít ještě tvrdší a odolnější materiál na výrobu zápustky pro tvářením hlavy šroubu. Tato metoda však nelze využít při výrobě šroubů jakékoliv rozměrové řady, jelikož je na trhu omezená nabídka průměrů polotovarů z této slitiny. Pro rozměrové řady šroubů, pro které není na trhu odpovídající rozměr polotovarů je nutno polotovary obrábět třískovým obráběním na požadovaný průměr.

Obecně platí, že při obrábění Inconelu 718® je nutno dodržovat určité pravidlo z důvodu jeho pracovního vytvrzování, aby se omezilo rychlé opotřebení nástrojů. Je nutno snížit počet přejezdů, tím dojde ke snížení kontaktu nástroje s vytvrzenou vrstvou. Toho je dosaženo tak, že je zvětšena hloubka řezu.

Vzhledem k nepříznivým vlastnostem Inc718® pro třískovém obrábění je pro výrobu upřednostňována metoda válcováním.

## 2.5 Výroba Inconelových šroubů tvářením

Pro výrobu závitu šroubu lze využít metodu výroby odvalováním shodnou s metodou pro šrouby z oceli, ale s tím rozdílem, že je nutno použít ještě tvrdší a odolnější materiál na výrobu nástrojů pro tvářením závitu. Nevýhodou je, že pro některé průměry šroubů není na trhu vhodný polotovár, a proto se musí polotovár obrábět na požadovaný průměr, a tím stoupá výrobní čas i cena.

### 2.5.1 Popis technologie

Standartní proces výroby šroubů z různých druhů ocelí začíná rovnými dráty požadovaného (nominálního) průměru pro danou rozměrovou řadu, nařezaných na požadovanou délku. Tvářením za studena se v zápustce vytvoří hlava šroubu, zápustky pro tvorbu hlav šroubů mohou obsahovat až 200 částí v závislosti na konkrétním tvaru hlavy šroubu a jejich tolerance se pohybují v řádech setin až tisícín milimetru. Postupné tvářením hlavy závitu je zobrazeno na Obr. 13. [14] [15]



Obr. 13: Postupné tvářením hlavy šroubu

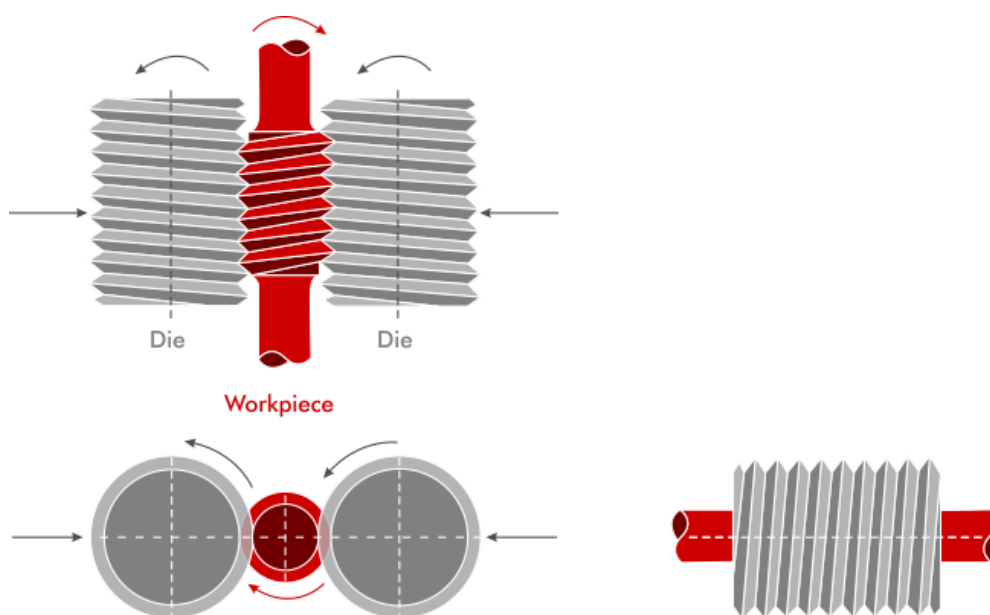
Použitím technologie tvářením za studena je možno proces zhotovením hlav šroubů automatizovat a tím získat veliký objem výrob a ve stejné kvalitě jednotlivých kusů.

Pro složitější tvary hlav šroubů nelze použít pouze tvářením za studena, ale je nutno do procesu zařadit i soustružení nebo vrtání. Vrtání lze použít pro tvorbu děr do šroubů, např pro závlačky. [14] [15]

Pro výrobu samotného závitu se v sériové výrobě používá technologie podobná tváření za studena, a to odvalování závitu. Závít je vytvořen odvalováním závitu mezi dvěma nástroji z vysoce tvrdého a odolného materiálu, které na styčných plochách s polotovarem mají zhotovený negativ závitu, a odvalením šroubu mezi těmito nástroji dojde k vytvarování závitu na šroubu. Používají se dva druhy nástrojů pro odvalování závitu: válcovací kotouče (Obr. 15) nebo ploché válcovací čelisti (Obr. 14). [14] [15]



Obr. 14: Ploché válcovací čelisti [15]



Obr. 15: Válcovací kotouče [14]

Tepelné zpracování může předcházet procesu tvorby závitu, ale může ho i následovat v závislosti na druhu tepelného zpracování a požadavcích na finální výrobek. Například u šroubů, které mají délku více než desetinásobnou průměru šroubu by tepelné zpracování mohlo způsobit zkřivení šroubu, a proto by muselo následovat rovnání šroubu. [14] [15]

### 3 Porovnání možných technologií

V této kapitole budou podrobněji popsány jednotlivé způsoby výroby šroubů z Inconelu 718®. Popsány budou jednotlivé procesy při výrobě šroubu a také jejich výsledné mechanické vlastnosti.

V další kapitole (kapitola 4) pak budou jednotlivé metody porovnány z hlediska mechanických vlastností a z hlediska finanční náročnosti metody. V podkapitole zabývající se výrobou šroubů aditivní technologií bude podrobněji popsán vývoj navržených podpor a jejich parametry.

Vzhledem k vlastnostem Inc718® při třískovém obrábění je před touto metodou vždy upřednostňována metoda tvářením, která je běžnou metodou výroby šroubů z Inc718®. Tato práce bude konkrétněji popisovat výrobu pomocí aditivní technologie jakožto alternativu k výrobě tvářením.

#### 3.1 Šrouby vyrobené tvářením

Pro účely experimentu byly jako testovací vzorky použity standardně vyráběné závitové tyče z materiálu Inc718® rozměrové řady M12 vyráběné firmou WTE Powerbolt s.r.o. s tepelným zpracováním dle ASTM B637. Níže v této kapitole je popsán postup výroby a tepelného zpracování.

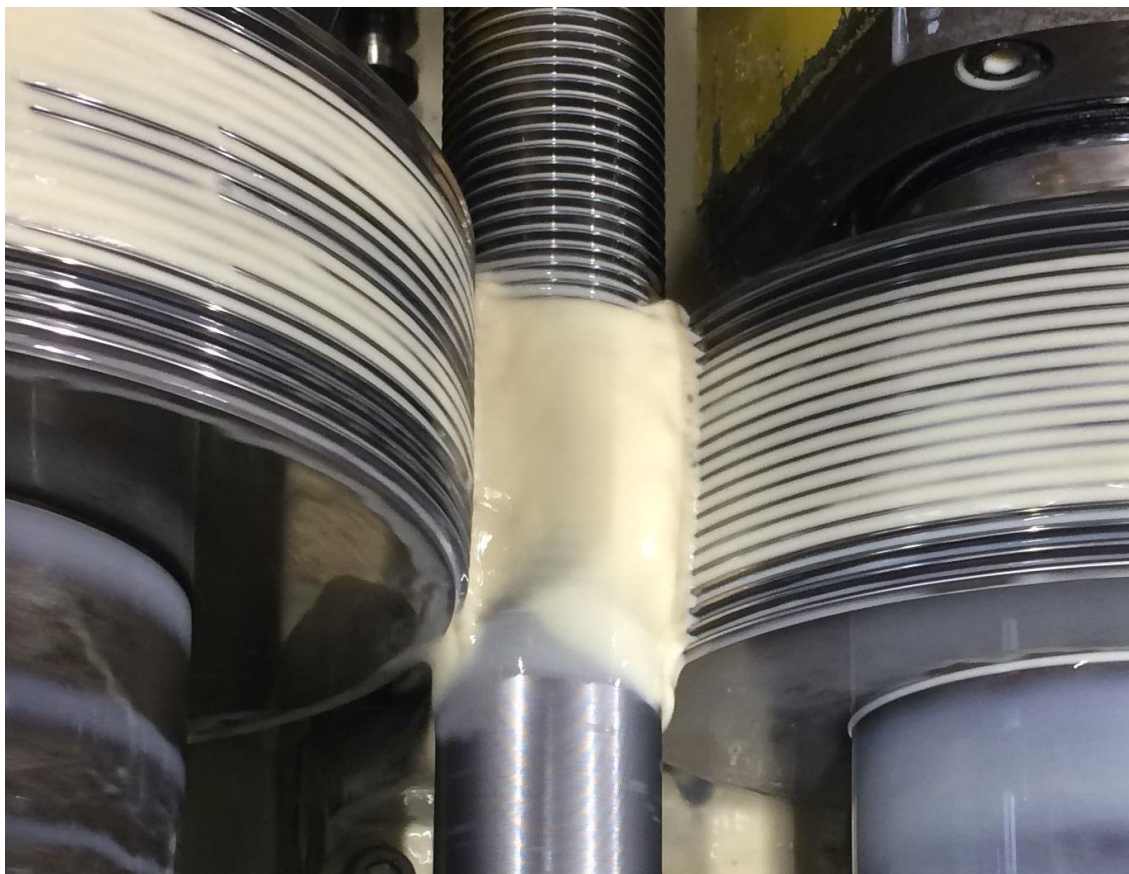
Proces výroby začíná polotovarem kruhového průřezu, který je následně obráběn do formy polotovaru závitové tyče (viz Obr. 16) na válcovací průměr, který odpovídá přibližně střednímu průměru závitu.



*Obr. 16: Polotovary pro válcování závitu*

*Tento polotovary se poté válcuje za studena mezi dvěma válcovacími kotouči (příklad na jiném typu výrobku viz Obr. 17). Stav po válcování viz*

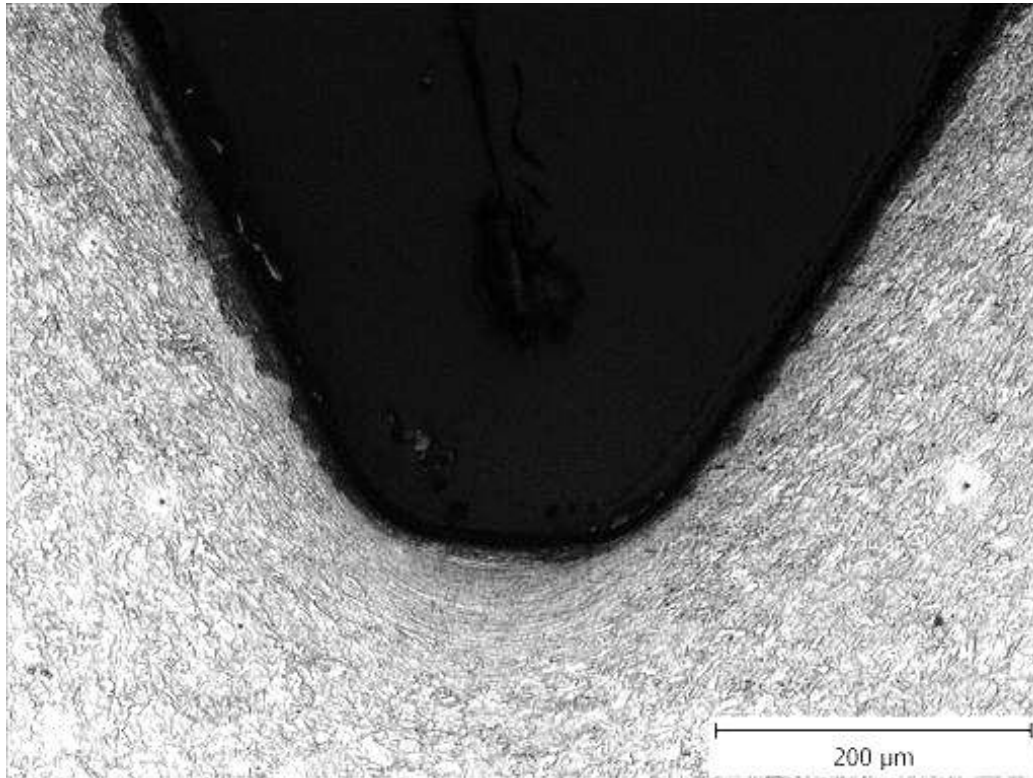
Obr. 18. Díky válcování je závit zpevněný díky zhuštění materiálu, toto zhuštění a deformace zrn materiálu je znázorněno na mikrostruktuře paty závitu na Obr. 19.



*Obr. 17: Válcování závitu*



*Obr. 18: Stav po válcování*



*Obr. 19: Mikrostruktura paty závitu*

Firma WTE Powerbolts s.r.o. používá polotovary tepelně zpracované třemi způsoby:

- Polotovar tepelně zpracován rozpouštěcím žháním s tvrdostí okolo 250HB. Po tváření závitu následuje precipitační vytvrzení ve vakuové peci
  - Toto tepelné zpracování bylo použito pro vzorky vyrobené třískovým obráběním (dále popsáno v kapitole 3.2 )
- Polotovar tepelně zpracován dle API 6A – precipitačně vytvrzený. Takto tepelně zpracovaný materiál se určen pro petrochemický průmysl a s garantovanou houževnatostí při - 60°C
- Polotovar tepelně zpracován dle ASTM B637 – žháný a precipitačně vytvrzený. Takto tepelně zpracovaný polotovar disponuje vysokou pevností až  $R_m = 1500$  [MPa] a je určen do pracovních prostředí s dlouhodobou teplotou až 650°C
  - polotovary s tímto tepelným zpracováním byly použity pro vzorky vyrobené válcováním

### 3.2 Šrouby vyrobené třískovým obráběním

Jelikož Inc718® tepelně zpracovaný na požadovanou pevnost má kromě pevnosti i vysokou houževnatost a tvrdost, není v tomto stavu vhodný pro třískové obrábění, proto se pro obrábění používá tepelné zpracování polotovaru rozpouštěcím žiháním, díky kterému klesne pevnost materiálu a tím se zvýší jeho obrobiteľnosť a sníží opotřebenění rezných destiček při obrábění.

Pro účely experimentu byly jako testovací vzorky použity závitové tyče vyráběné rozměrové řady M12 vyráběné firmou WTE Powerbolt s.r.o. vyráběné z polotovaru tepelně zpracovaného rozpouštěcím žiháním a po dokončení obrábění byla výsledná závitová tyč precipitačně vytvrzena ve vakuové peci, aby bylo dosaženo požadované pevnosti. Proces obrábění závitu je zachycen na Obr. 20.



*Obr. 20: Obrábění závitu závitové tyče*



### 3.3 Šrouby vyrobené aditivní technologií

Zkušební vzorky šroubů byly zhotoveny z materiálů MS1 (W-Nr. 1.2709) pro první a druhý tisk, pro zbývající vzorky byl použit materiál Inc718. Materiál MS1 (W-Nr. 1.2709) byl použit pro 1. a 2. tisk pro odzkoušení technologie, určení orientace šroubů na stavěcí platformě vzhledem k recoateru a také se podpůrné struktury z tohoto materiálu snadněji odstraňují. Testovací vzorky byly ve dvou variantách (bez přídavku a s přídavkem na stěnách závitů, jmenovitý průměr závitu zhotoven načisto) a měly podobu šroubu nebo závitové tyče. Díky přídavku na stěnách závitu byla zvětšena styčná plocha šroubu s podpůrnou strukturou a tím i pevnější fixaci součásti a byla snížena šance vylomení částí výtisku.

Jmenovitý průměr závitu byl odvozen od střední hodnoty tolerančního pole. Šrouby použité pro vzorky mají závit M12g6.

Jmenovitý průměr závitu M12g6	$d = 12_{-0,229}^{-0,034} [mm]$
Zvolený jmenovitý průměr vzorků	$d = 11,834 [mm]$

Orientace tisku byla zvolena horizontálně z důvodu nutnosti vypodkládat boky závitu u větších rozměrových řad, které by z tohoto důvodu nebylo výhodné vyrábět aditivní technologií.

Podpory byly navrženy tak, že aby se minimalizovala nutná finální úprava po odstranění podpůrných struktur. Tím vznikla velmi malá plocha pro uchycení podpůrných struktur – pouze 0,22 mm u šroubů bez přídavku, u šroubů s přídavkem je tato plocha 0,45 mm.

Tabulka Tab. 3 obsahuje obecné parametry zkušebních tisků.

Tloušťka vrstvy [mm]	0,04
Tloušťka stěny podpor [mm]	0,15 - 0,2
Šířka paprsku laseru [mm]	0,08
Šířka spékané plochy [mm]	0,15 – 0,20

Tab. 3: Obecné parametry tisku

Použité podpůrné struktury jsou druhu block a line. Pro pevnou fixaci výtisků k pracovní desce je jako základ podpůrné struktury blok plného materiálu, díky kterému je zamezeno ohýbání výtisku vlivem působení tepla a také je zaručeno zafixování výtisku.

Tabulka Tab. 4 obsahuje přehled charakteristických parametrů pro každý tisk. Dále jsou tisky detailněji popsány v následujících podkapitolách.

č.	Mat.	Přídavek / Ø [mm]	Tisknuté vzorky	Podpory	Úspěšnost
1	MS1	0	Šroub M12g6 x 40	různé	0/5
2	MS1	0	Šroub M12g6 x 40	2x line, block	2/3
3	Inc718	0,2 a 0,4	Šroub M12g6 x 40, polotovary	Line s žebry	17/17
4	Inc718	0	Závitové tyče M12g6 x 100	Line s žebry	5/15
5	Inc718	0,4	Závitové tyče M12g6 x 100	Line s žebry	10/10
6	Inc718	0 a 0,2	Závitové tyče M12g6 x 100	různé	3/3
7	Inc718	0 a 0,2	Závitové tyče M12g6 x 100	různé	10/10

Tab. 4: Přehled tisků

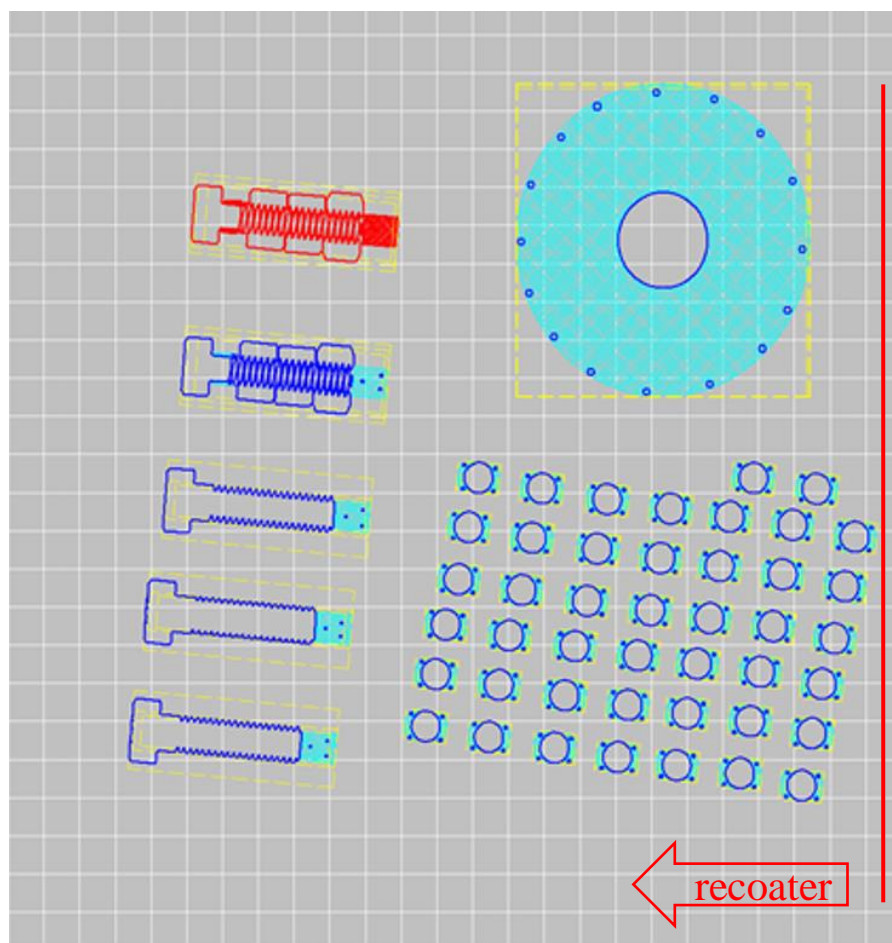
### 3.3.1 1. tisk

Tento tisk sloužil především pro otestování správnosti technologie, konkrétněji přesnost vytištěného závitu, chování různých typů podpůrných struktur při tisku závitu. Z těchto důvodů nebyl použit materiál Inc718 ale ocel MS1 z důvodu snadnějšího postprocesingu. Jako testovací vzorky byly použity šrouby M12g6 x 40, bez přídavku.

Byly použity podpůrné struktury typu line, zesílená line, line s žebry, dále byl proveden experiment s náhradou podpůrné struktury maticí, a to ve dvou variantách – s maticí bez podpor a s maticí s podporami mezi šroubem a maticí. Osy šroubů jsou vůči recoateru natočeny o 85°.

Idea tohoto nahrazení byla eliminace podpůrných struktur, kdy by se matice po vytištění šroubu jednoduše vyšroubovala a šroub by tak vyžadoval minimální postprocessing (povrchovou úpravu, odhrocení, broušení apod.).

Rozložení šroubů při tisku je znázorněno na Obr. 21.



Obr. 21: Rozložení 1. tisku

Všechny vzorky selhaly z důvodu nevhodně zvoleného natočení šroubů vůči recoateru, který je při kontaktu odtrhnul od podpůrných struktur.

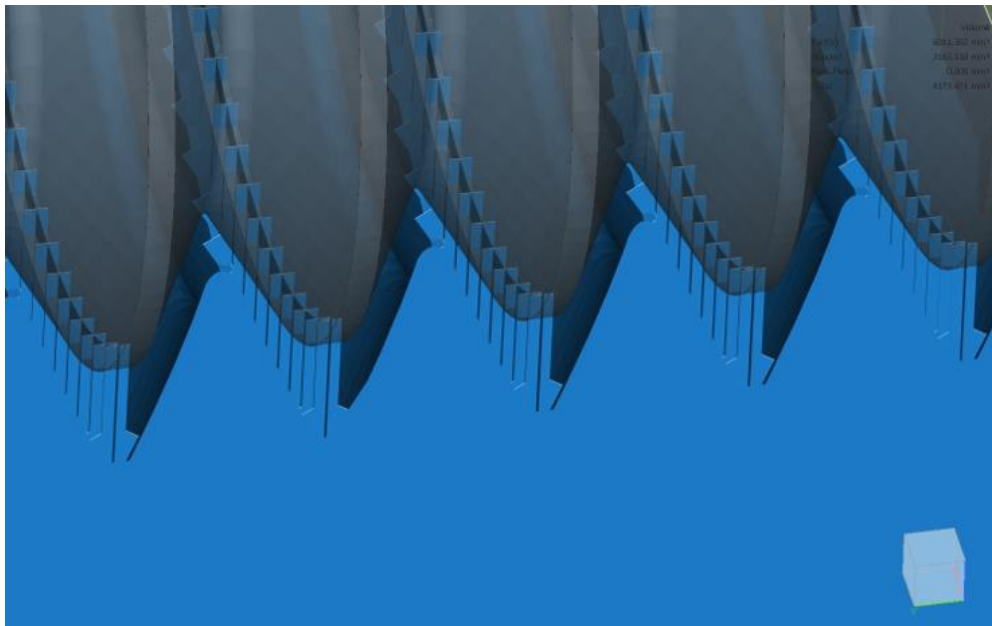
Dále toto řešení nebylo uvažováno a následující vzorky byly navrženy s rozdílnou orientací osy šroubu vůči recoateru.

### 3.3.2 2. tisk

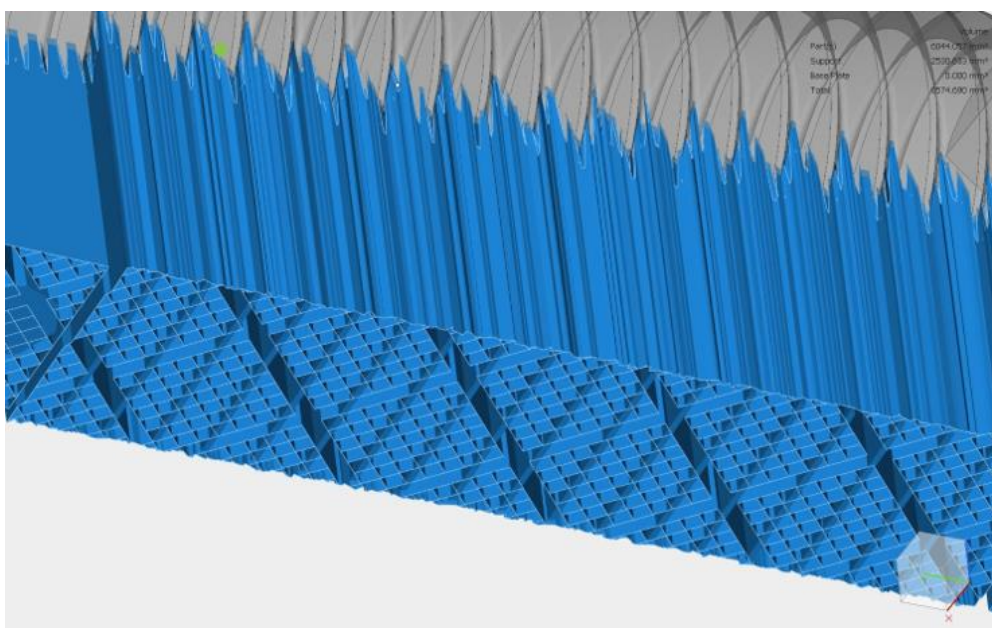
Tento tisk sloužil k úpravě rozložení tisku v závislosti na výsledcích 1. tisku, kdy všechny vzorky selhaly z důvodu nevhodného natočení vůči recoateru. Jelikož se jednalo stále o tisk, který měl ověřit vhodnost orientace šroubů na pracovním stole, nebyl použit materiál Inc718, ale ocel MS1. Jako testovací vzorky byly použity šrouby M12g6 x 40, bez přídavku. Došlo ke změně orientace šroubů na pracovním stole – otočení šroubů tak, aby osy šroubů byly vůči recoateru natočeny o  $10^\circ$ .

Jako podpůrné struktury byly zvoleny struktury typu line zesílená, line s žebry (viz Obr. 22) a block (viz Obr. 23). Vzhledem k absenci přídavku byla styčná plocha pro uchycení podpor pouze 0,22 mm široká.

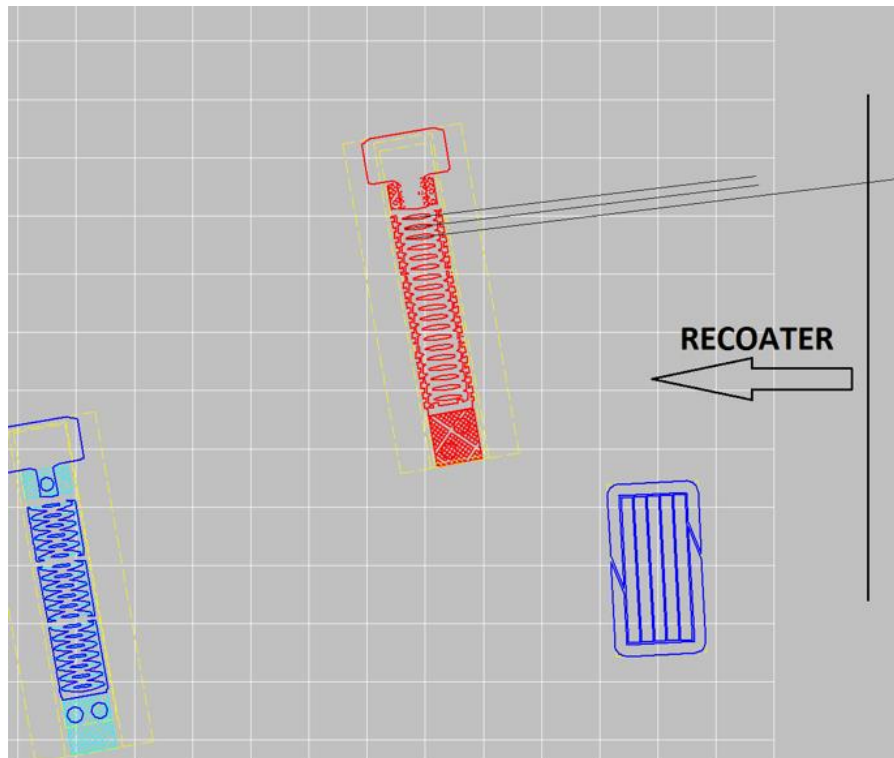
Orientace recoateru vůči šroubům je znázorněna na Obr. 24.



Obr. 22: Podpory typu line s žebry (2. tisk)



Obr. 23: Podpory typu block (2. tisk)



Obr. 24: Orientace recoateru – 2. tisk

Úspěšně byly vytištěny 2 z 3 vzorků. Nejlepší kvalitu povrchu spodní strany šroubu měla varianta s podpůrnými strukturami typu line s žebry, varianta zesílená line selhala. Porovnání výtisku na Obr. 25 – line s žebry (vlevo), block (vpravo).



Obr. 25: 2. tisk – line s žebry (vlevo), block (vpravo)

### 3.3.3 3. tisk

Po ověření správnosti technologie a orientace šroubů na pracovním stole byly v tomto tisku zhotoveny testovací vzorky z materiálu Inc718. Jako testovací vzorky byly použity šrouby M12g6 x 40 a polotovary pro závitové tyče pro budoucí závit M12 a M13. Vzorky byly vyráběny s přídkem 0,2 a 0,4 mm na průměr. Osy šroubů jsou vůči recoateru natočeny o 5°.

Použity byly podpurné struktury typu line s žebry.

Orientace recoateru vůči šroubům a rozložení tisku je znázorněno na Obr. 26.



Obr. 26: Rozložení 3. tisku

Všechny vzorky byl úspěšně vytištěny. U šroubů nebyl závit dokončen hned po vytištění z důvodu nedokonalostí ve spodní části šroubu v místě uchycení podpor. Pro dokončení závitu bylo zapotřebí speciálního závitorezného očka, klasické závitorezné očko nebylo možné použít (závitorezné očko se po dvou otáčkách zaseklo), jelikož použitý materiál na řezné plochy závitorezného očka pravděpodobně není dostatečně tvrdý nebo je geometrie řezného břitu nevhodná pro obrábění materiálu Inc718 (možným důvodem je jeho velká pevnost, tvrdost nebo pracovní vytvrzování). Speciální závitorezné očko se pravděpodobně bude od klasického lišit v materiálu použitým na řezném břitu a také v geometrii řezného břitu, konkrétně záporným úhlem čela.

Díky přídku byly styčné plochy pro uchycení podpor zvětšeny z 0,22 mm (varianta bez přídku) na 0,45 mm (v případě přídku 0,4 mm na průměr).

### 3.3.4 4. tisk

V tomto tisku byly zhotoveny testovací vzorky ve formě závitových tyčí M12g6 x 100 z materiálu Inc718. Vzorky byly vyráběny bez přídavku. V závislosti na výsledcích tisku 2 a 3, kde byla odzkoušena orientace os šroubů vůči recoateru a jejich pozice na stavěcí platformě bylo použito podobné rozložení s rozdílným úhlem mezi šrouby a recoaterem. Osy šroubů jsou vůči recoateru natočeny o 5°. (viz Obr. 27).

Použity byly podpůrné struktury typu line s žebry.



Obr. 27: Rozložení 4. tisku

Úspěšně bylo vytištěno 5/15 vzorků. Došlo k vylamování částí závitů těstě před spojením do jednoho celku, pravděpodobně vlivem změny teplotního toku a nedostatečně velkou plochou spojení s podpůrnými strukturami, tím způsobenému ohýbání, nadzdvihávání částí závitů a následnému kontaktu s recoaterem.

U úspěšně vytištěných vzorků byl nutný postprocess – závit na spodní straně v oblasti spojení šroubu s podpůrnou strukturou nebyl dokonalý, bylo nutno odstranit zbytky podpůrné struktury.

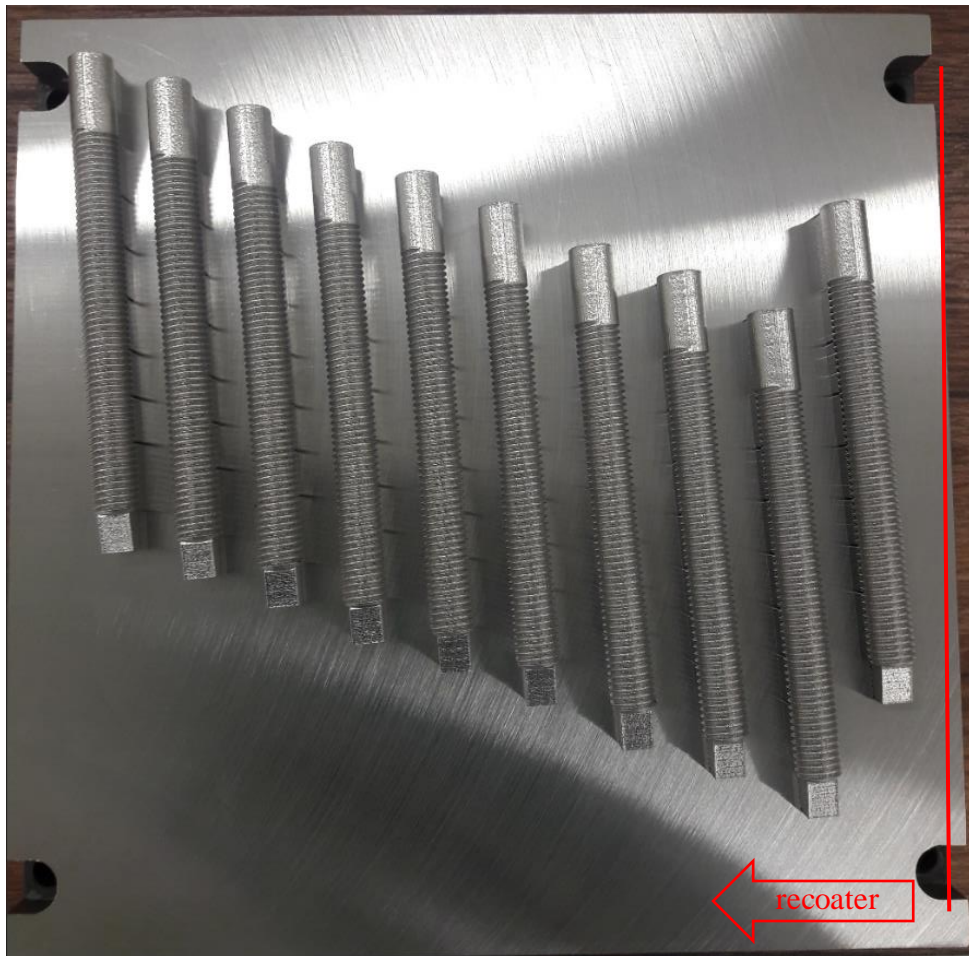
2 vzorky byly použity pro mechanické testování.

### 3.3.5 5. tisk

V tomto tisku byly zhotoveny testovací vzorky ve formě závitových tyčí M12g6 x 100 z materiálu Inc718. Vzorky byly navrženy s přídavkem 0,4 mm na průměr. Osy šroubů jsou vůči recoateru natočeny o 4°.

Použity byly podpůrné struktury typu line zesílené. Díky přídavku bylo možné podpůrné struktury zesílit na tloušťku 0,45 mm a tím zaručit pevnější spojení závitových tyčí s podpůrnou strukturou a zamezení vylamování vzorků jako tomu bylo u tisku 4.

Rozložení tisku a orientace šroubů vůči recoateru je znázorněna na Obr. 28.



Obr. 28: Rozložení 5. tisku

Všechny vzorky byly vytištěny úspěšně a s dobrou kvalitou spodní části šroubu. Zvětšení plochy pro uchycení podpor zajistilo větší pevnost spojení podpůrných struktur a závitových tyčí. Pro dokončení závitu bylo zapotřebí speciálního závitořezného očka, klasické závitořezné očko nebylo možné použít.

Po vytištění závitových tyčí následoval postprocess v podobě broušení na kulato pro odstranění zbytků podpůrných struktur. Porovnání vzorků před (vzorek vpředu) a po (vzorek vzadu) postprocessu na Obr. 29.

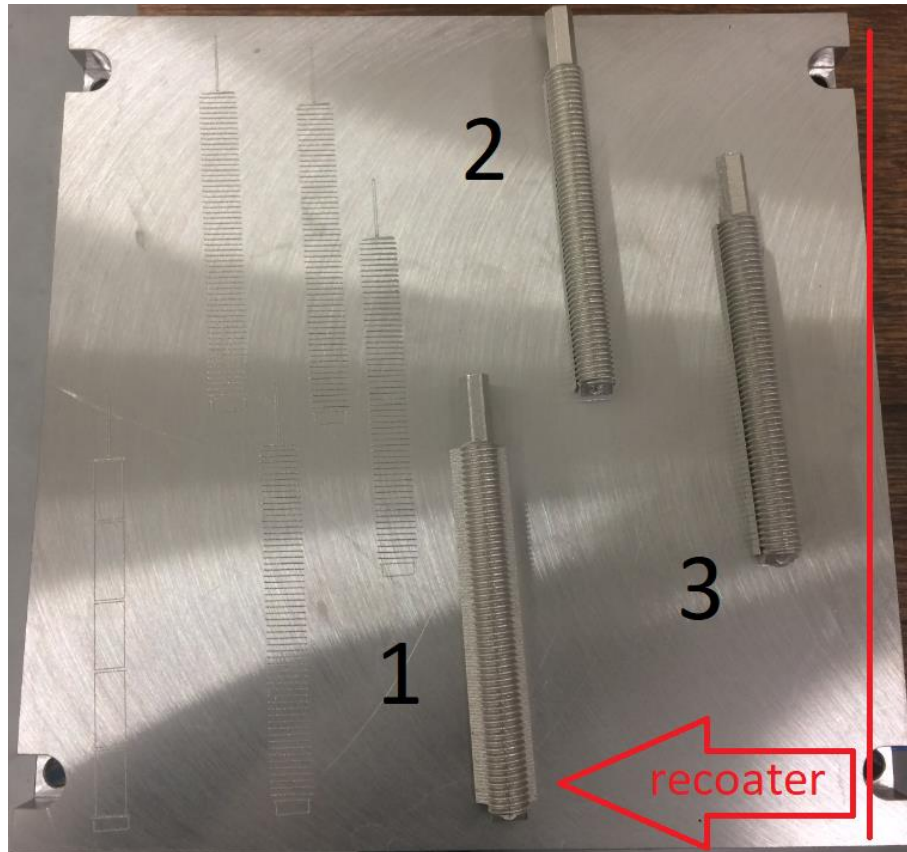


*Obr. 29: Porovnání 5. tisku*



### 3.3.6 6. Tisk

Tento tisk obsahoval 3 vzorky, dva vzorky byly navrženy s přídavkem 0,2 mm na průměr, zbývající byl bez přídavku. Všechny vzorky zhotoveny ve formě závitových tyčí M12g6 x 100 z materiálu Inc718. Osy šroubů jsou vůči recoateru natočeny o 4°. Rozložení tisku, označení vzorků a jejich orientace vůči recoateru je znázorněna na Obr. 30.



Obr. 30: Rozložení 6. tisku

Podpory vzorku č. 1 byly navrženy typu line zesílené s přidávanými podporami typu block po stranách šroubu pro zvětšení styčné plochy. Tyto podpory block také přispěly k hladšímu nájezdu recoateru do místa spékání prvních vrstev závitu.

Podpory vzorků č. 2 a 3 jsou vyztuženy objemovými podporami pod každým vrcholem závitu. Tyto sahají od stavěcí platformy až po plochu vytvořenou odsazením vrcholové plochy závitu o 0,3 mm.

Při odstraňování podpor u vzorku č. 1 se projevilo nevhodně zvolené natočení šestihranu, kdy plocha podpor nebyla úplně rovnoběžná s čelistmi svěráku, a tudíž docházelo k jeho vyvracení. Při snaze podpory odlomit docházelo pouze k deformaci podpor, ale ne k jejich oddělení. Odbrušování podpor nebylo příliš náročné vzhledem k nižší hustotě podpor než u vzorků č. 2 a 3.

U vzorků č. 2 a 3 bylo odstraňování podpor velice náročné, díky vyztužení objemovými podporami bylo téměř nemožné podpory šetrně odlomit. Během broušení se vzorek velice zahříval a bylo nutné často chladit, díky tomu odstranění podpor trvalo dlouho.

### 3.3.7 7. tisk

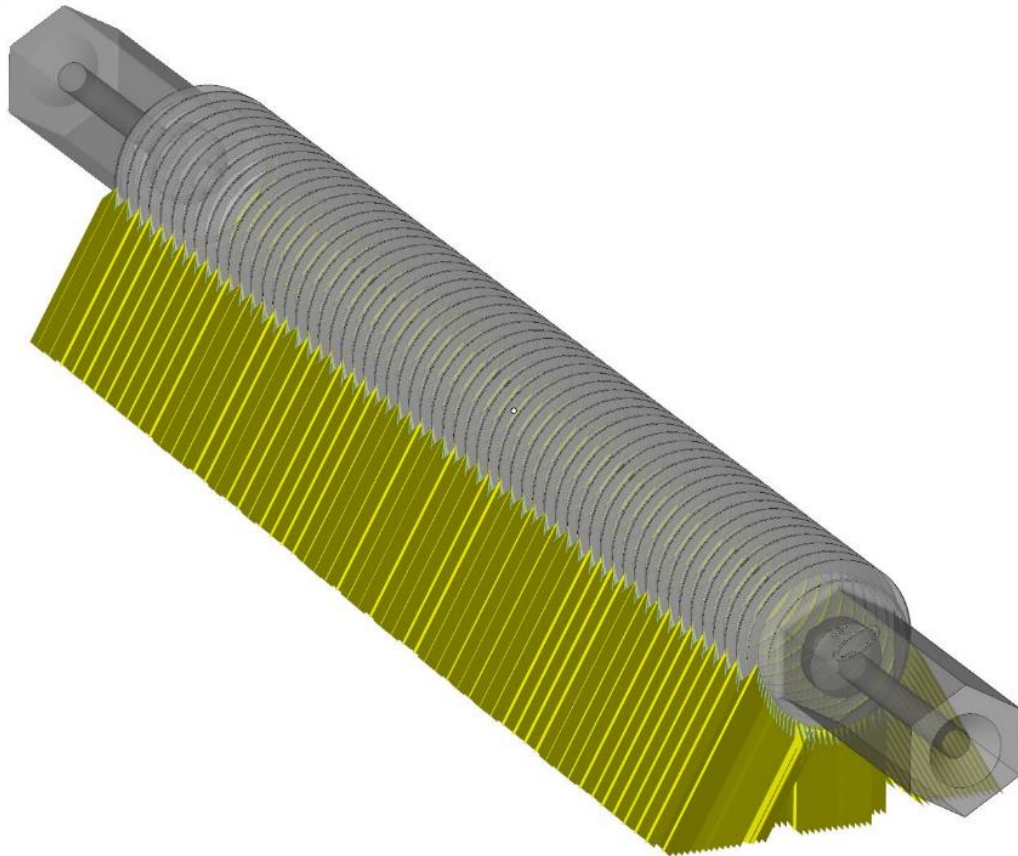
V tomto tisku byly zhotoveny testovací vzorky ve formě závitových tyčí M12g6 x 100 z materiálu Inc718®. Tyto vzorky byly opatřeny šestihranem na obou koncích pro snadnější postprocessing a byly navrženy ve dvou variantách – s přídavkem 0,2 mm na průměr a bez přídavku. U obou variant byly použity shodné podpory, jediným rozdílem byly podpory line, které měly rozdílné intervaly žebor. Osa šroubu je vůči recoateru natočena tak, že hrany závitů ve spodní části šroubu jsou téměř kolmo na recoater, konkrétně jsou šrouby natočeny o 4,24° vůči recoateru, toto natočení je příznivější pro nájezd recoateru na jednotlivé segmenty závitů a poté i šroub. Tato myšlenka vychází z výsledků tisku č. 1. Natočení a poloha šroubu v prostoru je shrnuta v Tab. 5. (Poloha v ose Z je definována jako vzdálenost nejnižšího bodu od platformy). Toto natočení způsobuje, že jednotlivé segmenty závitů se nespojují v jeden celek během jedné vrstvy, ale postupně dochází ke spojování s každou další vrstvou, zároveň ale nemá větší vliv na orientaci jednotlivých vrstev materiálu – problematika svislého a vodorovného tisku.

Poloha v ose Z	5 [mm]
Natočení kolem osy Z	- 1 [°]
Natočení kolem osy X	- 4,24 [°]

Tab. 5: Poloha vzorku 7

Podpory šroubu jsou tvořeny podporou typu line s žebry a jsou rozděleny do tří částí. Část přímo pod šroubem je tvořena kolmou podporou, podpory po stranách jsou tvořeny také podporou typu line s žebry, ale jsou zkosené o úhel 30° směrem od šroubu. Zbylé parametry jsou shodné. Podpory jsou navrženy v pěti variantách lišících se intervalem žebor, a to v rozsahu 0,4 mm – 0,8 mm s krokem po 0,1 mm. Podpory jsou se šroubem spojeny pouze na vrcholové ploše závitů, stejně jako tomu bylo u předchozích návrhů. Předpokladem pro návrh podpor tímto způsobem bylo vytvoření podpor, které budou ke šroubu připojeny po delší části závitů, než tomu bylo u předchozích variant tisku. Zkosení bočních podpor bylo zapotřebí pro optimalizování styčného úhlu podpor se závitěm šroubu. Díky zkosení podpor a tím zvětšení plochy pro uchycení podpor je možné u podpor line navrhnout větší interval žebor a tím zmenšit hustotu podpor a zjednodušit jejich odstraňování. Tyto podpory byly navrženy bez zubů.

Návrh těchto podpor je vyobrazen na Obr. 31. Základní parametry těchto podpor jsou shrnuty v Tab. 6.



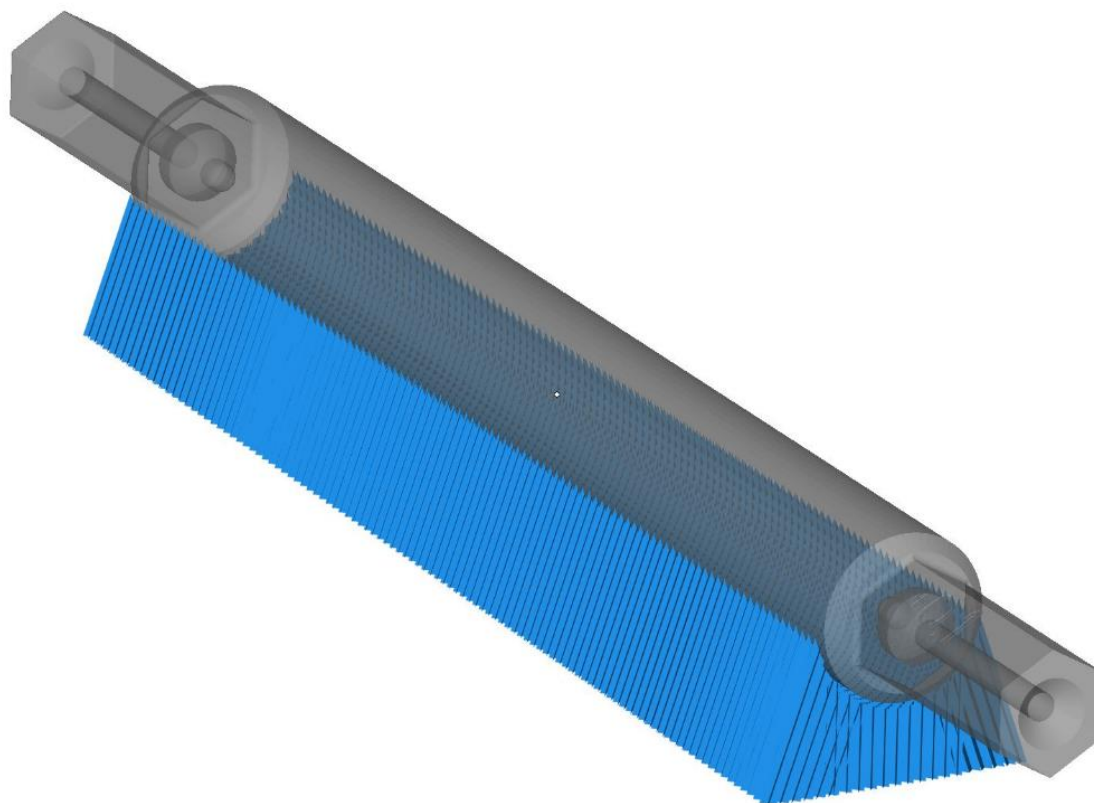
Obr. 31: Podpory line s žebry

Z offset	+ 0,25 [mm]
Úhel natočení podpor	+ 30 [°], 0 [°], - 30 [°]
Šířka žeber	2,2 [mm]
Interval žeber	0,4 – 0,8 [mm]
Utopení žeber	- 0,15 [mm]

Tab. 6: Parametry podpor line s žebry

Vzhledem k obavám, že by tyto podpory nemusely plně unést váhu celého šroubu, nebo by se nedošlo k dostatečné fixaci výtisku k stavěcí platformy, byly tyto podpory vyztuženy podporami typu block. Tyto podpory také vyplňují mezeru mezi šikmými a kolmými podporami (viz Obr. 31). Mezera by měla být vyplněna, aby nemohlo dojít k vytržení výtisku při kontaktu podpůrné struktury s recoaterem. Tyto podpory se nedotýkají závitů šroubu, slouží pouze jako vyztužení podpůrné struktury tvořené podporami typu line s žebry popsané v předchozím odstavci. Tyto podpory byly navrženy bez fragmentace, bez vnější hranice a končí ve vzdálenosti 0,4 mm od vrcholu závitů (viz Obr. 32).

Základní parametry těchto podpor jsou shrnuty v Tab. 7.



Obr. 32: Vyztužení podporami block

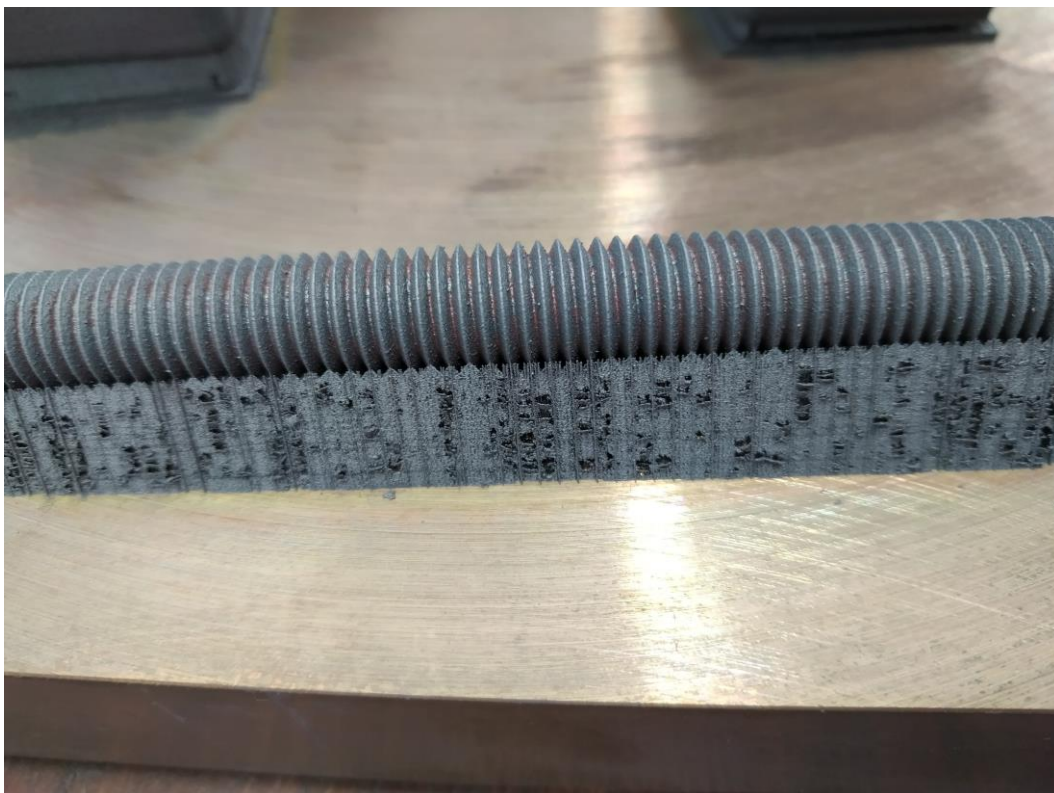
Z offset	- 0,4 [mm]
Úhel natočení podpor	+ 30 [°], 0 [°], - 30 [°]
Mřížka výplně	0,65 x 0,65 [mm]
Natočení mřížky	49.24 [°]

Tab. 7: Parametry podpory block pod závitem

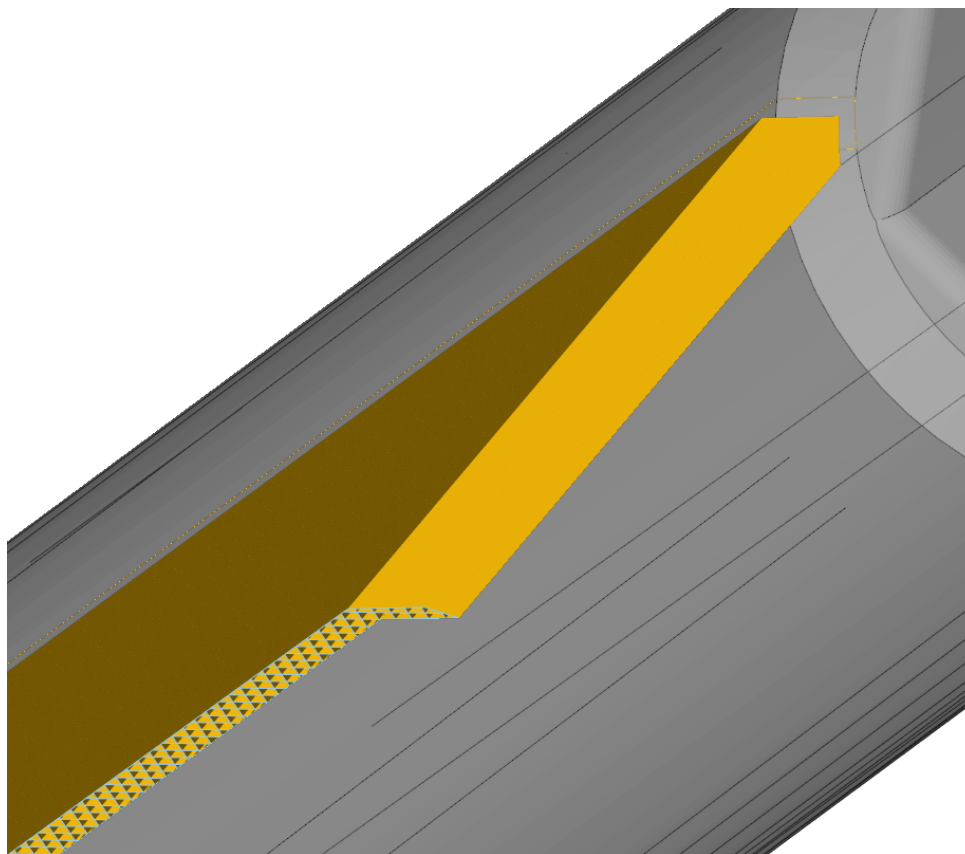
Po vytištění zkušebního vzorku z materiálu MS1 pro ověření navržených podpor byly následně přidány další podpory. Důvodem přidání těchto podpor byla skutečnost, že recoater vylamoval části žeber podpor line na vzdálenější straně od recoateru (viz Obr. 33 – dolní plocha, detailní pohled na poškozené podpory viz Obr. 34). Toto vylamování bylo pravděpodobně způsobeno při nájezdu recoateru na tyto podpory, které jsou natočeny přímo proti pohybu recoateru, kdy podpory nebyly dostatečně spojeny. Tyto podpory tedy byly jen tenké listy, které nebyly na svých koncích připojeny s další oporou. Z tohoto důvodu byly navrženy další podpory, které překrývají pouze tuto oblast (viz Obr. 35). Tyto podpory jsou typu block a jejich základní parametry jsou shrnuty v Tab. 8. Tyto podpory také zajistí hladší nájezd recoateru na další vrstvu. Spojení těchto podpůrných struktur s ostatními podpůrnými strukturami je vyobrazeno na Obr. 36 pro podpory line s intervalem 0,4 mm a na Obr. 37 pro podpory line s intervalem 0,8 mm.



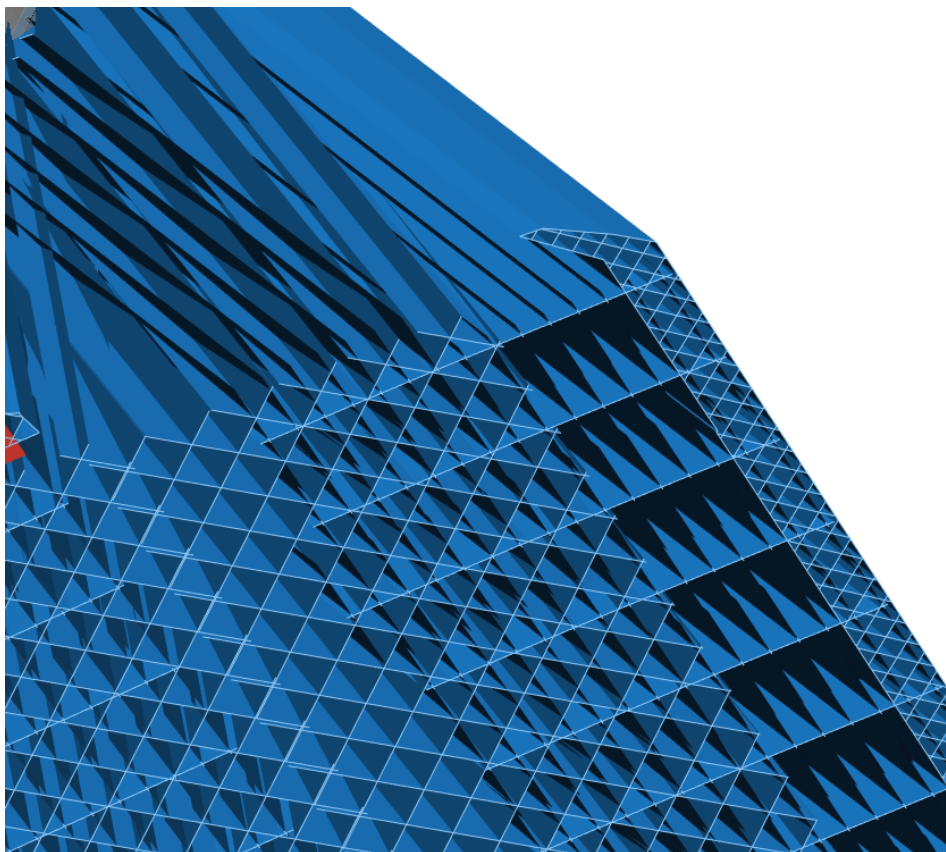
*Obr. 33: Porovnání poškození podpor*



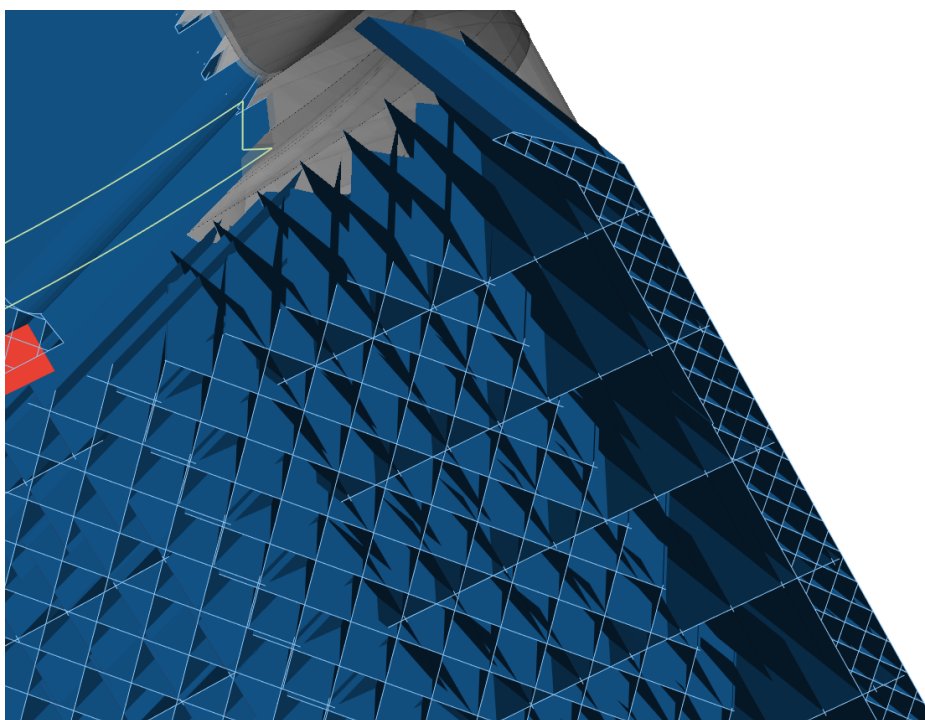
*Obr. 34: Detail vylámaných podpor*



*Obr. 35: Podpory vyztužení nájezdové plochy recoateru*



*Obr. 36: Spojení podpůrných struktur s intervalem 0,4 mm*



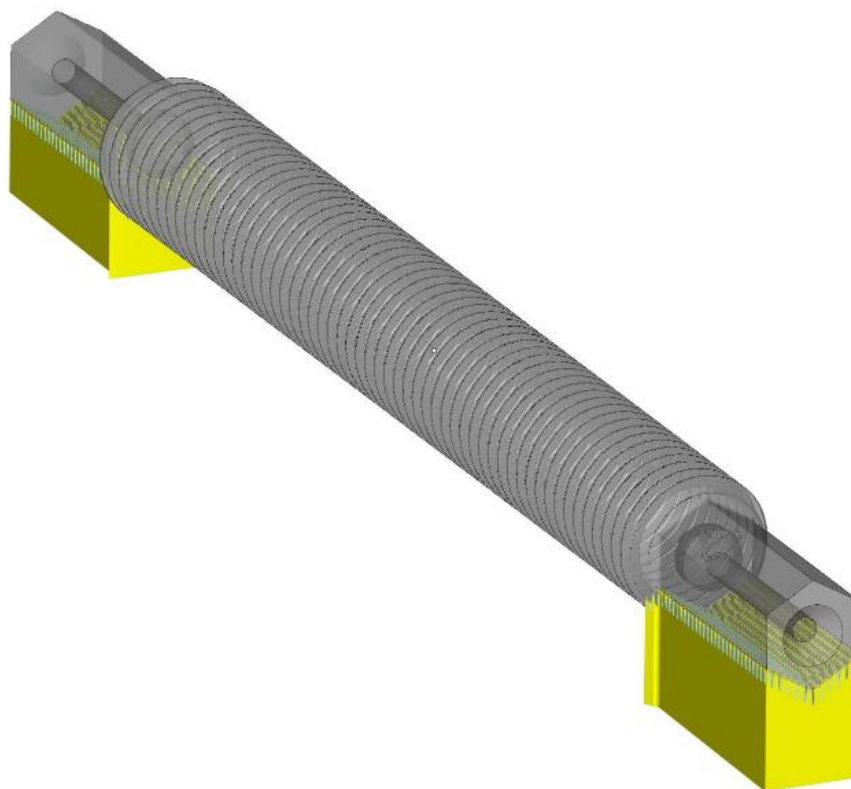
*Obr. 37: Spojení podpůrných struktur s intervalem 0,8 mm*

Z offset	- 0,4 [mm]
Úhel natočení podpor	+ 30 [°], - 30 [°]
Mřížka výplně	0,3 x 0,3 [mm]
Natočení mřížky	45 [°]
Celková tloušťka	0,6 [mm]

Tab. 8: Parametry vyztužujících podpor

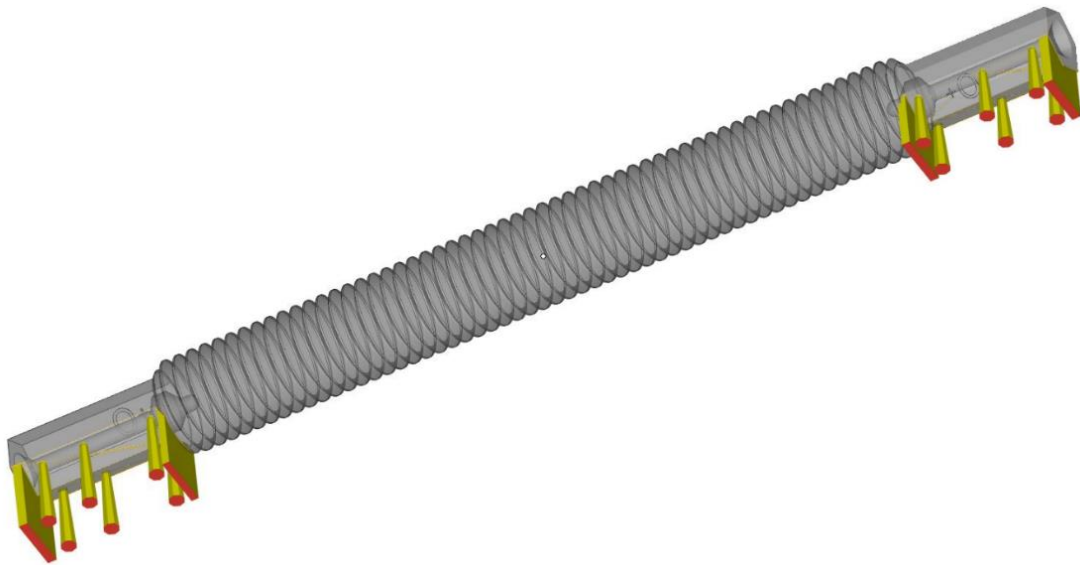
Podpory pod šestihrannými konci vzorku jsou podepřeny podporami typu block po celé délce šestihranu, viz Obr. 38. U tisku č. 4 se objevoval problém, kdy se jednotlivé segmenty závitu nadzvedávaly těsně po spojení do jednoho celku a při kontaktu s recoaterem docházelo k jejich vylamování, k tomu docházelo pravděpodobně vlivem změny tepelného toku. Z tohoto důvodu jsou podpůrné struktury na koncích šroubu doplněny o kužely (cone) plného materiálu a dále objemovými tenkými plnými podporami obdélníkového tvaru (volume) na koncích šestihranu a v místě pod prvním a posledním závitem šroubu. Tyto podpory mají za úkol dostatečně upevnit šroub v prostoru, aby se vlivem tepelného pnutí neohýbal a nevznikalo riziko vytrhnutí vzorku při přejezdu recoateru. Podpory typu block byly navrženy bez fragmentace.

Umístění těchto plných podpor je vyobrazeno na Obr. 39, parametry podpory typu block jsou shrnuty v Tab. 9 a rozměry objemových podpor jsou shrnuty v Tab. 10. Kompletní podpůrné struktury jsou vyobrazeny na Obr. 40 a Obr. 41 (na Obr. 41 jsou červenou barvou označeny plné, tedy cone a volume podpory).



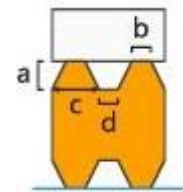
Obr. 38: podpory block na koncích šroubu





Obr. 39: Podpory pro fixaci

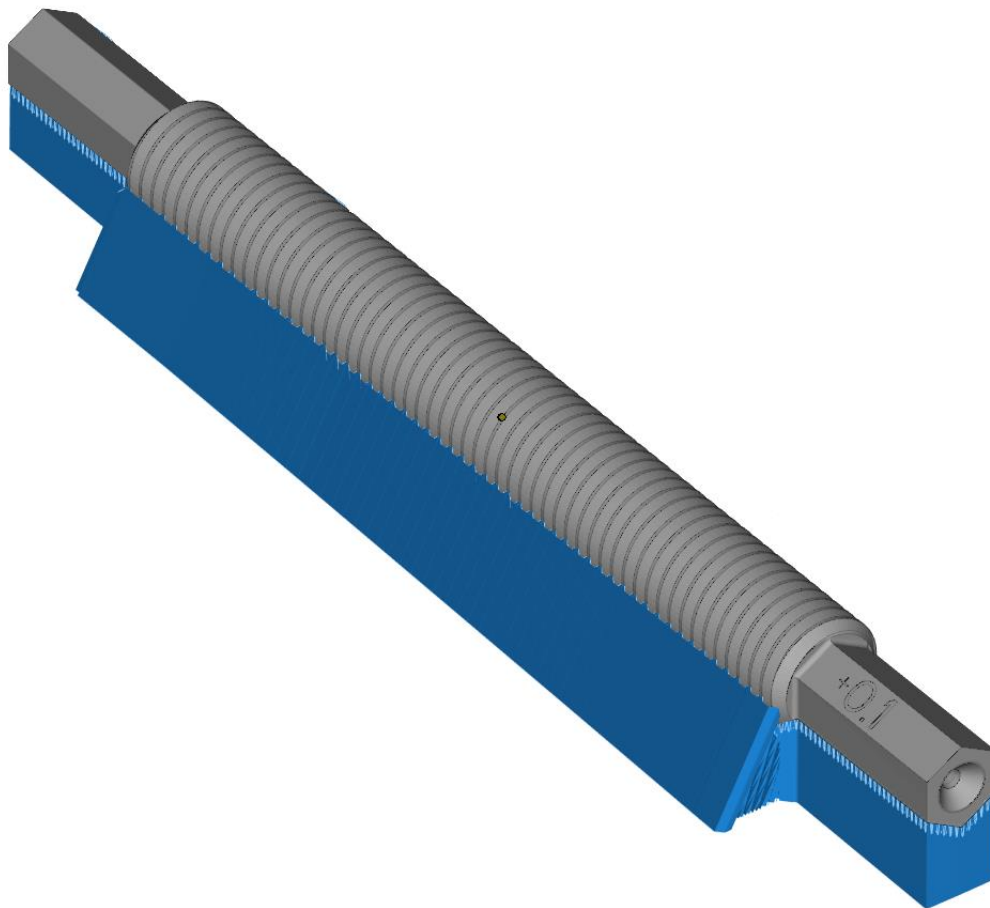
Z offset	+ 0,25 [mm]
Úhel natočení podpor	0 [°]
Mřížka výplně	0,65 x 0,65 [mm]
Natočení mřížky	49.24 [°]
Rozměry zubů:	
Výška zubu (a)	1 [mm]
Šířka vrcholu zubu (b)	0,35 [mm]
Šířka paty zubu (c)	0,6 [mm]
Interval zubů (d)	0,1 [mm]



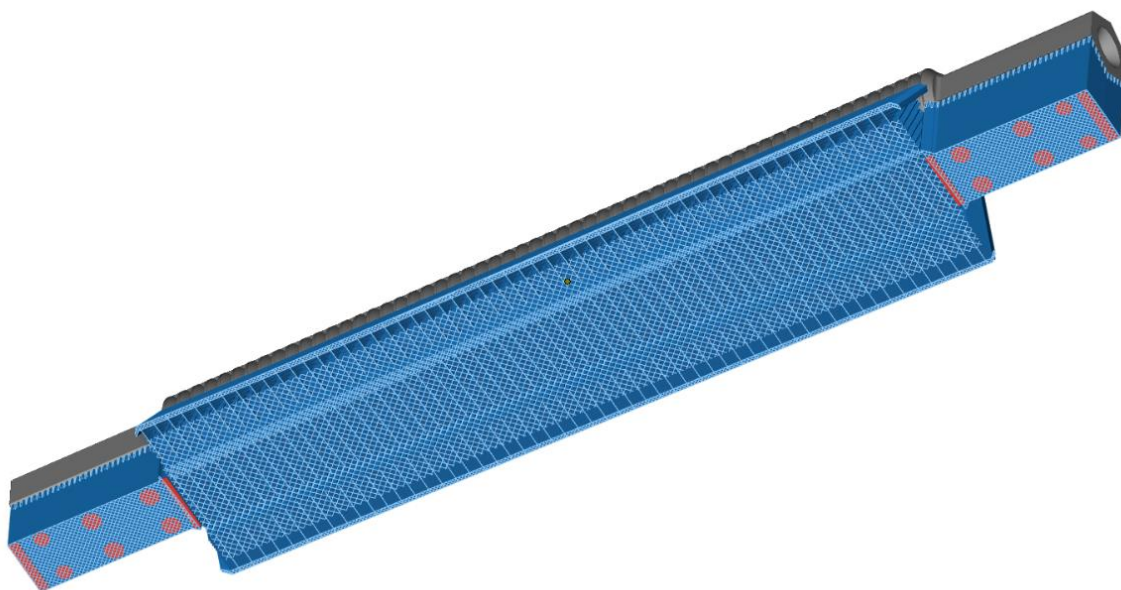
Tab. 9: Parametry podpory block na koncích šroubu

Cone:	
Průměr u platformy	2 [mm]
Vrcholový průměr	1,5 [mm]
Z offset	0,4 [mm]
Volume:	
Tloušťka	1,2 [mm]

Tab. 10: Parametry objemových podpor

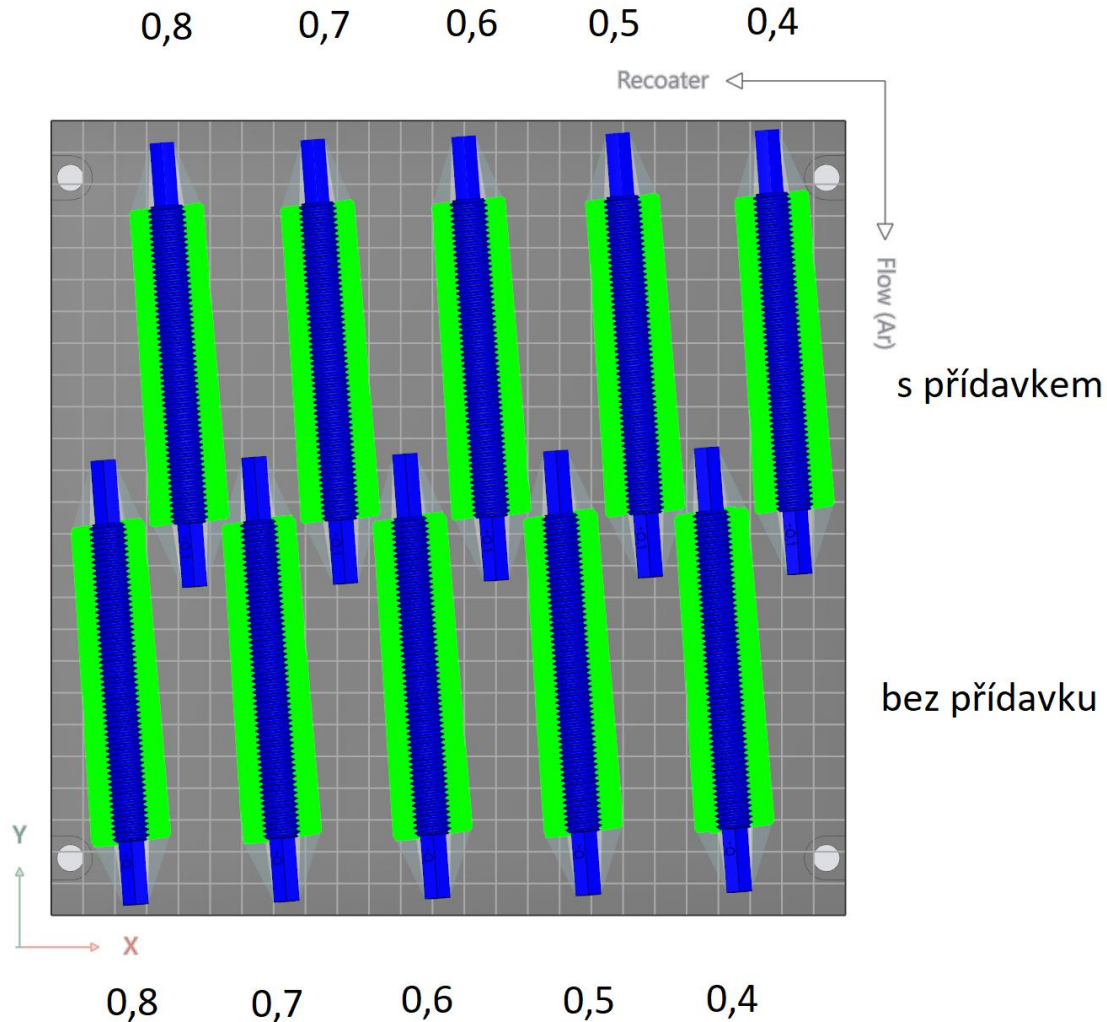


*Obr. 40: Podpůrné struktury 7. tisku*



*Obr. 41: Podpůrné struktury 7. tisku*

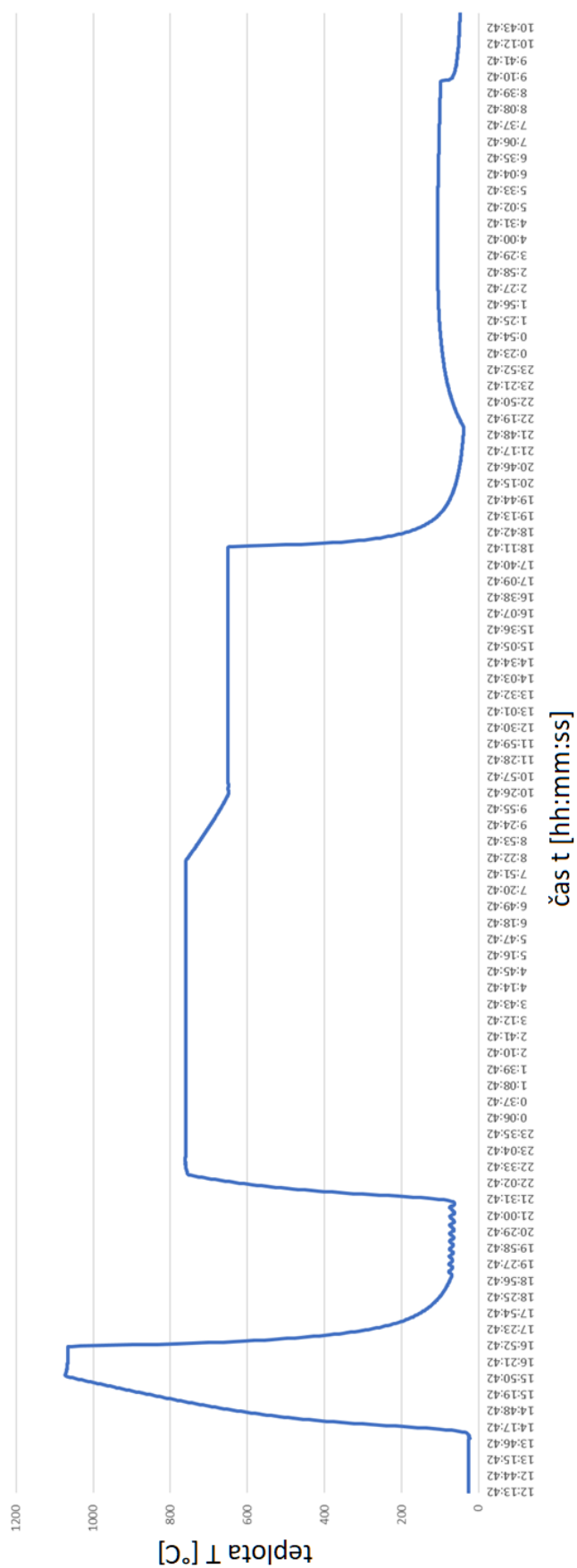
Vzorky jsou na pracovní ploše rozloženy do 2 řad, horní řada obsahuje šrouby s přídavkem 0,2 mm, spodní řada obsahuje šrouby bez přídavku. Šrouby jsou od sebe odsazeny o 1 mm ve směru osy Y. Schéma rozložení vzorků je znázorněno na Obr. 42. U jednotlivých šroubů je označena velikost intervalu mezi žebry u podpory line.



Obr. 42: rozložení 7. tisku

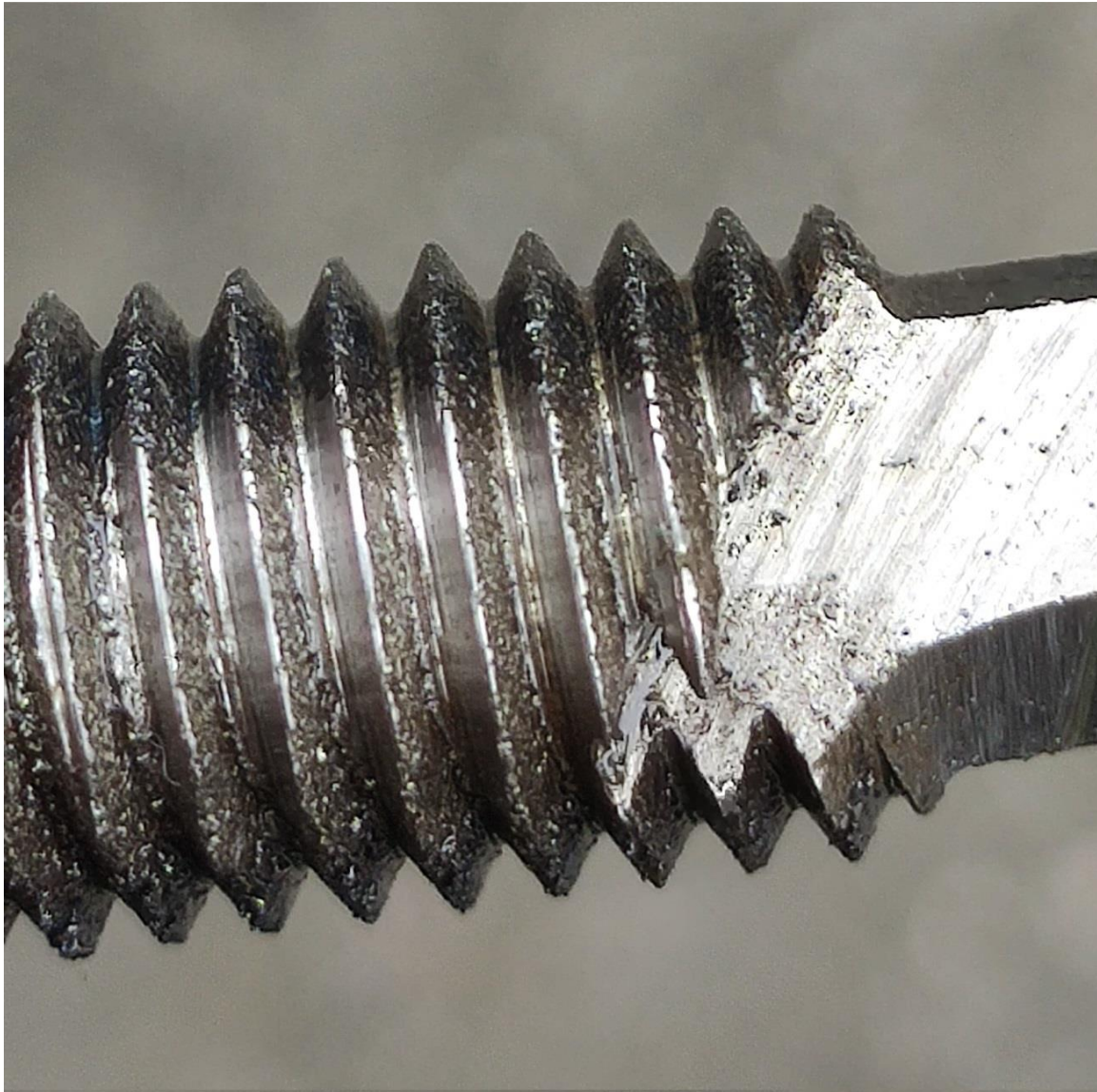
Všechny vzorky byly úspěšně vyrobeny, bez viditelných defektů. Po vytištění testovacích vzorků následovalo tepelné zpracování precipitačním vytvrzením dle AMS 5664 na tvrdost 43 HRC. Proces se skládal s žihání na teplotě 1065 °C (1950 °F) po dobu 1 hodiny a následném zchlazení v peci. Dalším krokem bylo vytvrzení stárnutím na teplotě 760 °C (1400 °F) po dobu 10 hodin, následovalo ochlazení v peci na teplotu 650 °C (1200 °F) během 2 hodin, a výdrž na této teplotě po dobu 8 hodin, posledním krokem bylo ochlazení na vzduchu. [25]

Průběh tepelného zpracování je vyobrazen na Obr. 43.



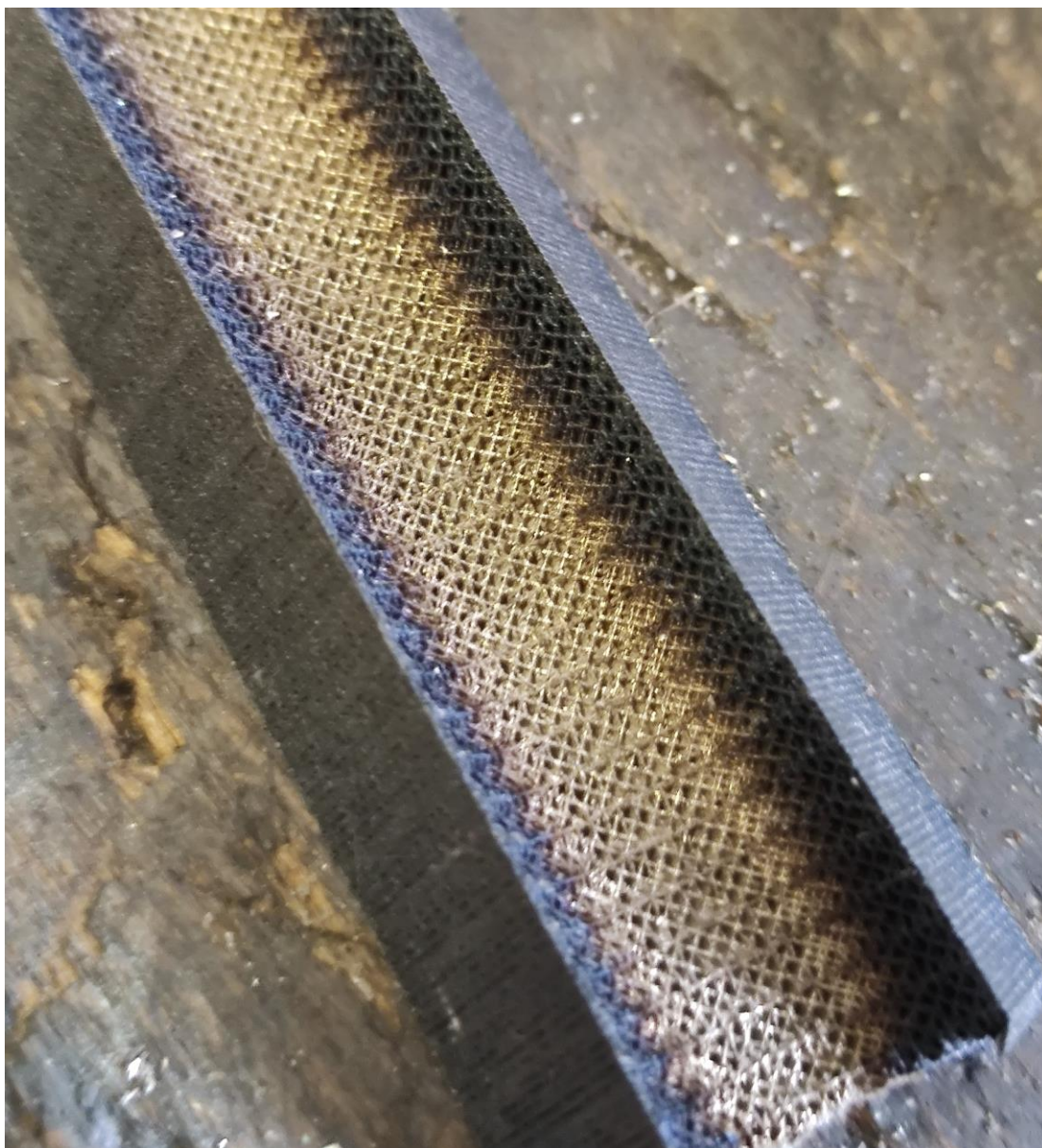
Obr. 43: Průběh tepelného zpracování

U vzorků s intervaly žebor u podpor line (viz Obr. 5) 0,8 mm a 0,7 mm bylo snadné podpory odstranit pouze za pomoci kleští, u vzorků s intervaly 0,6 mm, 0,5 mm a 0,4 mm bylo potřeba použít sekáč a kladivo. U vzorků s větším intervalem žebor docházelo ke stékání spodní části závitů, pro vzorky bez přídávku bylo po obroušení otřepů a proříznutí závitů (nejednalo se o řezání, ale pouze o pročištění) běžným závitovým očkem možné našroubovat matici, a to i na vzorek s intervalem 0,8 mm (viz Obr. 44). Bohužel byl závit tohoto vzorku mírně poškozen při odřezávání podpor úhlovou bruskou.



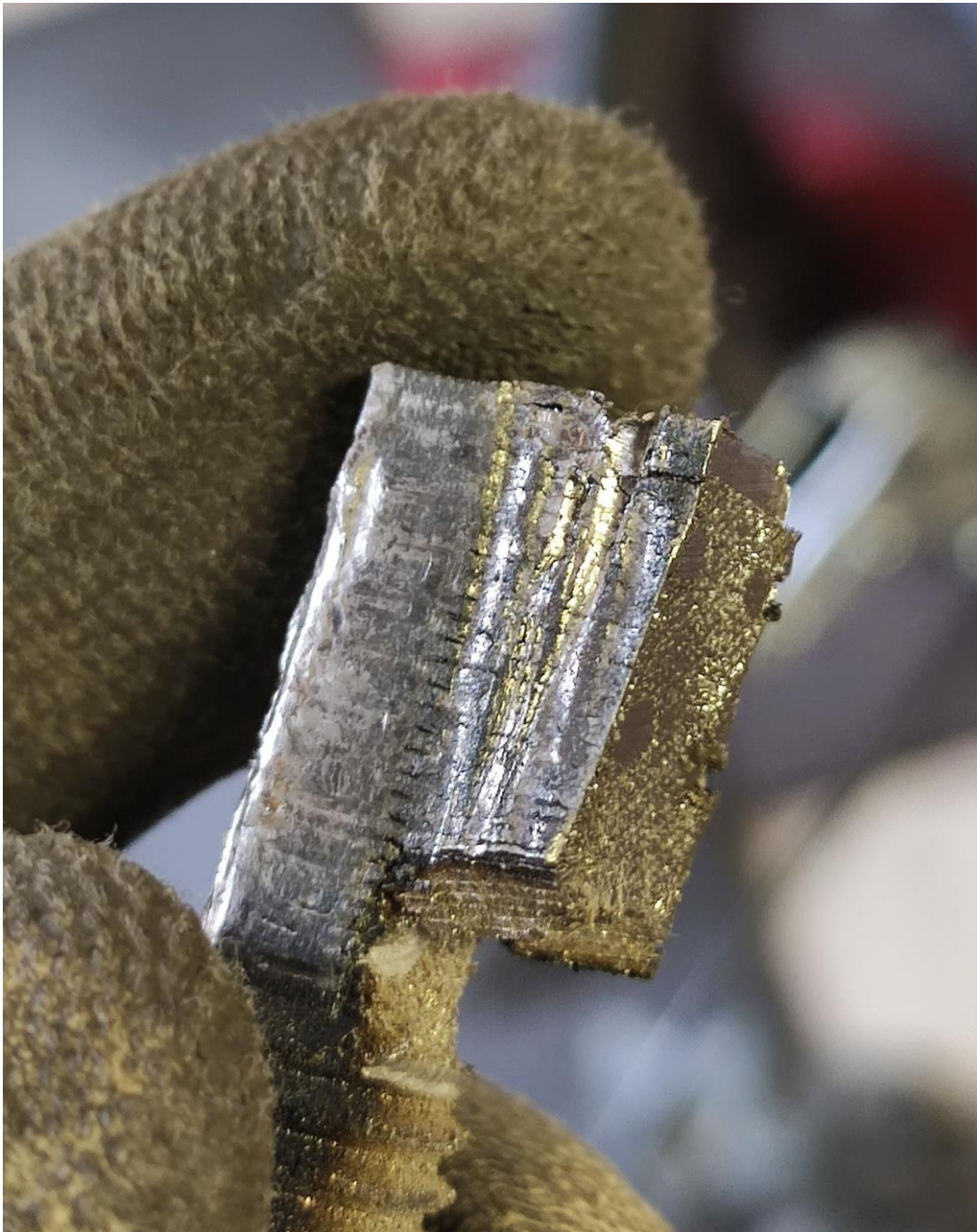
*Obr. 44: Vzorek proříznutý závitovým očkem*

Odlomení podpor nastalo dle myšlenky návrhu, tedy v místě, kde byl šroub s podporami spojen pouze podporami line s žebry. Díky tomu se podpory oddělovali v jednom kuse (viz Obr. 45), s výjimkou vzorku s přídavkem a intervalem 0,5 mm a vzorku bez přídavku s intervalem 0,4 mm, kdy se podpora po délce praskla. Toto bylo pravděpodobně zapříčiněno menším intervalem žebor, tím zvýšenou pevností spojení podpor a šroubu a také na to mohla mít vliv celková výška podpor, která mohla být snížena při odřezávání šroubu ze stavěcí platformy.



*Obr. 45: Podpůrné struktury vzorku s přídavkem a intervalem 0,6 mm*

Při odstraňování podpor pod šestihrannými konci vzorků se ukázal nevhodný návrh podpor. Podpory typu block byly navrženy s příliš hustou výplní, tudíž bylo jejich odlomení nemožné. Na je ukázán pokus o odlomení podpor na vzorku s přídavkem a intervalem 0,8 mm za pomoci sekáče a kladiva, jak je vidět na Obr. 46, zvolenou metodou dojde pouze k poškození šroubu, nikoliv odlomení podpor. Po tomto selhání byla pro odstranění těchto podpor použita úhlová bruska pro hrubé odřezání podpor a následné dobroušení na stolní brusce.



*Obr. 46: Poškození vzorku s přídavkem a 0,8 mm intervalem*

Dále byly tyto vzorky pískovány (viz Obr. 47), aby byl závit pročištěn a mohla být našroubována matice bez nutnosti prořezávání závitu závitořezným očkem nebo na soustruhu. Bohužel se pískováním nedosáhlo dostatečného očištění závitu.



*Obr. 47: Pískované vzorky - bez přídavku (vpravo), s přídavkem (vlevo)*

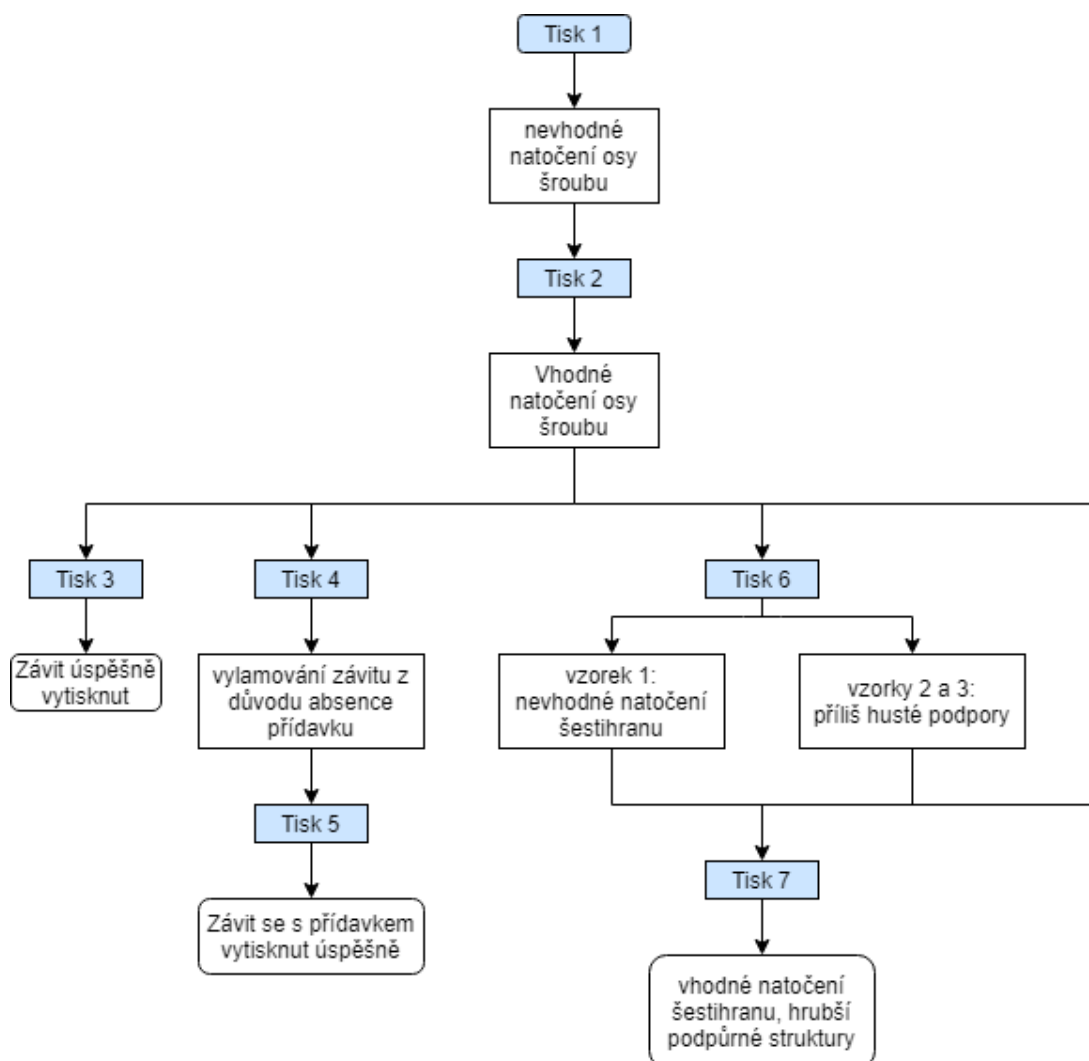
Závěrem řešení 7. tisku je skutečnost, že podpůrné struktury, které podporovaly samotný závit šroubu, splnily očekávání a jejich odstraňování probíhalo dle představ při jejich návrhu. Jejich negativem je však nedokonalost závitu na spodní straně šroubu, kdy se na plochu závitu připékal okolní neroztavený prášek a znemožnil tak našroubování matice bez proříznutí závitu závitořezným očkem, a to i po pískování vzorků.

Podpůrné struktury pod šestihrany na koncích šroubu byly navrženy s příliš hustou mřížkou, a proto nebylo jejich odstranění snadné. Ovšem tyto konce jsou pouze technologické, jsou využity pro upnutí při odstraňování podpor, dořezávání závitu a také pro řádnou fixaci šroubu ke stavěcí platformě. Bylo by možné tyto podpory upravit změnou hustoty podpor block, které tvoří hlavní část těchto podpor nebo zredukováním plochy plných podpůrných struktur (cone a volume, viz Obr. 41, červeně zvýrazněné plochy). Tato úprava by se však musela doložit dalším experimentem, při němž by se zjistilo, zda tato úprava nebude mít negativní vliv na fixaci šroubu ke stavěcí platformě, který by mohl mít za následek ohýbání výtisku a následné vytržení recoaterem.

Natočení osy šroubu o  $1^\circ$  vůči stavěcí platformě mohlo mít vliv na snížení tření mezi recoaterem a tištěným šroubem, které se projevilo tak, že došlo ke snížení slyšitelných vibrací způsobených kontaktem recoateru a tisknutého šroubu při přejezdu recoateru. Dalším faktorem, který mohl ovlivnit vibrace, bylo přidání podpůrných struktur pro snazší nájezd recoateru viz Obr. 35.



Základní poznatky z jednotlivých tisků, jejich návaznost a použití těchto poznatků při návrhu dalších tisků je znázorněno ve vývojovém diagramu na **Error! Reference source not found.**



Obr. 48: Vývojový diagram návrhů pro aditivní výrobu šroubů

## 4 Zhodnocení

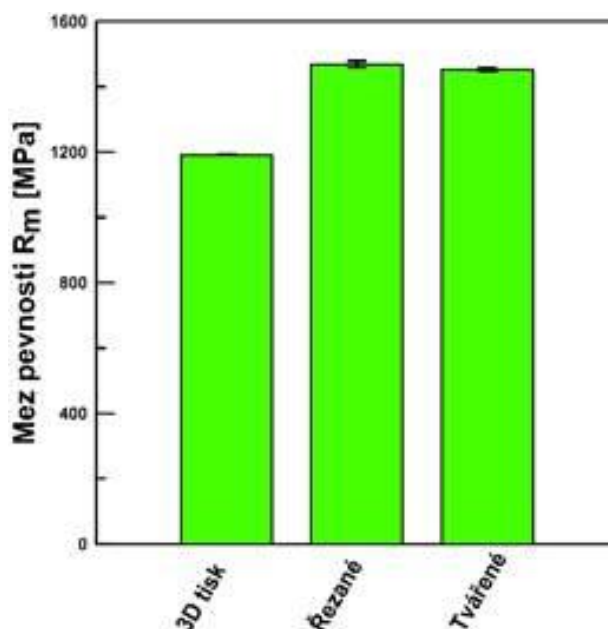
Jednotlivé varianty výroby šroubů z Inc718 byly zhodnoceny vícekritériální metodou, kdy jednotlivá kritéria pro jednotlivé způsoby výroby byly ohodnoceny body způsobem od nejlepší (nejvyšší počet bodů) po nejhorší (nejnižší počet bodů). V závislosti na výsledcích jednotlivých variant výroby v každé z kategorií bude rozhodnuto, která metoda je nejvhodnější.

Vzorky byly posuzovány z hlediska pevnosti v tahu a z ekonomického hlediska dle finanční náročnosti na polotovary, práci stroje, práci člověka, množství odpadního materiálu a ceny výsledného produktu.

### 4.1 Výběr variant z hlediska mechanických vlastností šroubů

Hodnocení z hlediska mechanických vlastností bylo provedeno tahovou zkouškou. Taková zkouška byla provedena na stroji EUS 40 rychlostí 20 MPa/s a vyhodnocení proběhlo porovnáním meze pevnosti jednotlivých vzorků.

Výsledky tahové zkoušky jsou znázorněny na Obr. 49 a shrnuty v Tab. 11.



Obr. 49: Výsledky tahové zkoušky

Typ výroby	Pevnost v tahu [MPa]	Hodnocení
Tváření	1445	2
Obrábění	1455	3
Aditivní technologie	1200	1

Tab. 11: Porovnání pevnosti šroubů

## 4.2 Výběr variant z hlediska ekonomičnosti výroby

Ekonomičnost výroby byla zhodnocena dle finanční náročnosti na polotovary, finanční hodnoty práce stroje, nutnosti zásahu pracovníka – nutnost postprocessingu, výměna nástroje, doplnění spotřebního materiálu apod. a množství odpadního materiálu. Cena výsledného šroubu za kus je shrnuta v Tab. 12. Celkové výsledky zhodnocení dle ekonomického hlediska jsou shrnuty v Tab. 13.

Typ výroby	Cena/ks [Kč/ks]
Tváření	1 168,28
Obrábění	1 168,28
Aditivní technologie	5 000,00

Tab. 12: Shrnutí ceny za kus jednotlivých variant

Typ výroby	Polotovar	Čas výroby	Práce člověka	Odpadní materiál	Cena/ks	Celkem
Tváření	2	3	2	3	2	12
Obrábění	1	2	2	1	2	8
Aditivní technologie	3	1	1	2	1	8

Tab. 13: Porovnání nákladů na výrobu

### 4.2.1 Náklady na polotovary

Při metodě tváření je pro výrobu použit tyčový materiál o jmenovitém průměru závitu, ze kterého je následně tvářena i hlava šroubu. Pro variantu výroby šroubu třískovým obráběním není polotovar omezen rozměrem polotovaru, který je k dispozici, jelikož jde použít nejbližší vyšší průměr polotovaru, ale za cenu dalšího obrábění na potřebný jmenovitý průměr, které je ale velice náročné vzhledem k obrobitelnosti materiálu Inc718®. Při použití aditivní technologie je polotovar práškový materiál, je tedy naprosto univerzální a lze kdykoliv přejít na výrobu jiné rozměrové řady či typu šroubu bez výměny polotovaru. Je ale zároveň nejvíce finančně náročný.

Vzhledem k výhodám a nevýhodám jednotlivých metod výroby je z hlediska nákladů na polotovary nejvíce výhodná aditivní technologie díky její univerzálnosti.

#### 4.2.2 Čas výroby

Při uvažování finanční náročnosti ve vztahu k času výroby při výrobě šroubů tvářením je tato metoda jednoznačně nejvýhodnější, jelikož doba na výrobu šroubů touto metodou je velice rychlá a plně automatizovaná. U výroby pomocí třískového obrábění je tento čas vyšší, jelikož je při výrobě prováděno více operací (sražení čela, obrábění závitu, oddělení materiálu, popř. úprava rozměru polotovaru a obrábění hlavy šroubu). Metoda výroby šroubů aditivní technologií je z pohledu času výroby nejvíce náročná, a to i vzhledem k tomu, že je možno zároveň vyrábět více šroubů na jedné stavěcí platformě, ale i tak se výroba pohybu v řádek hodin pro jednu stavěcí platformu.

Z pohledu času výroby na finanční náročnost výroby je tedy nejlepší varianta výroby tvářením při předpokladu výroby malého počtu kusů, pokud by došlo k optimalizaci rozložení šroubů na stavěcí platformě tak, aby se maximálně využil prostor a došlo k vytištění co největšího možného počtu šroubů, mohla by tato skutečnost být rozdílná.

#### 4.2.3 Práce člověka

Jelikož výroba šroubů metodou tvářením je automatizovaná, vyžaduje minimální zásah obsluhy. Při použití metody třískového obrábění, která může být výrobě také částečně nebo plně automatizovaná (při použití CNC strojů se zásobníkem polotovaru a automatických odebráním obrobenejších kusů). Při výrobě šroubů aditivní technologií je zapotřebí práce člověka na oddělení výtisků ze stavěcí platformy a následný postprocessing.

Vzhledem k výše zmíněnému jsou z hlediska práce člověka nejvhodnější metody tvářením a třískovým obráběním.

#### 4.2.4 Odpadní materiál

Odpadní materiál pro metodu tvářením je minimální, jelikož nedochází k odebrání materiálu během procesu výroby samotného šroubu, jediným odpadním materiálem je materiál odebíraný při dělení polotovaru. Za odpadní materiál u třískového obrábění lze považovat i spotřební materiál (chladio, rezné destičky) a zároveň při samotném obrábění odchází materiál ve formě třísky. Pro aditivní metodu výroby je odpadním materiálem spečený materiál použitý na stavbu podpůrných konstrukcí, po oddělení okolního neroztaveného materiálu od zbytků podpor je možno tento materiál znovu použít.

Z hlediska množství odpadního materiálu je nejvýhodnější metoda tvářením.

### 4.3 Další postup řešení

Možným řešením výroby libovolných typů šroubů by bylo zhotovení polotovaru aditivní technologií a následné odvalení závitu. Při takto vyráběných šroubech by odpadla nutnost obrábění tyčového materiálu na požadovaný jmenovitý průměr závitu, v případě šroubů např. se šestihrannou hlavou by navíc odpadla nutnost hlavy šroubů frézovat a navíc by došlo ke zvýšení pevnosti závitu způsobené zhuštěním materiálu při tváření.

Možností optimalizace závitů vyráběných čistě aditivní technologií by mohla být optimalizace tvaru šroubu při uvážení ztékání materiálu při samotném tisku. Tento problém se projevil u všech tisků, kdy průřez závitu nebyl kruhový, ale na spodní straně byl protažený směrem dolů. Průřez by tedy neměl kruhový průřez, ale na spodní straně by byl zploštělý. Takto optimalizovaný průřez by mohl napomoci vyřešit problém, kdy nelze matici našroubovat na šroub bez protažení závitu, tato teorie by se však musela podrobit experimentům.

## 5 Závěr

Jednotlivé varianty výroby byly zhodnoceny z hlediska mechanických vlastností a z hlediska ekonomičnosti výroby vícekritériální metodou. Finální porovnání výsledků jednotlivých kategorií porovnání je shrnuto v Tab. 14.

Z porovnání výsledků tahové zkoušky jednotlivých vzorků vyplývá, že obráběný a tvářený závit má vyšší mez pevnosti v tahu než závit vytvořený aditivní technologií, toto může být zapříčiněno tím, že *3D tištěný bude Inconel 718® z důvodu rozdílné směrově silně orientované mikrostruktury náchylnější na vrubovou pevnost.* [27] U vzorků vyrobených třískovým obráběním není doloženo tepelné zpracování, které mohlo ovlivnit výsledky tahové zkoušky. U vzorků vyráběných válcováním bylo použito tepelné zpracování, které garantuje velmi vysokou pevnost.

V závislosti na výsledcích v Tab. 14 je zřejmé, že metoda aditivní technologie je v navrženém řešení méně výhodná z hledisek mechanických vlastností a ekonomičnosti výroby v porovnání s konvenčními metodami výroby šroubů z Inc718®. Ovšem při započtení skutečnosti, že tepelné zpracování vzorků vyráběných třískovým obráběním, vzorků vyráběných válcováním a vzorků vyráběných aditivní technologií bylo použito rozdílné tepelné zpracování, je možné, že právě tato skutečnost měla zásadní vliv na výsledky mechanických testů. Při předpokladu, že toto vliv mělo, nebo že by bylo provedeno jiné než použité tepelné zpracování u vzorků vyrobených aditivní technologií, a tím by byly ovlivněny výsledky tahové zkoušky, mohlo by dojít ke změně bodového hodnocení variant z hlediska mechanických vlastností a tím i ke změně finálních výsledků porovnání.

Typ výroby	Mech. vlastnosti	Ekonomičnost	Celkem
Tváření	2	2	4
Obrábění	3	1	4
Aditivní technologie	1	1	2

Tab. 14: Bodové zhodnocení

Dalším možným postupem by bylo zhodnocení vzorků z hlediska přesnosti výroby závitu porovnáním vzorků na mikroskopu nebo zhodnocení drsnosti povrchu závitové plochy. Jako další možnost by bylo vzorky vyrobené jednotlivými metoda podrobit identickému tepelnému zpracování a tím zajistit relevantnější výsledky tahové zkoušky.

## Použitá literatura

- [1] ROSEN, D., STUCKER, B., GIBSON, I. *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 2014
- [2] KUMAR, J., L., PANDEY, P., M., WIMPENNY, D., I. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Singapur: Springer, 2018.
- [3] *DMLS Prototypes*. THE CASTING COMPANY, INC.  
<https://thecastingcompanyinc.com/solutions/dmls-prototypes/>
- [4] JIANG, Jingchao, XU, Xun ,STRINGER, Jonathan. *Support Structures for Additive Manufacturing: A Review*. 2018-09 [cit. 18. 12. 2019].  
[https://www.researchgate.net/publication/327780935\\_Support\\_Structures\\_for\\_Additive\\_Manufacturing\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/327780935_Support_Structures_for_Additive_Manufacturing_A_Review)
- [5] VERMA, Anoop, Satish TYAGI a Kai YANG. *Modeling and optimization of direct metal laser sintering process*. 2014-08.  
[https://www.researchgate.net/publication/267632537\\_Modeling\\_and\\_optimization\\_of\\_direct\\_metal\\_laser\\_sintering\\_process](https://www.researchgate.net/publication/267632537_Modeling_and_optimization_of_direct_metal_laser_sintering_process)
- [6] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014
- [7] Special Metals Corporation, *Publication Number SMC-027: INCONEL® Alloy 600*. 2008-08 [cit. 07. 12. 2019].  
<https://www.specialmetals.com/tech-center/alloys.html>
- [8] Special Metals Corporation, *INCONEL® Alloy 625*. 2013-09 [cit. 07. 12. 2019].  
<https://www.specialmetals.com/tech-center/alloys.html>
- [9] Special Metals Corporation, *Publication Number SMC-045: INCONEL® Alloy 718*. 2007-09 [cit. 11. 12. 2019].  
<https://www.specialmetals.com/tech-center/alloys.html>
- [10] Neonickel.com, *Specifikace slitiny Inconel 718*. [cit. 11. 12. 2019].  
<https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-niklu/alloy-718/>
- [11] VARGUS Scandinavia a/s, *Katalog produktů*. [cit. 11. 12. 2019].  
<https://www.vargus.dk/thread-turning>
- [12] HERZOGA, Dirk, SEYDAB, Vanessa, WYCISKB, Eric, EMMELMANNAB, Claus. *Additive manufacturing of metals*. [cit. 14. 12. 2019].  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645416305158>
- [13] Nano Today, 2017. *Selective Laser Melting*. [cit. 14. 12. 2019].  
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/selective-laser-melting>
- [14] *How it's made: ARP bolts*. [cit. 22. 01. 2020].  
<https://www.hagerty.com/articles-videos/articles/2018/02/20/how-arp-bolts-are-made>
- [15] *Thread and profile rolling*. [cit. 22. 01. 2020].  
<https://www.profiroll.com/en/process/thread-and-profile-rolling/>

- [16] HUSSEIN, Ahmed, HAO, Liang, YAN, Chunze, EVERSON, Richard, YOUNG, Philippe. *Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing*. [cit. 29. 02. 2020]. [https://www.researchgate.net/publication/257345107\\_Advanced\\_lattice\\_support\\_structures\\_for\\_metal\\_additive\\_manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/257345107_Advanced_lattice_support_structures_for_metal_additive_manufacturing)
- [17] LEE, Jusung, LEE, Kunwoo. *Block-based inner support structure generation algorithm for 3D printing using fused deposition modeling*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 89. 10.1007/s00170-016-9239-3. 2017. [cit. 04. 03. 2020]. [https://www.researchgate.net/publication/306001413\\_Block-based\\_inner\\_support\\_structure\\_generation\\_algorithm\\_for\\_3D\\_printing\\_using\\_fused\\_deposition\\_modeling](https://www.researchgate.net/publication/306001413_Block-based_inner_support_structure_generation_algorithm_for_3D_printing_using_fused_deposition_modeling)
- [18] 3D Hub's *Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D Printing*. Copyright © 2018. [cit. 05. 03. 2020]. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing#infill>
- [19] 3D Hub's *How to design parts for Metal 3D printing*. Copyright © 2018. [cit. 05. 03. 2020]. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-metal-3d-printing/>
- [20] ZENG, Kai. *Optimization of support structures for selective laser melting*, University of Louisville (2015) Electronic Theses and Dissertations. Paper 2221. [cit. 24. 05. 2020]. [https://ir.library.louisville.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3250&context=etd&fbclid=IwAR3AhrxOto0yauvY\\_7qiPu19uAceqScbJsxvEegGdUIEKDH76enCs4dGU3w](https://ir.library.louisville.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3250&context=etd&fbclid=IwAR3AhrxOto0yauvY_7qiPu19uAceqScbJsxvEegGdUIEKDH76enCs4dGU3w)
- [21] Calignano, Flaviana & Minetola, Paolo. *Influence of Process Parameters on the Porosity, Accuracy, Roughness, and Support Structures of Hastelloy X Produced by Laser Powder Bed Fusion*. *Materials*. 12. 3178. 10.3390/ma12193178. 2019. [cit. 17. 07. 2020]. [https://www.researchgate.net/publication/336112166\\_Influence\\_of\\_Process\\_Parameters\\_on\\_the\\_Porosity\\_Accuracy\\_Roughness\\_and\\_Support\\_Structures\\_of\\_Hastelloy\\_X\\_Produced\\_by\\_Laser\\_Powder\\_Bed\\_Fusion](https://www.researchgate.net/publication/336112166_Influence_of_Process_Parameters_on_the_Porosity_Accuracy_Roughness_and_Support_Structures_of_Hastelloy_X_Produced_by_Laser_Powder_Bed_Fusion)
- [22] WANG, Xiaoqing. GONG, Xibing, CHOU, Kevin. *Review on Powder-bed Laser Additive Manufacturing of Inconel 718 Parts*. [cit. 18. 07. 2020] [https://www.slideshare.net/Xiaoqing\\_Wang\\_UA3D/msec-2015review-on-powder-bed-laser-additive-manufacturing-of-inconel-718-parts](https://www.slideshare.net/Xiaoqing_Wang_UA3D/msec-2015review-on-powder-bed-laser-additive-manufacturing-of-inconel-718-parts)
- [23] Ademar, R. & Aguilar, Marco & Uruchurtu, Jorge & Gallegos, Miguel & Juarez, Julio. *Electrochemical Corrosion Behavior of a Co20Cr Alloy in Artificial Saliva*. *International journal of electrochemical science*. 2015. [cit. 18. 07. 2020] [https://www.researchgate.net/figure/Microstructures-of-a-b-the-as-cast-Co20Cr-alloy-and-c-d-316-L-stainless-steel\\_fig1\\_280043993](https://www.researchgate.net/figure/Microstructures-of-a-b-the-as-cast-Co20Cr-alloy-and-c-d-316-L-stainless-steel_fig1_280043993)
- [24] ZETKOVÁ, Ivana. *Zpráva z tahové zkoušky* [cit. 27. 07. 2020]
- [25] *Material data sheet EOS NickelAlloy IN718*. [online]. [cit. 28. 07. 2020] [https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4528b4a1bf688496/ff974161c2057e6df56db5b67f0f5595/EOS\\_NickelAlloy\\_IN718\\_en.pdf?fbclid=IwAR3MDX12TAF-tvdyPKdUvCkOJyRxHyaVv2IDipkz69jBfW2v\\_CLvW1PyOa0](https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4528b4a1bf688496/ff974161c2057e6df56db5b67f0f5595/EOS_NickelAlloy_IN718_en.pdf?fbclid=IwAR3MDX12TAF-tvdyPKdUvCkOJyRxHyaVv2IDipkz69jBfW2v_CLvW1PyOa0)



## Seznam obrázků

Obr. 1: Vliv teploty žíhání na velikost zrna [9] .....	13
Obr. 2: Vliv teploty stárnutí na tvrdost slitiny [9] .....	14
Obr. 3: Vizualizace SLM metody [13] .....	17
Obr. 4: Orientace součásti na pracovním stole [4] .....	18
Obr. 5: Schéma podpor line s žebry .....	19
Obr. 6: Příklad podpůrné struktury typu block [21] .....	19
Obr. 7: Výplň struktury block [18] .....	20
Obr. 8: Mřížkové struktury diamant a gyroid [4] .....	21
Obr. 9: Typy podpůrných konstrukcí [4] .....	22
Obr. 10: Typy podpůrných struktur (pokračování) [4] .....	23
Obr. 11: aditivní technologie (a), kování (b), odlévání (c) [22][23] .....	23
Obr. 12: Jednobřítý soustružnický závitový nůž [11] .....	24
Obr. 13: Postupné tváření hlavy šroubu .....	25
Obr. 14: Ploché válcovací čelisti [15] .....	26
Obr. 15: Válcovací kotouče [14] .....	26
Obr. 16: Polotovary pro válcování závitu .....	27
Obr. 17: Válcování závitu .....	28
Obr. 18: Stav po válcování .....	28
Obr. 19: Mikrostruktura paty závitu .....	29
Obr. 20: Obrábění závitu závitové tyče .....	30
Obr. 20: Rozložení 1. tisku .....	32
Obr. 21: Podpory typu line s žebry (2. tisk) .....	33
Obr. 22: Podpory typu block (2. tisk) .....	33
Obr. 23: Orientace recoateru – 2. tisk .....	34
Obr. 24: 2. tisk – line s žebry (vlevo), block (vpravo) .....	34
Obr. 25: Rozložení 3. tisku .....	35
Obr. 26: Rozložení 4. tisku .....	36
Obr. 27: Rozložení 5. tisku .....	37
Obr. 28: Porovnání 5. tisku .....	38
Obr. 29: Rozložení 6. tisku .....	39
Obr. 30: Podpory line s žebry .....	41
Obr. 31: Vyztužení podporami block .....	42
Obr. 32: Porovnání poškození podpor .....	43
Obr. 33: Detail vylámaných podpor .....	44
Obr. 34: Podpory vyztužení nájezdové plochy recoateru .....	44
Obr. 35: Spojení podpůrných struktur s intervalem 0,4 mm .....	45
Obr. 36: Spojení podpůrných struktur s intervalem 0,8 mm .....	45
Obr. 37: podpory block na koncích šroubu .....	46
Obr. 38: Podpory pro fixaci .....	47
Obr. 39: Podpůrné struktury 7. tisku .....	48
Obr. 40: Podpůrné struktury 7. tisku .....	48
Obr. 41: rozložení 7. tisku .....	49
Obr. 42: Průběh tepelného zpracování .....	50
Obr. 43: Vzorek proříznutý závitovým očkem .....	51
Obr. 44: Podpůrné struktury vzorku s přídatkem a intervalem 0,6 mm .....	52

Obr. 45: Poškození vzorku s přídavkem a 0,8 mm intervalem.....	53
Obr. 46: Pískované vzorky - bez přídavku (vpravo), s přídavkem (vlevo) .....	54
Obr. 47: Vývojový diagram návrhů pro aditivní výrobu šroubů .....	55
Obr. 48: Výsledky tahové zkoušky .....	56

## Seznam tabulek

Tab. 1: Mechanické vlastnosti při namáhání tahem [9].....	14
Tab. 2: Mechanické vlastnosti při únavovém namáhání [9].....	15
Tab. 3: Obecné parametry tisku .....	31
Tab. 4: Přehled tisků.....	31
Tab. 5: Poloha vzorku 7 .....	40
Tab. 6: Parametry podpor line s žebry.....	41
Tab. 7: Parametry podpory block pod závitem .....	42
Tab. 8: Parametry vyztužujících podpor.....	46
Tab. 9: Parametry podpory block na koncích šroubu .....	47
Tab. 10: Parametry objemových podpor .....	47
Tab. 11: Porovnání pevnosti šroubů.....	56
Tab. 12: Shrnutí ceny za kus jednotlivých variant .....	57
Tab. 13: Porovnání nákladů na výrobu.....	57
Tab. 14: Bodové zhodnocení .....	60