

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv velikosti a tvaru podpůrných konstrukcí na tisknutelnost kovových dílů

Autor: **Bc. Adam SOBOTNÍK**  
Vedoucí práce: **Ing. Ivana ZETKOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam SOBOTNÍK**  
Osobní číslo: **S17N0070K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**  
Název tématu: **Vliv velikosti a tvaru podpůrných konstrukcí na tisknutelnost kovových dílů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh experimentu a jeho realizace
4. Zhodnocení výsledků a stanovení doporučení podpůrných konstrukcí
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- SHIGLEY, E. Joseph, MISCHKE, R. Charles a BUDYNAS, G. Richard, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil HARTL, Martin. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- BIAN, Linkan, ed., SHAMSAEI, Nima, ed. a USHER, John , ed. Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization, and control of mechanical properties. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1-4987-3998-6.
- CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. The 4th edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-41-8.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2018

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....  
Podpis autora

Tímto děkuji vedoucí mé diplomové práce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D. za ochotu, trpělivost a rady, které mi poskytla během jejího řešení.

Dále děkuji Doc. Ing. Miroslavovi Zetkovi, Ph.D. a Ing. Pavlovi Hanzlovi za poskytnutí podkladů a cenných rad, které mi pomohly při zpracování zadaného tématu.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Bc. Sobotník	Jméno Adam	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	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>	Nehodící se <b>škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv velikosti a tvaru podpůrných konstrukcí na tisknutelnost kovových dílů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	75	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	66	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	9
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Práce je věnována návrhu nové podpůrné konstrukce pro 3D tisk kovových dílů technologií DMLS. Na základě rozboru současné situace byl proveden výběr několika zástupců současně používaných a návrh některých nových typů podpůrných konstrukcí. Pro tyto zástupce bylo provedeno pevnostní ověření pomocí MKP analýzy. Na základě výsledků MKP analýzy byla navržena modifikace nejvhodnější podpůrné struktury. Tato modifikace byla následně vytištěna pomocí DMLS 3D tiskárny a její správnost ověřena prostřednictvím tahové zkoušky. Nově navrženou modifikaci podpůrné konstrukce lze ihned začít využívat v průmyslové praxi.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p>	<p style="text-align: center;">aditivní výroba, podpůrná konstrukce, 3D tisk kovových dílů, MKP analýza, tahová zkouška</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Sobotník	Name Adam	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková Ph.D.	Name Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Effect of the size and shape of supporting structures on the printability of metal parts		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	75	<b>TEXT PART</b>	66	<b>GRAPHICAL PART</b>	9
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The thesis is devoted to the design of a new support structure for 3D printing of metal parts using DMLS technology. Based on the analysis of the current situation, several representatives of the currently used and some new types of supporting structures were selected. Strength verification using FEM analysis was performed for these representatives. Based on the results of FEM analysis a modification of the most suitable supporting structure was designed. This modification was printed using the DMLS 3D printer and accuracy of design was verified by a tensile test. The newly designed support structure can be used immediately in industrial practice.</p>
<b>KEY WORDS</b>	additive manufacturing, supporting structure, 3D printing of metal parts, FEM analysis, tensile test

## Obsah

Obsah.....	8
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	10
Seznam obrázků .....	12
1 Úvod.....	15
1.1 Cíl práce.....	15
2 Rozbor současného stavu .....	16
2.1 Additive Manufacturing .....	16
2.1.1 Druhy AM .....	16
2.1.2 Direct metal laser sintering .....	17
2.1.2.1 Princip DMLS .....	17
2.1.2.2 Materiály pro DMLS.....	18
2.1.2.3 Postup výroby DMLS .....	18
2.1.2.4 Postprocessing DMLS .....	18
2.2 Podpůrné konstrukce .....	18
2.2.1 Optimalizace potřeby PK .....	19
2.2.1.1 Orientace součásti .....	19
2.2.1.2 Bezpodporné technologie.....	19
2.2.1.3 Redesign originálního dílu .....	20
2.2.2 Rozbor PK.....	20
2.2.3 Pravidla návrhu PK .....	23
2.2.3.1 Teplotní vlivy.....	24
2.2.3.2 Stěny pod úhlem .....	24
2.2.3.3 Převisy.....	25
2.2.3.4 Díry .....	25
2.2.3.5 Mosty .....	26
2.2.4 Obecná nastavení PK .....	27
2.2.5 Typy PK .....	28
2.2.6 Specifická nastavení PK.....	30
2.2.6.1 Angled Supports.....	30
2.2.6.2 Fragmentation .....	31
2.2.6.3 Perforations .....	31
2.2.6.4 Hatching Teeth.....	32
3 Návrh experimentu a jeho realizace .....	34
3.1 Návrh na základě MKP analýzy .....	34



3.1.1	Fáze 1 – PK s konstantní stěnou.....	35
3.1.1.1	Návrh a výpočet .....	35
3.1.1.2	Průběžné vyhodnocení .....	40
3.1.2	Fáze 2 – PK objemové a kombinované.....	40
3.1.2.1	Návrh a výpočet .....	40
3.1.2.2	Průběžné vyhodnocení .....	44
3.1.3	Fáze 3 – PK fragmentované .....	44
3.1.3.1	Návrh a výpočet .....	44
3.1.3.2	Průběžné vyhodnocení .....	45
3.1.4	Fáze 4 – Perforovaný Block .....	46
3.1.4.1	Návrh.....	46
3.1.4.2	Výpočet .....	48
3.1.4.3	Průběžné vyhodnocení .....	51
3.1.5	Hodnocení MKP analýzy .....	52
3.2	Realizace experimentu.....	53
3.2.1	Příprava zkušebních vzorků pro 3D tisk .....	53
3.2.1.1	Model .....	53
3.2.1.2	Parametry PK .....	54
3.2.1.3	Příprava tiskové úlohy .....	56
3.2.2	Tiskové zařízení .....	58
3.2.3	Výsledek tisku .....	59
3.2.3.1	Vyhodnocení neúspěšného tisku.....	60
3.2.4	Příprava nových zkušebních vzorků pro 3D tisk .....	61
3.2.5	Výsledek druhého tisku .....	62
3.3	Tahová zkouška vytištěných vzorků.....	63
3.3.1	Tahová zkouška.....	63
3.3.2	Zkušební zařízení .....	64
3.3.3	Realizace tahové zkoušky .....	65
3.3.3.1	Příprava tahové zkoušky .....	65
3.3.3.2	Výsledky tahové zkoušky .....	66
3.3.3.3	Vyhodnocení tahové zkoušky .....	70
4	Zhodnocení výsledků a stanovení doporučení podpůrných konstrukcí .....	72
5	Závěr.....	73
	Seznam použité literatury .....	74

## Seznam použitých zkratk a symbolů

PK	Podpůrná konstrukce	-
RTI	Regionální technologický institut	-
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni	-
AM	Additive Manufacturing	-
3D	Three dimension	-
DMLS	Direct metal laser sintering	-
RP	Rapid Prototyping	-
SLA	Stereolithography	-
SGC	Solid ground curing	-
LTP	Liquid thermal polymerization	-
BIS	Beam interference solidification	-
3DP	Three dimension printing	-
IJP	Inkjet printing	-
BPM	Ballistic particle manufacturing	-
SLM	Selective laser melting	-
SLS	Selective laser sintering	-
EBM	Electron beam manufacturing	-
FDM	Fused deposition modeling	-
DMD	Direct metal deposition	-
LPD	Laser powder deposition	-
SLC	Selective laser cladding	-
LOM	Laminated object manufacturing	-
SFP	Solid foil polymerization	-
EOS	Electro Optical Systems	-
TO	Topologická optimalizace	-
$\sigma$	Napětí	[Mpa]
F	Zátěžná síla	[N]
S	Plocha	[mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{DOV}$	Dovolené namáhání	[Mpa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[Mpa]
$k_s$	Koeficient bezpečnosti	-
k	Tuhost	[Nm]
$\Delta l$	Absolutní změna délky	[mm]
x	1. rozměr děrování - MKP analýza	[mm]
y	2. rozměr děrování - MKP analýza	[mm]
z	3. rozměr děrování - MKP analýza	[mm]
CAD	Computer aided design	-
$R_{eL}$	Dolní mez kluzu	[Mpa]
$R_{eH}$	Horní mez kluzu	[Mpa]
$F_H$	Zatížení na horní mezi kluzu	[N]
$F_L$	Zatížení na dolní mezi kluzu	[N]
$S_0$	Počáteční průřez	[mm <sup>2</sup> ]

$F_{p0,2}$	Zatížení na smluvní mezi kluzu	N
$R_m$	Mez pevnosti	[Mpa]
$F_m$	Maximální zatížení	[N]
A	Tažnost	[%]
$L_u$	Konečná měřená délka	[mm]
$L_0$	Počáteční délka	[mm]
Z	Kontrakce	[%]
$S_u$	Nejmenší plocha v místě lomu	[ $mm^2$ ]
$\Delta L_g$	Prodloužení při maximálním zatížení	[mm]
$\Delta L_u$	Rozdíl výsledné a počáteční měřené délky	[mm]
$S_{min}$	minimální průřez	[ $mm^2$ ]
a	1. rozměr děrování - Magics	[mm]
b	2. rozměr děrování - Magics	[mm]
c	3. rozměr děrování - Magics	[mm]
d	3. rozměr děrování - Magics	[mm]

## Seznam obrázků

Obrázek 2-1- Součást vytištěná technologií DMLS [4] .....	17
Obrázek 2-2 - Schéma principu výroby technologií DMLS [5].....	17
Obrázek 2-3 - Detail prášku pro DMLS (mat.Ti-6Al-4V) [6] .....	18
Obrázek 2-4 - možnosti orientace součásti na platformě [3].....	19
Obrázek 2-5 - Úprava modelu součásti za účelem redukce PK [3].....	20
Obrázek 2-6 - Teplotní vliv na součást bez PK a s PK [10].....	24
Obrázek 2-7 - Vliv změny úhlu stěny na kvalitu tisku[8] .....	25
Obrázek 2-8 - Detail vytištěných převisů[9] .....	25
Obrázek 2-9 - Omezení tisku kulatých děr[8] .....	26
Obrázek 2-10 - Deformace nepodporovaného mostu[8].....	26
Obrázek 2-11 - XY Offset .....	27
Obrázek 2-12 - No support Offset .....	27
Obrázek 2-13 - Vertical Wall Offset .....	27
Obrázek 2-14 - Lowest Line.....	27
Obrázek 2-15 - Z Offset .....	27
Obrázek 2-16 - Podpora typu Block .....	28
Obrázek 2-17 - Podpora typu Cones .....	28
Obrázek 2-18 - Podpora typu Contour .....	28
Obrázek 2-19 - Podpora typu Gusset .....	28
Obrázek 2-20- Podpora typu Point.....	28
Obrázek 2-21- Podpora typu Volume .....	28
Obrázek 2-22 - Podpora typu Web.....	29
Obrázek 2-23 - Podpora typu Line .....	29
Obrázek 2-24 - Podpora typu Tree .....	29
Obrázek 2-25 - Podpora typu Hybrid .....	29
Obrázek 2-26 - Kombinovaná podpora (Block + Volume).....	29
Obrázek 2-27 - Speciální typy objemových struktur.....	30
Obrázek 2-28 - Angled Support .....	31
Obrázek 2-29 - Fragmentation - Volume (vlevo), Contour (vpravo).....	31
Obrázek 2-30 - Perforations - detail nastavení děr .....	31
Obrázek 2-31 - Perforations - děrovaná PK typu Block .....	32
Obrázek 2-32 - Hatching Teeth [11] .....	32
Obrázek 2-33 - porovnání samovolného oddělení PK při různých parametrech Hatching Teeth - [11].....	33
Obrázek 2-34 - vznik pórovitosti povrchu v důsledku samovolného oddělení PK[11] .....	33
Obrázek 3-1 - Schéma 3D modelu vzorků pro MKP analýzu.....	34
Obrázek 3-2 - Schéma okrajových podmínek MKP analýzy .....	34
Obrázek 3-3 - MKP analýza - vzorek č. 1 - Block .....	36
Obrázek 3-4 - MKP analýza - vzorek č. 2 - Block se čtverci.....	36
Obrázek 3-5 - MKP analýza - vzorek č. 3 - Kruhy .....	36
Obrázek 3-6 - MKP analýza - vzorek č. 4 - Čáry.....	37
Obrázek 3-7 - MKP analýza - vzorek č. 5 - Kontura .....	37
Obrázek 3-8 - MKP analýza - vzorek č. 6 - Kruhy centrické.....	37
Obrázek 3-9 - MKP analýza - vzorek č. 7 - Block s kruhy .....	38
Obrázek 3-10 - MKP analýza - vzorek č. 8 - Block s kříži .....	38
Obrázek 3-11 - MKP analýza - vzorek č. 9 - Trojúhelníky.....	38
Obrázek 3-12 - MKP analýza - vzorek č. 10 - Voština .....	39
Obrázek 3-13 - MKP analýza - vzorek č. 11 - Web .....	39

Obrázek 3-14 – MKP analýza – vzorek č. 12 - Objem čtverec.....	41
Obrázek 3-15 - MKP analýza - vzorek č. 13 - Objem 4 čtverce .....	41
Obrázek 3-16 - MKP analýza - vzorek č. 14 - Objem 4 čtverce + Block .....	41
Obrázek 3-17 - MKP analýza - vzorek č. 15 - Block 3x tloušťka.....	42
Obrázek 3-18 - MKP analýza - vzorek č. 16 - Cone + Block .....	42
Obrázek 3-19 - MKP analýza - vzorek č. 17 - Cone 16x + Block .....	42
Obrázek 3-20 - MKP analýza - vzorek č. 18 - Kontura 3x tloušťka .....	43
Obrázek 3-21 - MKP analýza - vzorek č. 19 - Cone 9 .....	43
Obrázek 3-22 - MKP analýza - vzorek č. 20 - Cone 36 .....	43
Obrázek 3-23 - MKP analýza - vzorek č. 21 – Block fragmentovaný .....	45
Obrázek 3-24 - MKP analýza - vzorek č. 22 - Kontura fragmentovaná .....	45
Obrázek 3-25 - Schéma 3D modelu vzorků pro fázi 4 MKP .....	46
Obrázek 3-26 - Průřez neděrovanou vrstvou PK .....	46
Obrázek 3-27 - Detail zjemněné sítě .....	46
Obrázek 3-28 - Proměnné pro MKP analýzu děrování .....	47
Obrázek 3-29 - MKP analýza - menší PK typu Block bez děrování – experiment č.0.....	47
Obrázek 3-30 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 1.....	48
Obrázek 3-31 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 2.....	48
Obrázek 3-32 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 3.....	49
Obrázek 3-33 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 4.....	49
Obrázek 3-34 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 5.....	49
Obrázek 3-35 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 6.....	50
Obrázek 3-36 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 7.....	50
Obrázek 3-37 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 8.....	50
Obrázek 3-38 - Detail průběhu redukováného napětí obou typů děr dle metody HMM v MPa .....	52
Obrázek 3-39 - Rozměry zkušební vzorku pro tahovou zkoušku .....	53
Obrázek 3-40 - CAD model vzorků bez PK .....	53
Obrázek 3-41 - Detail části vzorku.....	53
Obrázek 3-42 - Parametry PK pro 3D tisk .....	54
Obrázek 3-43 - Detail děrování PK v řezu .....	55
Obrázek 3-44 - Detail provaření PK do objemu (Z-Offset).....	55
Obrázek 3-45 - Kompletní vzorek.....	56
Obrázek 3-46 - Uspořádání vzorků na stavěcí platformě.....	57
Obrázek 3-47 - Tiskové zařízení EOS M290 [13] .....	58
Obrázek 3-48 - Průběh tisku experimentu.....	59
Obrázek 3-49 - Selhání tisku prvního vzorku .....	59
Obrázek 3-50 - Finální selhání tisku .....	59
Obrázek 3-51 - Platforma s nedokončenými vzorky.....	60
Obrázek 3-52 - Rozměry zkráceného zkušební vzorku pro tahovou zkoušku .....	61
Obrázek 3-53 - CAD model zkrácených .....	61
Obrázek 3-54 - Kompletní zkrácený vzorek .....	61
Obrázek 3-55 - Úspěšně vytištěná platforma se vzorky - shora.....	62
Obrázek 3-56 - Úspěšně vytištěná platforma se vzorky - z boku.....	62
Obrázek 3-57 - Tahový diagram: s výraznou mezí kluzu (vlevo), s nevýraznou mezí kluzu (vpravo)[12] .....	63
Obrázek 3-58 - Trhací stroj Zwick/Roell Z250 [18] .....	64
Obrázek 3-59 - Vzorek upnutý do trhacího stroje.....	65
Obrázek 3-60 - Přetržený vzorek upnutý v trhacím zařízení.....	66
Obrázek 3-61 - Přetržený vzorek vyjmutý z trhacího zařízení.....	66

Obrázek 3-62 - Tahový diagram vzorek č.1-B.....	67
Obrázek 3-63 - Tahový diagram vzorek č.2-A .....	67
Obrázek 3-64 - Tahový diagram vzorek č.3-A .....	67
Obrázek 3-65 - Tahový diagram vzorek č.4-A .....	67
Obrázek 3-66 - Tahový diagram vzorek č.5-C.....	67
Obrázek 3-67 - Tahový diagram vzorek č.6-B.....	68
Obrázek 3-68 - Tahový diagram vzorek č.7-C.....	68
Obrázek 3-69 - Tahový diagram vzorek č.8-B.....	68
Obrázek 3-70 - Tahový diagram vzorek č.9-B.....	68
Obrázek 3-71 - Tahový diagram vzorek č.10-C.....	68
Obrázek 3-72 - Tahový diagram vzorek č.11-A .....	69
Obrázek 3-73 - Tahový diagram vzorek č.12-A .....	69
Obrázek 3-74 - Tahový diagram vzorek č.13-C.....	69
Obrázek 3-75 - Tahový diagram vzorek č.14-C.....	69
Obrázek 3-76 - Tahový diagram vzorek č.15-C.....	69
Obrázek 4-1 - Parametry PK pro 3D tisk .....	72

## Seznam tabulek

Tabulka 2-1- Typy používaných PK[3] .....	21
Tabulka 3-1 - Složení materiálu W-Nr 1.2709 v % [13].....	35
Tabulka 3-2 - Mechanické vlastnosti materiálu W-Nr 1.2709 [13] .....	35
Tabulka 3-3 - Shrnutí výsledků MKP analýzy - fáze 1 .....	40
Tabulka 3-4 - Shrnutí výsledků MKP analýzy - fáze 2.....	44
Tabulka 3-5 - Shrnutí výsledků MKP analýzy - fáze 3.....	45
Tabulka 3-6 - Plán experimentu MKP analýzy děrování PK.....	47
Tabulka 3-7 - Shrnutí výsledků MKP analýzy perforované PK typu Block.....	51
Tabulka 3-8 - Hodnoty parametrů PK pro 3D tisk.....	54
Tabulka 3-9 - Parametry tisku pro materiál MS1 tloušťky vrstvy 40 μm.....	56
Tabulka 3-10 - Parametry tiskového zařízení EOS M290 [13].....	58
Tabulka 3-11 - Parametry zkušebního zařízení [18] .....	64
Tabulka 3-12 - Výsledné hodnoty tahové zkoušky .....	70
Tabulka 3-13 - Dypočtené hodnoty tahové zkoušky.....	71

## 1 Úvod

3D tisk neboli Additive Manufacturing (dále jen AM), v překladu aditivní výroba, zažívá v poslední době velký rozmach. Výhody, které tyto technologie přináší, jsou nesporné. Postupující technologický pokrok neustále snižuje doposud poměrně vysoké náklady na 3D tisk, takže se otevírají stále nové možnosti jeho využití v praxi. 3D tisk se hojně využívá jak v kusové, tak hromadné výrobě v mnoha oborech, např. v leteckém a automobilovém průmyslu, umění, sportu, biomedicině a v posledních letech se začaly s úspěchem tisknout dokonce i obytné domy.

Tato práce se však bude zabývat především problematikou 3D tisku kovových dílů technologií Direct metal laser sintering (DMLS) s konkrétním zaměřením na podpůrné konstrukce (dále jen PK).

PK jsou jedním z nejdůležitějších prvků úspěšné výroby 3D tištěných dílů. Využívají se téměř ve všech odvětvích 3D tisku. Zatímco klíčovou výhodou 3D tisku je jeho schopnost vytvářet volné a složité geometrie, většina volnosti návrhu, kterou nabízí 3D tisk, by nebyla možná bez použití správných PK. Tyto struktury zabraňují deformaci a zborcení dílu, zajišťují složité vyrobitelné geometrie, např. převisy či díry, uchycení součásti k platformě odvod tepla a další funkce. Zatímco AM technologie jsou již ve světě hojně využívány, problematika PK je poměrně málo probádané téma. [1][2]

### 1.1 Cíl práce

Cílem této práce je vyhodnotit současný stav používaných PK v oblasti DMLS 3D tisku na základě studia dostupné literatury a zkušeností odborníků Regionálního technologického institutu (RTI) Západočeské univerzity v Plzni (ZČU). Dále budou zvoleny popř. navrženy nejlépe vyhovující typy PK a vytištěny zkušební vzorky. Tyto vzorky budou následně podrobeny tahové zkoušce. Výsledkem této práce bude návrh nejlépe vyhovující PK z hlediska pevnosti i dalších užitných vlastností, použitelné pro výrobu široké škály kovových dílů technologií DMLS.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Additive Manufacturing

AM nebo dříve také Rapid Prototyping (RP) či 3D tisk je skupina technologií, které slouží k co nejrychlejší tvorbě modelů, prototypů a součástí přímo z 3D datových souborů. Počátky těchto technologií se datují již od osmdesátých let minulého století. Podstatou všech AM technologií je to, že se fyzický model vytváří postupně, opakovaným nanášením materiálu po jednotlivých vrstvách, na rozdíl od konvenčních metod výroby např. soustružení, vrtání či frézování, kde je materiál z polotovaru odebírán ve formě třísek. [3]

#### Výhody AM

- Nízké výrobní náklady
- Minimalizace odpadního materiálu
- Krátké výrobní časy
- Možnost tvorby geometricky velmi složitých součástí
- Vývoj a optimalizace součástí před zahájením sériové výroby
- Jednoduchá vstupní data

#### Nevýhody AM

- Vyšší pořizovací náklady výrobního stroje
- Velikost dílu je obvykle limitována výrobním zařízením
- Nutnost úpravy dílů před dalším využitím

#### 2.1.1 Druhy AM

Dle normy ISO 17296-1 lze technologie 3D tisku rozdělit do sedmi skupin. Níže jsou stručně představeny jejich principy, používaný materiál a zástupci těchto skupin:

- **Vat photopolymerization** - kapalný fotopolymer je v nádobě na hladině selektivně vystavován paprsku světla, který spustí proces fotomerizace (tedy vytvrzování). Tyto technologie využívají převážně fotosenzitivní polymery. Metody pracující na tomto principu jsou např.: stereolithography (SLA), Solid ground curing (SGC), Liquid thermal polymerization (LTP), Beam interference solidification (BIS).
- **Binder jetting** - tekuté pojivo je selektivně vstříkováno do práškového stavebního materiálu. Tato technologie pracuje s práškovými materiály. Metoda pracující tímto způsobem je např. Three dimensional printing (3DP).
- **Material jetting** - kapičky stavebního materiálu jsou selektivně deponovány do vrstev. Používá se pro tekuté materiály, termoplasty nebo kovy, které se jednoduše taví a tuhnou. Zástupci této technologie jsou např.: Inkjet printing (IJP) nebo Ballistic particle manufacturing (BPM).
- **Powder bed fusion** - tepelná energie selektivně spéká oblasti práškového materiálu. Používají se práškové materiály z řady druhů ocelí, kobaltu, chromu, titanu, hliníku, vosku, nylonu atd. Do této skupiny technologií patří: Selective laser melting (SLM), Selective laser sintering (SLS), Direct metal laser sintering (DMLS), Electron beam manufacturing (EBM).
- **Material extrusion** - materiál je vytlačován přes trysku a selektivně nanášen do vrstev. Využívá termoplastické či keramické materiály. Tuto technologii využívá např.: Robocasting nebo Fused deposition modeling (FDM)
- **Directed energy deposition** - soustředěná tepelná energie je využita k roztavení a spojení materiálů, které jsou současně nanášeny do vrstvy. Využívají se převážně kovové prášky. Zástupci této technologie jsou: Direct metal deposition (DMD), Laser powder deposition (LPD), Selective laser cladding (SLC).

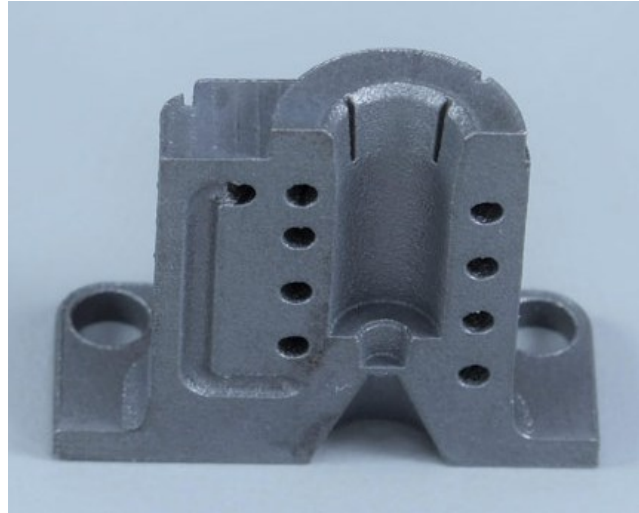


- **Sheet lamination** - finální objekt je vytvořen spojováním plechů materiálu. Používají se polo-polymerizované folie nebo speciální přílnavý papír. Tento princip využívají např. technologie: Laminated object manufacturing (LOM), Solid foil polymerization (SFP).

Většina těchto technologií musí používat pro správnou funkci PK. [3][16]

### 2.1.2 Direct metal laser sintering

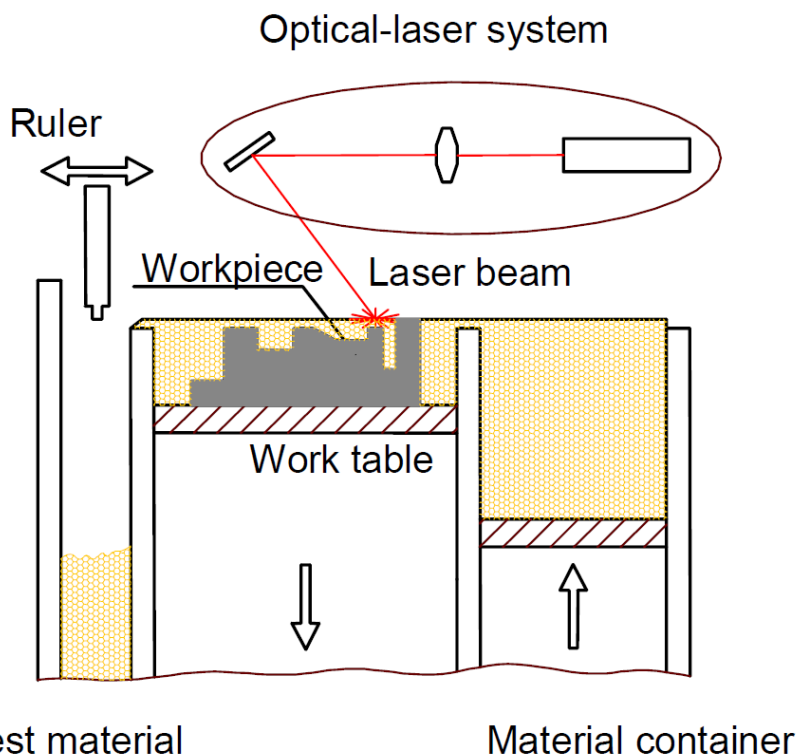
DMLS je technologie AM založená na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. Tato metoda je licencována firmou Electro Optical Systems (EOS) a byla vyvinuta v roce 1995. Touto technologií lze velmi rychle vyrobit plně funkční (třeba i tvarově rozdílné) kovové díly v jediném procesu. Na obrázku 2-1 lze vidět součást vytištěnou metodou DMLS.



Obrázek 2-1- Součást vytištěná technologií DMLS [4]

#### 2.1.2.1 Princip DMLS

Princip fungování technologie DMLS bude popsán na obrázku 2-2. Tenká vrstva kovového prášku (20-80  $\mu\text{m}$ ) je ze zásobníku prášku (Material container) nanesena na stavěcí platformu (Work table či building platform) pomocí keramického, kovového nebo karbonového pravítka (Ruler nebo Recoter).



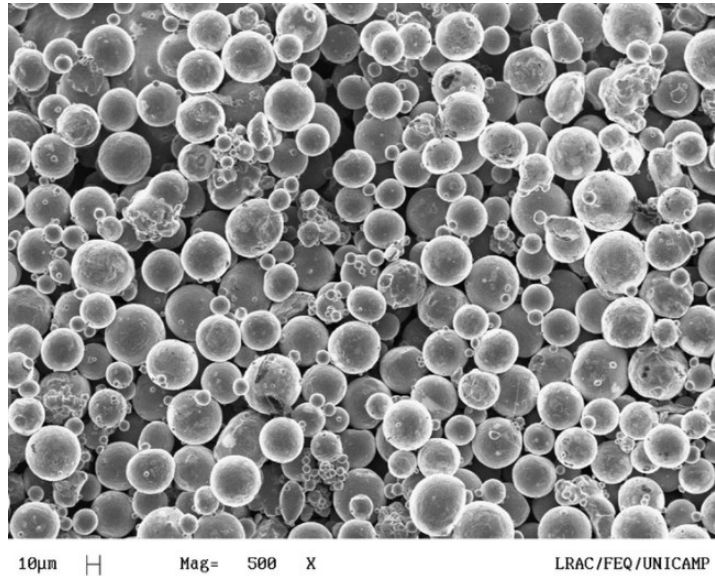
Obrázek 2-2 - Schéma principu výroby technologií DMLS [5]

Poté je prášek spékán energetickým laserovým paprskem (Laser beam) přesně v místech, které odpovídají řezu součástí (Workpiece) pro konkrétní vrstvu. Po spečení celého řezu se platforma posune dolů o přírůstek jedné vrstvy a tento proces se opakuje, dokud není součást zcela vystavěna. Zbylý prášek v zásobníku, kolem součásti a v přepradovém zásobníku (Rest material nebo Collector), který nebyl vystaven laserovému

paprsku, lze po tisku recyklovat a použít pro další výrobu. Celý proces probíhá v ochranné atmosféře (obvykle argonu nebo dusíku) v závislosti na použitém prášku a provozních parametrech stroje. [5]

### 2.1.2.2 Materiály pro DMLS

Jak již bylo řečeno materiálem pro technologii DMLS je kovový prášek. Kvalita tohoto prášku výrazně ovlivňuje kvalitu povrchu, funkčnost a tedy i celkovou jakost výsledného produktu. Prášky se nejčastěji vyrábí technologií rozprašování plynem - Gas atomization, díky které má výsledný prášek vhodný kulovitý tvar, který nejlépe vyplňuje objem. Vhodná velikost zrna pro laserové spékání se pohybuje mezi 10-50  $\mu\text{m}$ . Společnost EOS, která tyto prášky dodává, nabízí celou řadu materiálů např.: oceli, lehké slitiny, super slitiny (Ti-64), kompozity (IN625) a mnoho dalších. Na obrázku 2-3 lze vidět detail prášku z materiálu Ti-6Al-4V pro DMLS. [5]



Obrázek 2-3 - Detail prášku pro DMLS (mat.Ti-6Al-4V) [6]

### 2.1.2.3 Postup výroby DMLS

Celý proces začíná u 3D CAD modelu vyráběné součásti.

- 3D model se importuje do softwaru (obvykle Materialise Magics) ve formátu .STL.
- Operátor určí vhodnou pozici dílu (dle charakteru geometrie), pokud je potřeba navrhne PK a zvolí tloušťku spékáných vrstev.
- Software dále „rozřeže“ model dle příslušných vrstev zamýšleného stavění součásti a data se nahrají do výrobního zařízení.
- Výrobní zařízení se připraví na tisk. (příprava prášku, ochranné atmosféry, ustavení platformy, popř. předehřátí platformy)
- Spustí se proces tisku. Viz. kapitola 2.1.2.1.
- Tepelné zpracování
- Postprocessing (dokončovací operace) [5][7]

### 2.1.2.4 Postprocessing DMLS

Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí každého procesu výroby metodou DMLS. Po skončení procesu tisku je platforma s hotovým výrobkem vyjmuta ze stroje. Nespotebovaný prášek je přemístěn odsáním do zásobníku a může být použit pro další výrobu. Ihned po vyndání ze stroje je obvykle výrobek i s platformou vyžhán kvůli odstranění zbytkového napětí. Dále se odstraňují podpory z povrchu výrobku. Dle požadavků na kvalitu povrchu může být součást broušena, pískována či leštěna. Dále může být také obráběna klasickými konvenčními metodami (frézování, soustružení atd.). [5][7]

## 2.2 Podpůrné konstrukce

Důvodem použití podpůrných struktur je zajistit tisknutelnost vyráběného dílu. Obecně, 3D model s převyšujícími prvky, dírami nebo hranami pod úhlem potřebují pro úspěšnou výrobu PK, protože tištěný materiál není schopen zůstat v pozici "ve vzduchu". PK jsou tedy

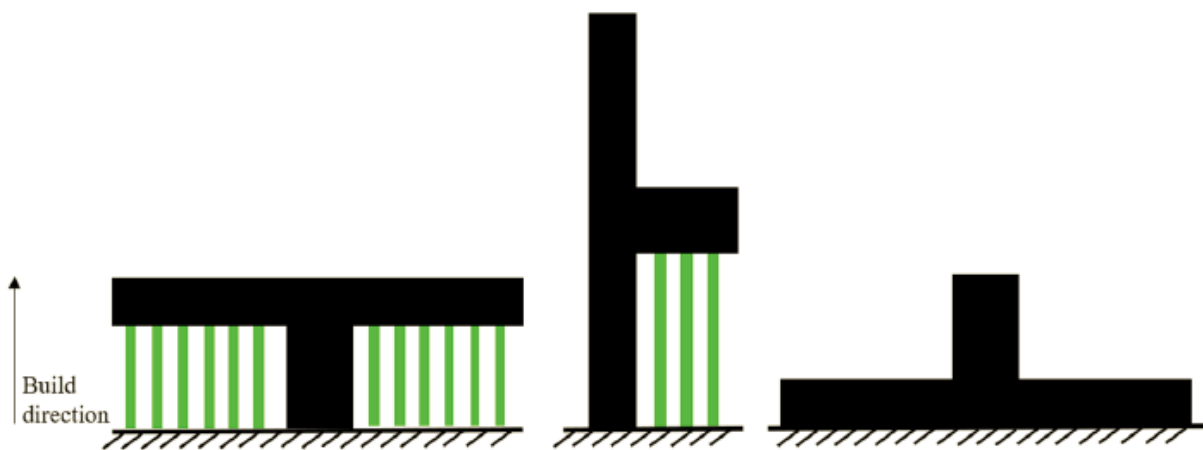
nezbytné k udržení těchto tištěných prvků či celé součásti v zamýšlené pozici. Nicméně použití PK s sebou nese také řadu nevýhod (delší čas výroby, větší spotřeba materiálu, nutnost postprocesingu, zhoršenou kvalitu povrchu, vyšší celkové náklady atd.), proto se mnohé studie zabývají možnostmi, jak se obejít bez PK nebo redukovat jejich množství (objem). V následující kapitole budou vysvětleny některé z nich. [3]

## 2.2.1 Optimalizace potřeby PK

Výzkum v oblasti podpůrných struktur pro 3D tisk je vysoce zaměřen na redukování trvání tisku, ušetřením podpůrného materiálu, dokončovacích operací či změnou a optimalizací PK.

### 2.2.1.1 Orientace součásti

Orientace součásti hraje důležitou roli v AM procesu. Má velký vliv na finální vlastnosti výrobku a mnohdy rozhoduje, zda jsou vůbec PK potřeba. Dále orientace součásti ovlivňuje umístění a plochu kontaktu výrobku s PK, čas budování i cenu vyráběné součásti. Na obrázku 2-4 lze vidět jednoduchou součást tvaru "T", jejímž natočením na platformě se dá snadno zredukovat nebo úplně odstranit potřeba PK pro převislé konce. Existuje řada výzkumů zabývajících se snižováním objemu PK v závislosti na orientaci dílu. Byly vyvinuty algoritmy, které určují toto natočení součásti ve snaze minimalizovat potřebu PK. Zde je ovšem třeba zdůraznit, že jen u málo obvykle vyráběných dílů, zvláště se složitou geometrií, je tímto způsobem možné se úplně zbavit nutnosti použití PK. [3][5]



Obrázek 2-4 - možnosti orientace součásti na platformě [3]

### 2.2.1.2 Bezpodporné technologie

Metoda SLS používá lasery pro zpracování polymerních materiálů. Stejně jako DMLS staví výslednou součást vrstvu po vrstvě, ale je to schopna udělat bez požadavku na PK. SLS používá speciální polymerní materiály a metodou opatrného řízení teploty vytváří bezpodporní díly. Během procesu se teploty práškové vrstvy udržují nad teplotou tuhnutí materiálu, ale pod teplotou tání. Materiál, který není zpracováván laserem, zůstává v pevném stavu, ale teplota prášku zajišťuje, že laserem natavený polymer zůstane kapalným po celou dobu stavění a nezmění se na pevnou fázi, dokud není tisk hotový. Po skončení tisku se část nechá vychladnout po dobu několika hodin, než úplně ztuhne.

Odstranění rychlého ztuhnutí materiálu v průběhu stavby snižuje tendenci k deformaci součástí a eliminuje požadavek na PK. Navíc součásti SLS nemusí být fyzicky připojeny k podkladu a proto mohou být díly uspořádány nad sebou, což zvyšuje produktivitu.

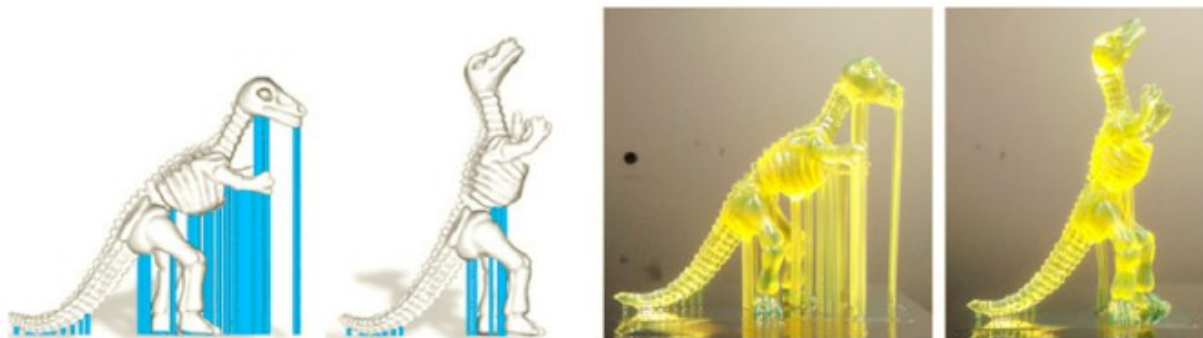
Tyto poznatky byly využity i k tisku kovových dílů. V současné době však nejsou známé žádné "super chladící kovy", které by měly stejné vlastnosti. Existují ovšem kombinace kovů,

kteří při smíchání v určitém poměru tvoří tzv. Eutektickou slitinu, která vykazuje podobné chování jako uvedené polymery. Příkladem jest slitina bizmutu a zinku. Stavební prášek z této směsi se udržuje na teplotě eutektického bodu slitiny, která prášek neroztaví, přestože je teplota tání bizmutu pod touto teplotou. Když laser scanuje určené oblasti, prášek se taví a vytváří slitinu, která bude nyní tuhnout pouze za teploty pod eutektickým bodem. Protože tato slitina nebude tuhnout rychle, nebude ani vytvářet místa koncentrace napětí.

Materiály s nízkou teplotou tavení, jako je bizmut, cín a zinek, mohou vytvářet eutektické slitiny s nízkými eutektickými teplotami tání, avšak tyto materiály poskytují omezený inženýrský potenciál kvůli jejich špatným mechanickým vlastnostem.[10]

### 2.2.1.3 Redesign originálního dílu

Ke způsobům redukce potřeby PK je třeba zmínit ještě jednu metodu, která není svojí podstatou optimalizace PK, nicméně může v mnohých případech velmi usnadnit výrobu, pokud takový zásah umožňuje zadání konstrukce či zákazníka. Jedná se o přemodelování samotné tištěné součásti. Metody topologické optimalizace jsou hojně využívány při řešení nevyrobitelných prvků v modelech pro konvenční metody výroby (obrábění, odlévání atd.). Výzkum 3D tisku si tyto strategie také osvojil ve snaze dosáhnout co nejlepšího návrhu z hlediska zatížení a vazeb. Obrázek 2-5 demonstruje, jak lze upravením modelu značně zredukovat množství potřebných PK. Tato metoda pro minimalizaci potřeby PK by ovšem měla být tou úplně nejzazší, protože hlavním účelem 3D tisku je vyrábět právě geometricky složité součásti, které konvenčními metodami nelze. Při volnosti návrhu modelu je to ale velmi efektivní řešení.[3]

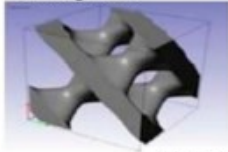
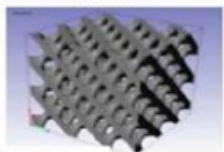
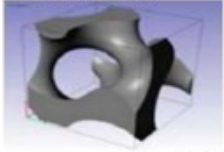
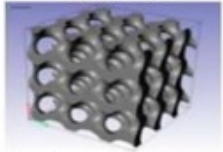
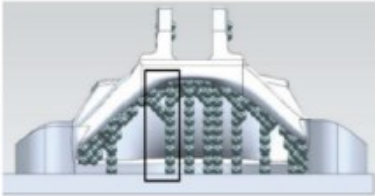





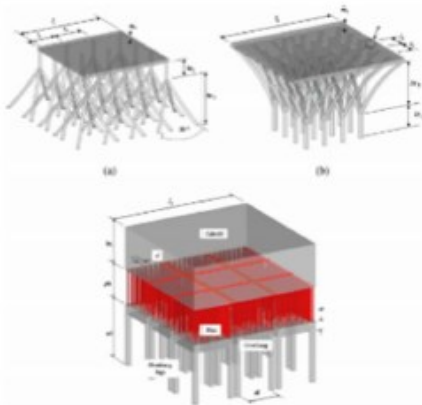
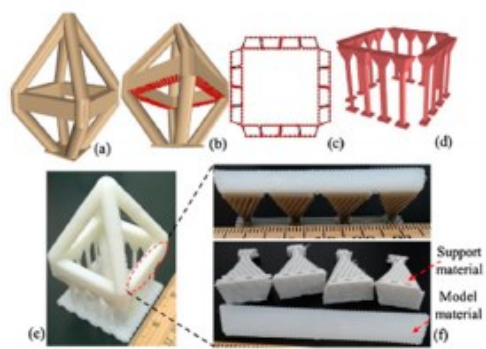
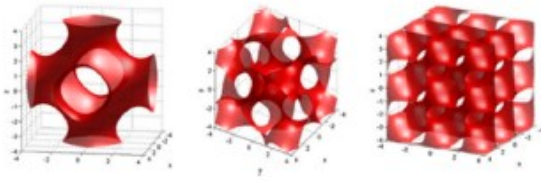


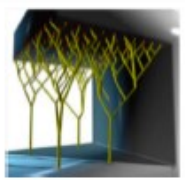
Obrázek 2-5 - Úprava modelu součásti za účelem redukce PK [3]

### 2.2.2 Rozbor PK

Rozdílné technologie 3D tisku mají různé důvody pro vyžadování podpůrných struktur. Některé tyto struktury jsou vyžadovány pro zvýšení odolnosti proti deformacím či zhroucení následkem gravitace během procesu nebo jako přídržení nepřipojených prvků součástí. PK mohou být také použity pro zmírnění efektu, který způsobuje generovaný nárůst tepla během procesu a smrštění během tuhnutí, což je spojeno s většinou AM technologií. To pomáhá snížit tepelnou deformaci, která může vést až k porušení, zkroucení, prohnutí, oddělení vrstev nebo smrštění. PK mají být také použity k vyvážení tisknutého objektu tím, že jej bezpečně uchyť k platformě během výroby či jako výplň dutých částí. V Tabulce 2-1 jsou pro představu zobrazeny některé typy používaných PK v různých odvětvích 3D tisku.

Tabulka 2-1- Typy používaných PK[3]

Support Methods	Suitable Techniques	Examples
Lattice support	Metal AM processes	<p>A single cell</p>  <p>3x3x3 cells</p>  <p>Schwartz diamond</p>
		<p>A single cell</p>  <p>3x3x3 cells</p>  <p>Schoen gyroid</p>
Unit cell support	All processes	 
Space-efficient branching support	FDM	

Support Methods	Suitable Techniques	Examples
Bridge support	FDM	
"Y", "Y" and Pin support	SLM	
Grain support	FDM	
Cellular support	SLM	
Honeycomb support	FDM	
Sparse tree support	FDM/DLP	
Tree-like support	FDM	

Obecně lze účely podpůrných struktur rozdělit na 3 typy:

- Některé procesy tisku mohou zahrnovat velké tepelné nárůsty, speciálně v případě procesů s kovovými výrobky, přičemž může dojít k deformacím tvaru a zbytkovému namáhání v důsledku akumulace tohoto nadměrného tepla. V tomto případě hraje podpůrná struktura roli jak tepelného odvaděče, tak zesilovače tuhosti.
- Lokální procesy ukládání (jako například FDM nebo DMD) mohou uložit materiál pouze na existující vrstvy níže. PK jsou zde proto, aby byl materiál uložen v určené výšce a bylo dosaženo zamýšlené geometrie.
- Tvary tištěných částí se mohou během tisku pohybovat nebo deformovat, obvykle když navržená část není vyvážená nebo surovina (prášek, pryskyřice) není schopna udržet váhu této části. V tomto případě nosná konstrukce hraje roli upevnění. Pokud zde není PK, část není schopna stát v rovnováze a zhrouť se. Dále může PK působit jako vazba v procesech s práškovým materiálem, aby se zastavil jakýkoliv pohyb, zejména posun horních vrstev během nanášení nové vrstvy prášku.

Hlavní nevýhody PK jsou následující:

- Odstranění podpůrných struktur po tisku často vyžaduje významný podíl manuální práce, hlavně v případě tisku kovových materiálů. PK vyžadují čas navíc, aby mohly být po tisku odříznuty, vybroušeny nebo odfrézovány. Následkem toho se zvyšuje pracnost a doba výroby části. Různé podpůrné metody také povedou k rozdílné povrchové drsnosti povrchu, a tím ovlivní následné zpracování.
- Požadavek ručního odstranění podpěry z části omezuje geometrickou svobodu návrhu součásti, protože musí existovat přístup k těmto plochám pro ruční nástroje.
- PK zpravidla vedou k vytváření nadbytečného odpadního materiálu, pokud není po odstranění recyklovatelný.
- Po přidání PK k části bude doba tisku delší, protože podpůrná struktura se musí také vytisknout. Dále to vede ke zvýšení nákladů za spotřebu energie, poněvadž aditivní výrobní procesy mají obvykle náklady na energii závislé na objemu použitého materiálu.
- Zvyšuje se časová náročnost přípravy tisku dílu, protože se do návrhu musí zahrnout podpůrné struktury i jejich umístění. To také znamená větší výsledný datový soubor pro danou část.
- Nastavení modelů .STL (nebo ekvivalentních datových souborů) připravených k tisku vyžaduje specifikaci orientace tisku a následné generování a umístění nosných konstrukcí. To obecně vyžaduje manuální zásah na základě odborných znalostí provozovatele.
- Odstranění podpůrné struktury může poškodit výslednou kvalitu povrchu výrobku.[3][15]

### 2.2.3 Pravidla návrhu PK

Většina metod tvoření PK je založena na následujících základních pravidlech:

- Vyhnout se dířám velkých průměrů, jejichž osa je rovnoběžná s plochou platformy.
- Vyhnout se prvkům, jejichž stěna svírá malý úhel s plochou platformy.
- Vyhnout se nutnosti podporovat nepřístupné plochy, kde půjdou PK obtížně odstranit.
- Optimalizovat PK, aby co nejvíce redukovala potřebu materiálu.

Tato pravidla jsou velmi důležitá a obecně platná. Zejména při zaměření na výrobu dílů pro RP je ale dodržování těchto principů značně svazující. Součásti pro reálnou výrobu jsou totiž mnohdy velmi složité a omezení na ně kladené mohou mít negativní dopad na kvalitu výsledné součásti. Je proto vhodné si ověřit, zda je nutné všem diskutovaným pravidlům

vyhovět, vzhledem k definované aplikaci vyráběné součásti. Návrh PK by měl dále zohlednit: tisknutelnost, omezení úhlu převisů, stabilitu součásti, tepelné podmínky, jednoduchost a způsob odstranění PK.

Další faktory, na které by měl být při návrhu brán zřetel, jsou např.:

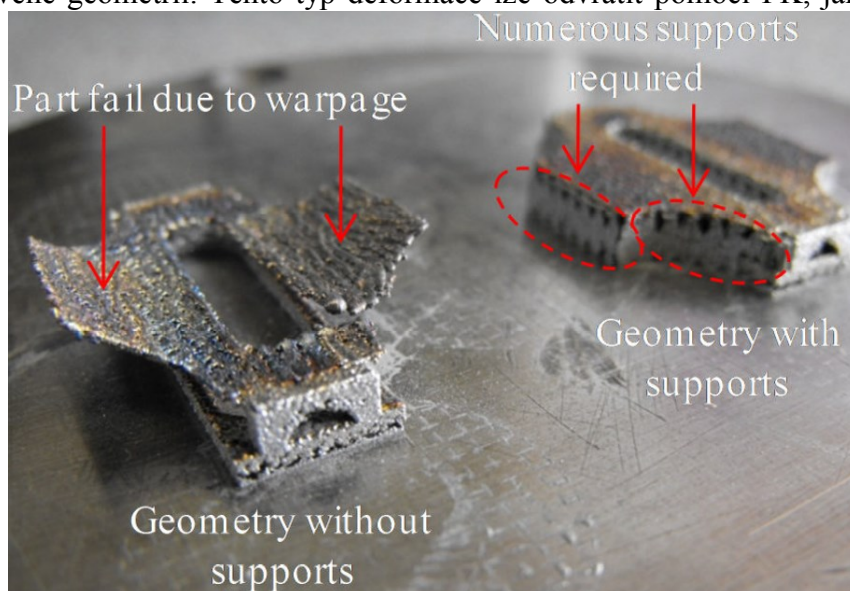
- PK by měly zabránit zborcení či deformaci součásti, zejména v oblasti okrajové kontury, která potřebuje podporu.
- Pro procesy tisku kovových dílů by měl návrh zahrnovat simulace tepelných a pevnostních zatížení.
- Síla spojení mezi PK a tištěnou součástí by měla být minimální (ale zároveň plnit své podpůrné funkce) s cílem co nejsnazšího odstranění.
- Oblast kontaktu mezi součástí a PK by měla být co nejmenší, aby se zredukovalo poškození povrchu při jejich odstraňování.
- Při návrhu PK by se mělo zohlednit využití materiálu a čas stavění, jako významné faktory při hledání kompromisu mezi PK a finální kvalitou součásti.

Existuje mnoho softwarových aplikací pro generování PK. Například CURA a Slic3r pro FDM. Pro procesy výroby kovových dílů se obvykle používá Magics. [3][15][16]

### 2.2.3.1 Teplotní vlivy

Vysoká tepelná intenzita je generována zdrojem laseru během zpracování, což je při použití technologie DMLS nutné pro zajištění úplného roztavení částic kovového prášku a tím minimalizovat poréznost dílu. Po rychlém zahřátí a natavení materiálu následuje rychlé ztuhnutí vyvolávající tepelné změny, které způsobují oblasti částečného rozšiřování/zkracování v různých místech a následně vytváří napětí, které může způsobit deformaci součásti. Příklad takovéto deformace je k vidění na obrázku 2-6 (vlevo), součást je deformována kvůli neukotvené geometrii. Tento typ deformace lze odvrátit pomocí PK, jak lze vidět na obrázku 2-6

(vpravo). Podpory jsou metalurgicky přitavené k podkladu a v kritických bodech součásti nuceně drží geometrie na místě. Samotné použití PK však nezaručuje, že komponenty nebudou deformovány, velké geometrie s náchylností na tento druh namáhání mohou odtrhnout podpory od podkladu během stavění a způsobit tím selhání procesu.[10]



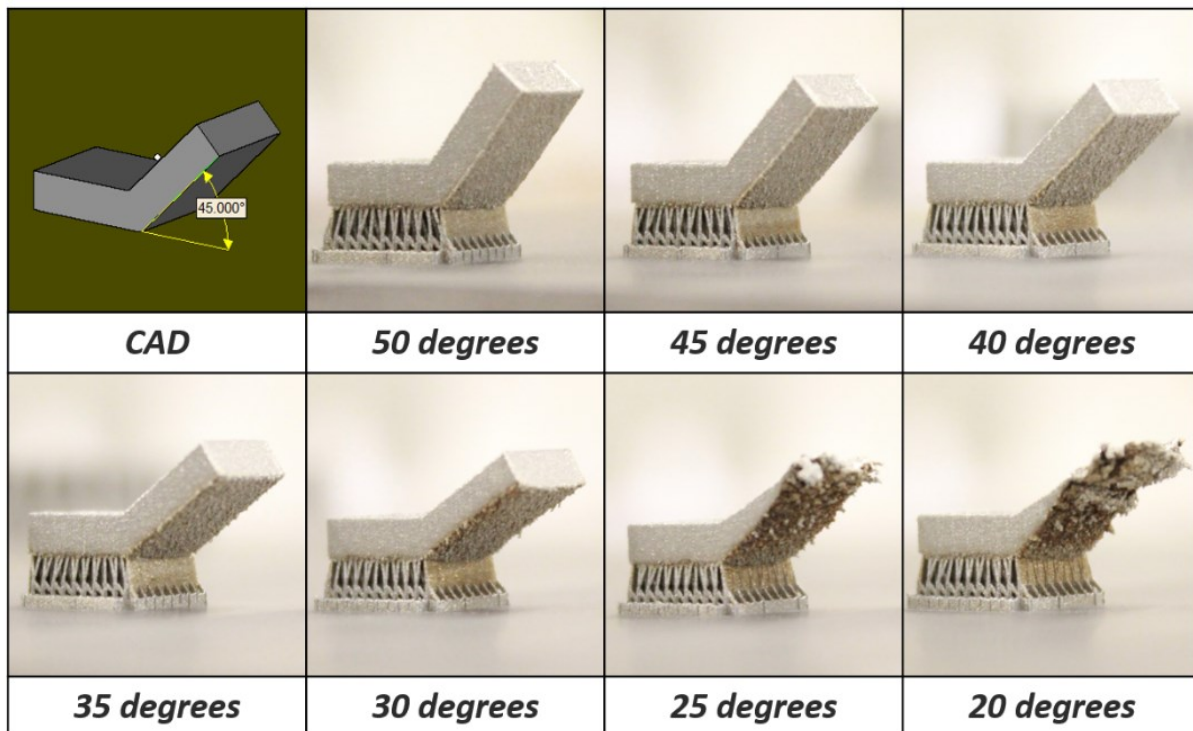
Obrázek 2-6 - Teplotní vliv na součást bez PK a s PK [10]

### 2.2.3.2 Stěny pod úhlem

Samonosnými prvky obecně označujeme takové, které nepotřebují pro své vystavení podporu, tedy jim jako základna pro další růst stačí předchozí vrstva. U stěn svírajících s platformou určitý úhel platí pravidlo, že čím menší je tento úhel, tím větší je předpoklad, že se prvek sám neudrží. Pro každý materiál lze dohledat jinou hodnotu tohoto úhlu, avšak obecně platí,



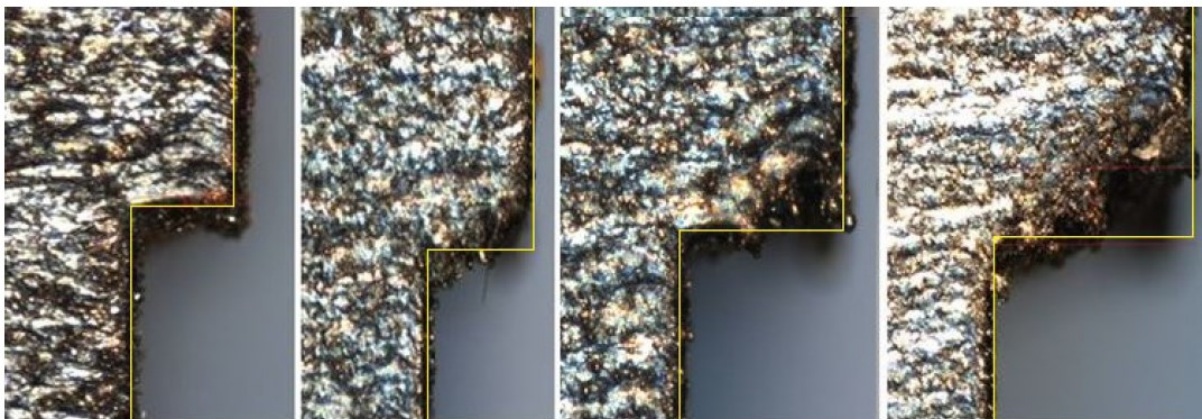
že samonosný úhel se u většiny výrobců rovná 45°. Na obrázku 2-7 lze vidět, že se zmenšujícím se úhlem klesá kvalita povrchu spodní plochy stěny, až nevyhnutelně dochází k jejímu propadu.[8]



Obrázek 2-7 - Vliv změny úhlu stěny na kvalitu tisku[8]

### 2.2.3.3 Převisy

Převisy se liší od samonosných stěn v tom, že zde dochází ke skokové změně geometrie a následující vrstva nemá na čem stavět. DMLS je v tomto směru oproti ostatním technologiím 3D tisku poměrně omezená. Při navrhování převisů pro tento způsob výroby se doporučuje maximální délka 0,5mm. Na obrázku 2-8 je vidět detail vytištěných převisů o délkách (zleva) 0,6; 0,8; 1,2; 1,6mm. Pouze první z nich se dá určit jako vyhovující.[8][9]

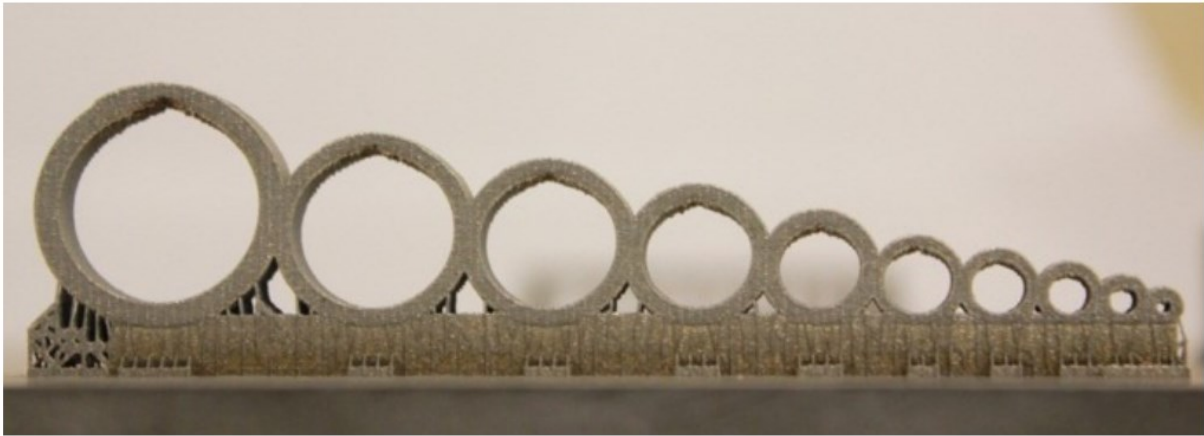


Obrázek 2-8 - Detail vytištěných převisů[9]

### 2.2.3.4 Díry

Možnost tisku složitých vnitřních kanálů a děr je jedna z předních výhod AM, protože je téměř nemožné je vyrábět konvenčními metodami. Tímto způsobem lze vyrobit např. konformní kanály skrz součást nebo snížit celkovou hmotnost. U kulatých děr, jejichž osa je rovnoběžná s platformou se doporučuje nepřekročit průměr 8mm. Podobně jako u stěn pod úhlem se nepodložená spodní plocha díry začne se zvětšujícím se průměrem deformovat. Viz.

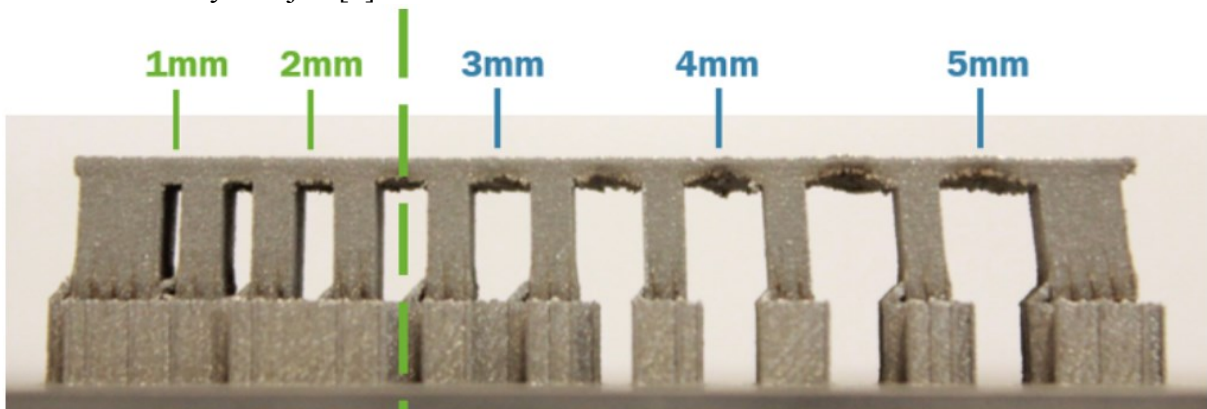
obrázek 2-9 (průměry vnitřních otvorů jsou zleva 28, 22, 18, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2 mm). Jedna z možností jak se tomuto problému vyhnout je navrhnout díry ve tvaru kapky nebo diamantu (pokud to funkce dílu umožňuje). Kanály, které kopírují tyto tvary, jsou samonosné a umožní tím maximalizovat svůj průměr.[8]



Obrázek 2-9 - Omezení tisku kulatých děr[8]

### 2.2.3.5 Mosty

Mostem se v tomto případě označuje jakákoliv plochá geometrie směřující dolů, která je podporována dvěma nebo více prvky. Maximální doporučená nepodporovaná vzdálenost pro proces DMLS je 2mm. Oproti jiným technologiím 3D tisku je tato vzdálenost relativně krátká z důvodu namáhání od rychlého ohřevu a následného ochlazení. Na obrázku 2-10 je vidět, jak se most vtahuje do nosných konstrukcí, když se zvětšuje nepodporovaná vzdálenost. Části, které překračují tento doporučený limit, budou mít špatnou kvalitu povrchu a budou tedy konstrukčně nevyhovující.[8]

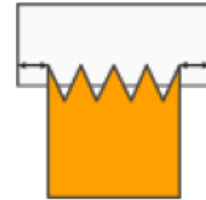


Obrázek 2-10 - Deformace nepodporovaného mostu[8]

#### 2.2.4 Obecná nastavení PK

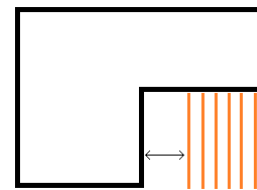
Většina společností zaměřených na výrobu pomocí technologie DMLS využívá pro tvorbu PK software Materialise Magics. Typy PK a možností jejich nastavení je celá řada. Závisí především na funkci součásti, použitém materiálu, velikosti a četnosti složitě tisknutelných prvků (viz. 2.2.3) a zkušenosti operátora. Hlavní obecná nastavení, která jsou obdobná pro všechny typy PK jsou především tato:

- **XY Offset** - vzdálenost mezi hranou součásti a začátkem PK. Při určování této vzdálenosti je třeba zohledňovat pravidla o převisech popsaná v předchozí kapitole (viz. obrázek 2-11).



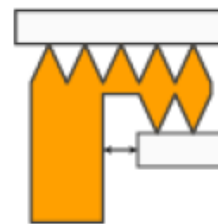
Obrázek 2-11 - XY Offset

- **No Support Offset** - vzdálenost mezi vertikální stěnou součásti a PK. Vertikální stěna může zajistit podporu pro další stavění, proto pro určitý velmi malý převis není třeba PK (viz. obrázek 2-12).



Obrázek 2-12 - No support Offset

- **Vertical Wall Offset** - další možnost nastavení vzdálenosti mezi vertikální stěnou součásti a PK. V případě generování PK blízko vertikálních stěn je nutné zajistit mezeru mezi nimi, aby nedošlo k nevyžádanému dotyku a následnému znehodnocení povrchu (viz. obrázek 2-13).



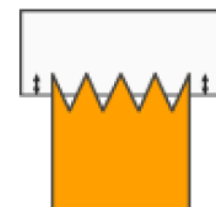
Obrázek 2-13 - Vertical Wall Offset

- **Lowest Line** - při umístění podpor pod zakřivenou součást může dojít k situaci, kdy nejnižší řádek není dostatečně podepřen, což způsobí problémy při stavění. Tato funkce vyhledá a automaticky přidá další podporu do tohoto kritického místa (viz. obrázek 2-14).



Obrázek 2-14 - Lowest Line

- **Z Offset** - vzdálenost „prorůstání“ podpory do součásti. Tato funkce je velmi důležitá pro správné propojení PK s vyráběnou součástí a stabilitu tisku. Čím více je PK prorostlá do součásti, tím je stavění kvalitnější, ale po tisku se PK hůře odstraňují a hrozí nebezpečí poškození povrchu (viz. obrázek 2-15).

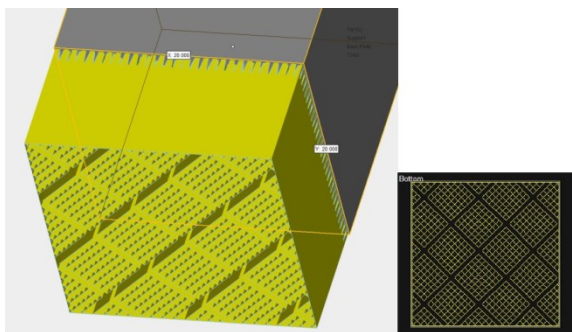


Obrázek 2-15 - Z Offset

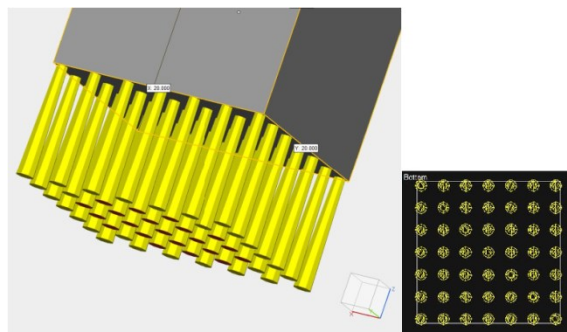
Další dostupná obecná nastavení jsou např.: Local Minima, Broaden Support, Reinforcement Line, Solid Border nebo Filter Segments.[12]

### 2.2.5 Typy PK

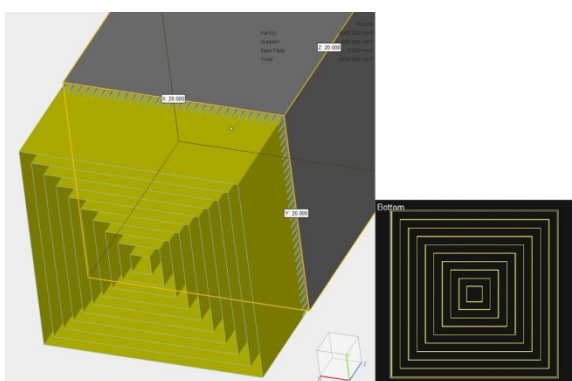
Software Magics nabízí širokou škálu různých typů PK. Na následujících obrázcích (2-16-26) lze vidět standardně používané (pro ilustraci použité na jednoduchých útvarech).



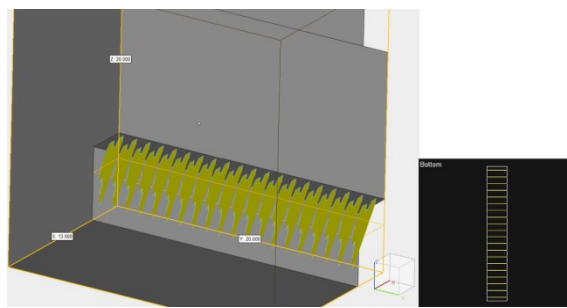
Obrázek 2-16 - Podpora typu Block



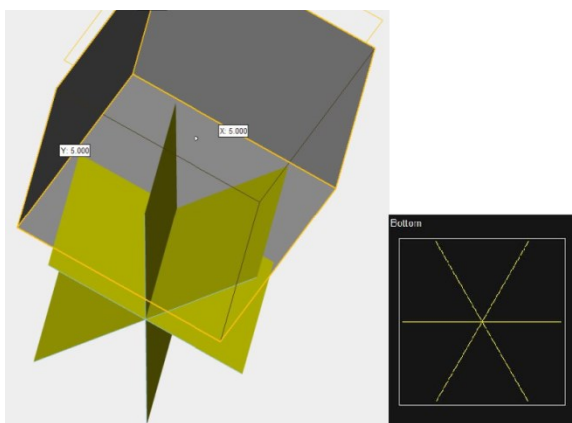
Obrázek 2-17 - Podpora typu Cones



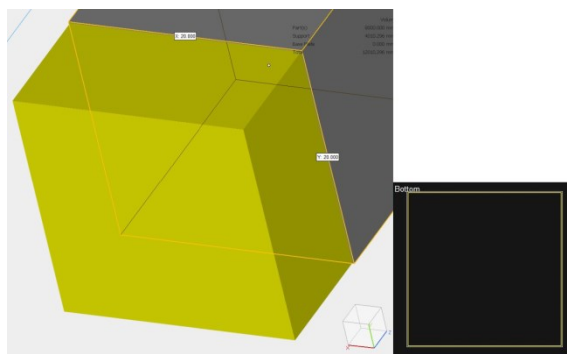
Obrázek 2-18 - Podpora typu Contour



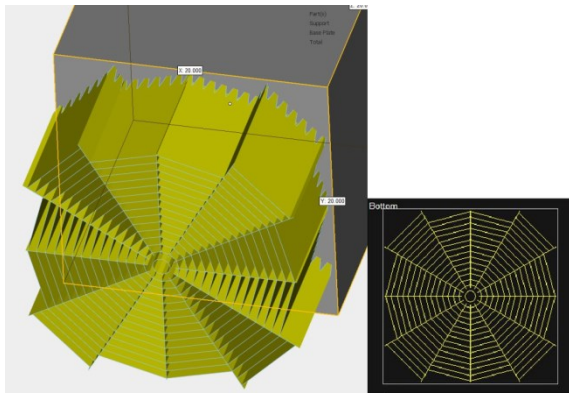
Obrázek 2-19 - Podpora typu Gusset



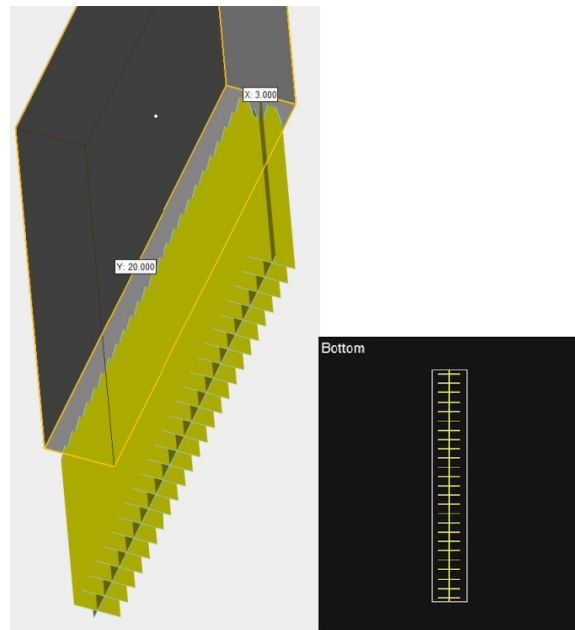
Obrázek 2-20- Podpora typu Point



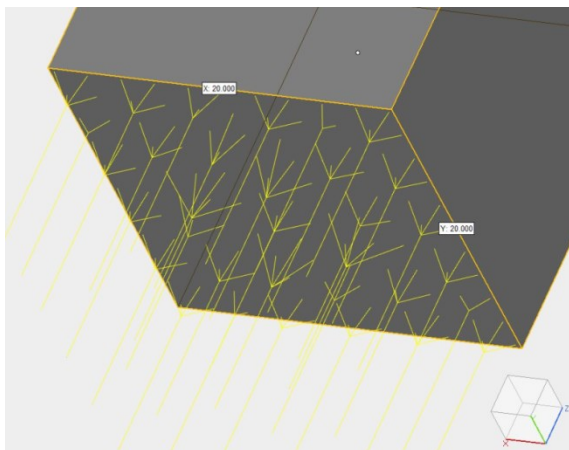
Obrázek 2-21- Podpora typu Volume



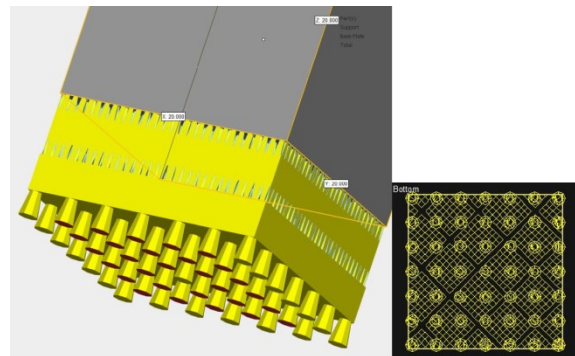
Obrázek 2-22 - Podpora typu Web



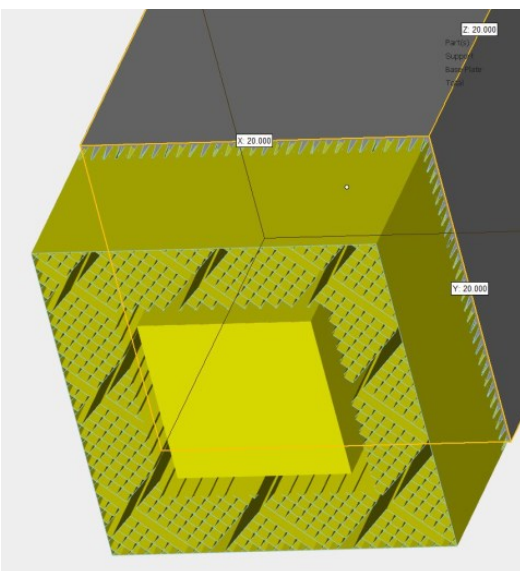
Obrázek 2-23 - Podpora typu Line



Obrázek 2-24 - Podpora typu Tree

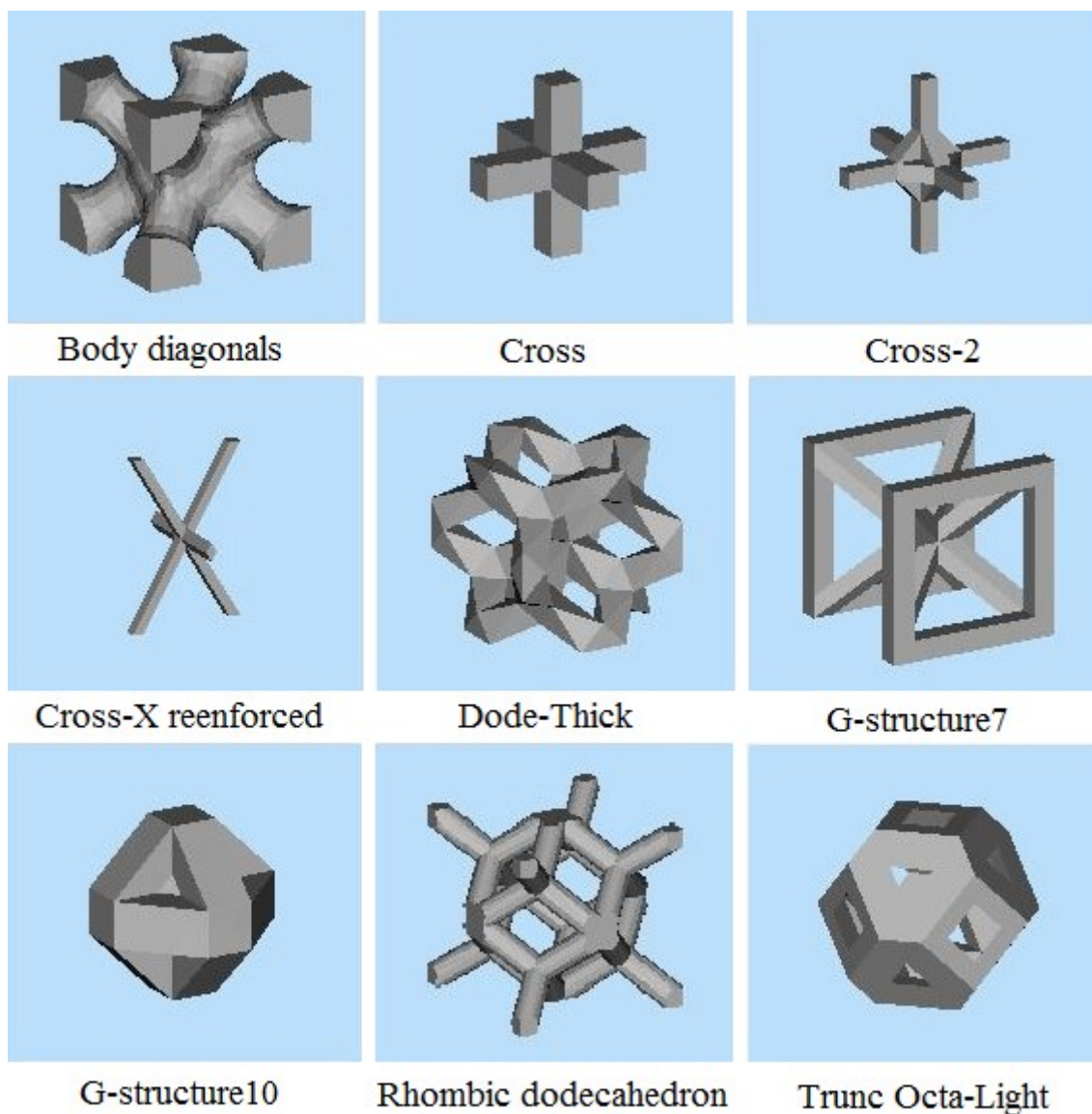


Obrázek 2-25 - Podpora typu Hybrid



Obrázek 2-26 - Kombinovaná podpora  
(Block + Volume)

Nejčastěji používanými typy struktur jsou block, cones a volume popř. jejich kombinace. Na následujícím obrázku (2-27) lze vidět výběr některých druhů speciálních struktur, jejichž hlavním účelem je náhrada objemu (odlehčení) součástí, nicméně ve speciálních případech lze použít i jako PK.[12]



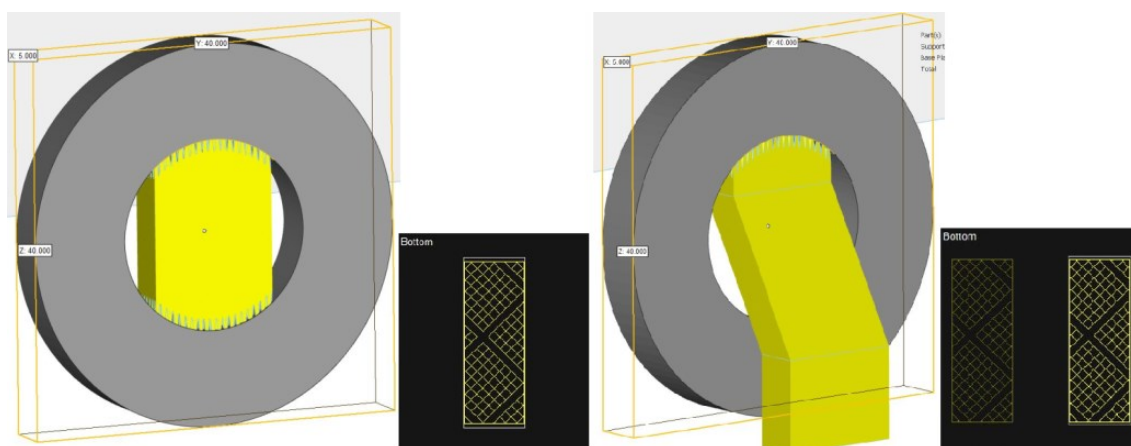
Obrázek 2-27 - Speciální typy objemových struktur

### 2.2.6 Specifická nastavení PK

Každý typ PK má v softwaru Magics mnoho svých specifických nastavení pro modifikaci. Nyní budou popsána ta nejdůležitější.

#### 2.2.6.1 Angled Supports

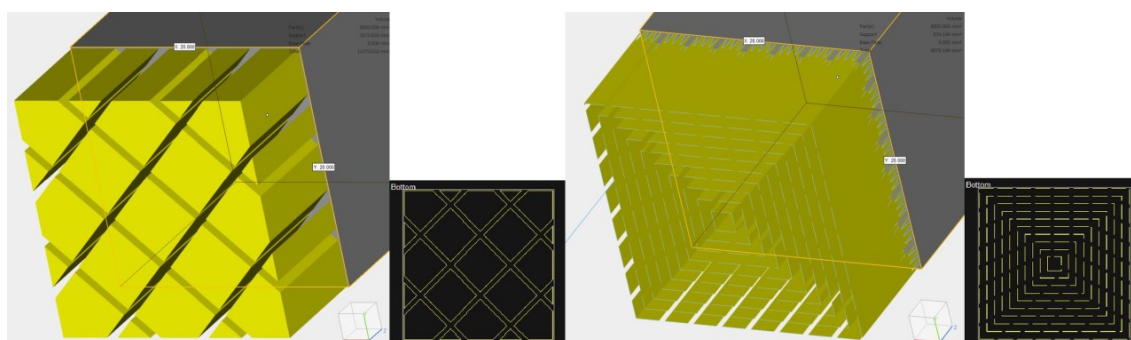
Úprava Angled Supports (vyklonění podpory) se s výhodou používá, je-li třeba podporovat plochu součásti a zároveň ušetřit protilehlou plochu kontaktu s PK. Nebo podporované místo z jakéhokoliv důvodu uchytit k platformě či jiné ploše. Příklad lze vidět na obrázku 2-28.



Obrázek 2-28 - Angled Support

### 2.2.6.2 Fragmentation

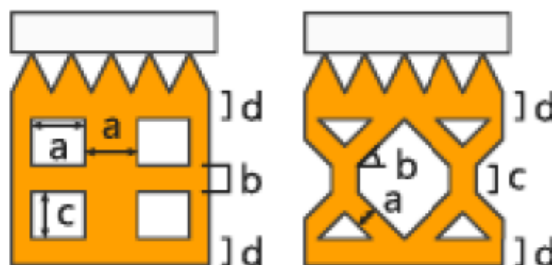
V nastavení Fragmentation (rozkouskování) lze vybranou PK rozdělit na několik menších částí (fragmentů). Cílem této úpravy je zkrácení času tisku, ušetření materiálu a snazší odstranění PK. Zároveň to ale snižuje únosnost celé struktury, je proto třeba volit tyto parametry obezřetně. Příklad fragmentovaných PK lze vidět na obrázku 2-29.



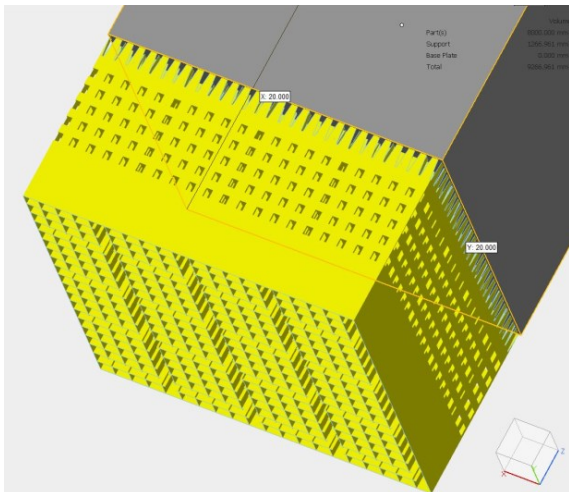
Obrázek 2-29 - Fragmentation - Volume (vlevo), Contour (vpravo)

### 2.2.6.3 Perforations

Ve volbě Perforations (děrování) lze do PK vygenerovat díry, za účelem dosažení obdobných cílů jako u fragmentace. Lze je umístit v jakémkoliv počtu, velikosti či rozmístění. Na výběr jsou díry obdélníkového a diamantového tvaru. Diamantové díry mají tu výhodu, že jsou samonosné ve všech velikostech, zatímco obdélníkové jen do určité minimální šířky (viz. 2.2.3). Na obrázku 2-30 lze vidět detail nastavení děrování a na obrázku 2-31 příklad perforované PK typu Block.



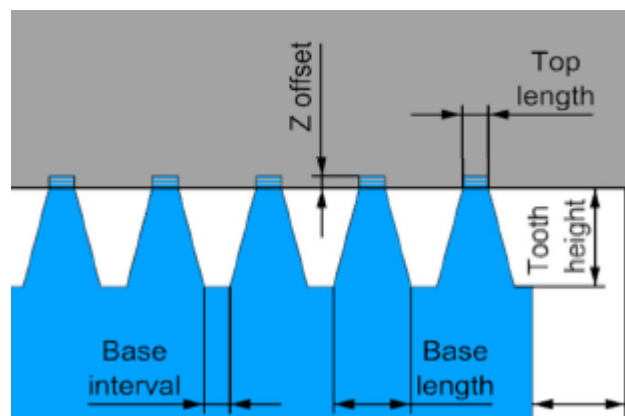
Obrázek 2-30 - Perforations - detail nastavení děr



Obrázek 2-31 - Perforations - děrovaná PK typu Block

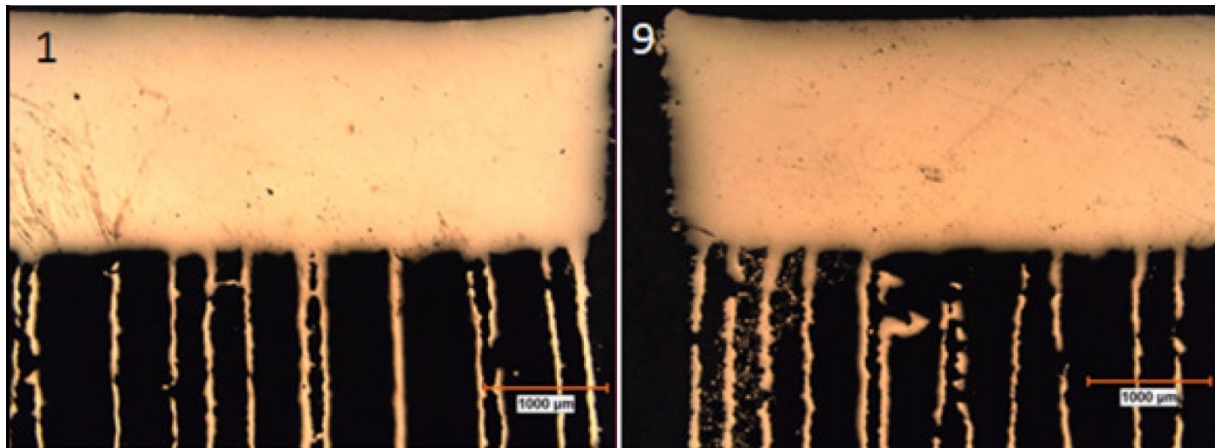
#### 2.2.6.4 Hatching Teeth

Úprava Hatching Teeth (nastavení zubů) přímo souvisí s nastavením Z Offset (kapitola 2.2.4). Lze zde detailně upravovat velikost všech rozměrů prorůstajících zubů do objemu součásti (viz. obrázek 2-32). Toto nastavení má velký vliv na kvalitu výsledného povrchu podporované plochy. Nesprávným navolením hodnot Z offsetu horní délky (Top lenght) zubu nebo hustoty (interval) zubů může dojít k nedostatečnému kontaktu PK se součásti. V důsledku toho se může PK i samovolně odtrhnout, jen vlivem působení teplotní roztažnosti při tisku. Na obrázku 2-33 lze vidět srovnání dvou různých parametrů nastavení zubů v řezu pro stejný typ a hustotu PK (Block). Vzorek vlevo má nastavení Top lenght=0,35 mm a Z offset=0,2 mm. Vzorek vpravo Top lenght=0,15 mm a Z offset=0,04. Na detailu je možné pozorovat vyšší tendence k odtrhávání u vzorku s menšími hodnotami prorůstání.



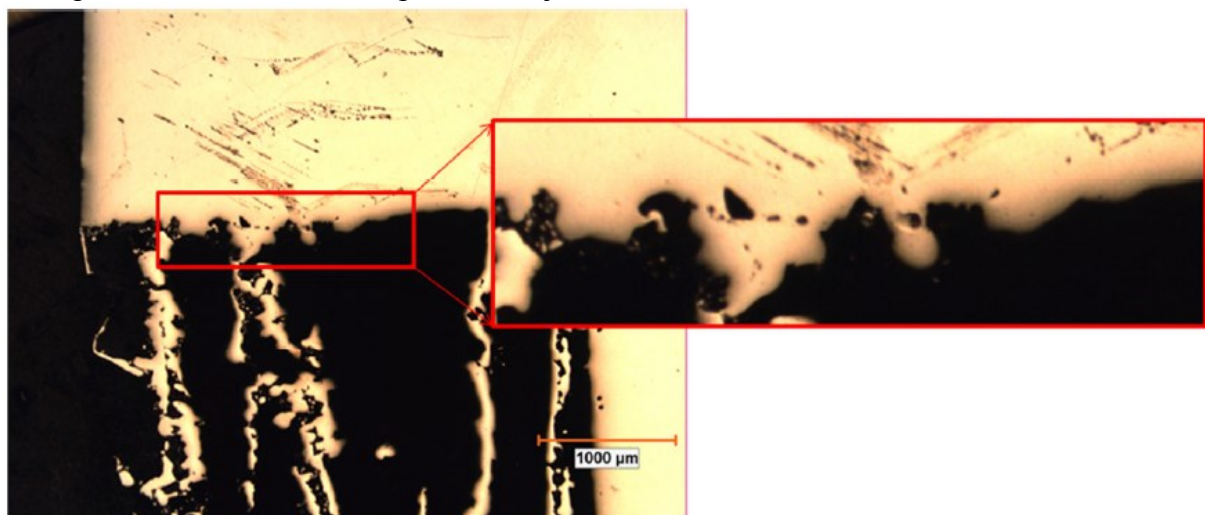
Obrázek 2-32 - Hatching Teeth [11]





Obrázek 2-33 - porovnání samovolného oddělení PK při různých parametrech Hatching Teeth - [11]

Samovolné oddělení PK může způsobit nepříznivou pórovitost materiálu pod povrchem součásti, což může vést např. k nadměrnému opotřebení či jiné deformaci při postprocesingu nebo provozu. Detail takovéto pórovitosti je vidět na obrázku 2-34.



Obrázek 2-34 - vznik pórovitosti povrchu v důsledku samovolného oddělení PK[11]

Z předchozích kapitol je patrné, že software Magics nabízí nepřehledné množství možností použití typů PK, jejich kombinací, přednastavených modifikací či manuálních úprav. Cílem praktické části této práce, začínající v následující kapitole, je z tohoto množství vytipovat nejlépe pevnostně vyhovující typy struktur, při zachování dalších užitečných vlastností.[11][12]

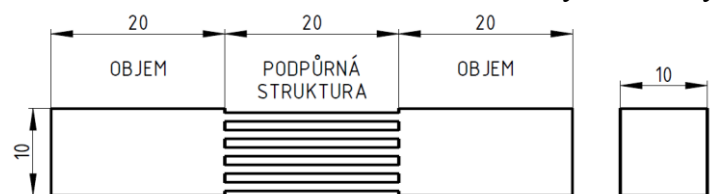
### 3 Návrh experimentu a jeho realizace

#### 3.1 Návrh na základě MKP analýzy

Tato kapitola je zaměřena na výběr nejvhodnější PK na základě pevnostního výpočtu, neboť vysoká pevnost, a tedy schopnost udržet tištěnou součást, je její nejzásadnější vlastností. Z velkého množství běžně užívaných PK (představených v kapitole 2.2.5) bylo vybráno několik zástupců, popř. navrženo několik dalších. Z nich byly vytvořeny 3D modely a podrobeny MKP analýze. Pro modelování vzorků byl použit software Creo Parametric 3.0. a pro pevnostní výpočty software ANSYS workbench 14.5.

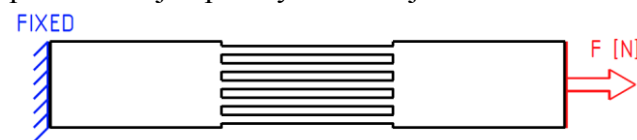
V předchozí kapitole byla vysvětlena funkce Z Offset a Hatching Teeth. Jak již bylo řečeno, tyto zuby mají být se součástí propojeny v co možná nejmenší ploše, aby bylo usnadněno odstranění PK po tisku. Tyto prvky byly v pevnostní analýze vynechány, protože v zúžených místech by zcela jistě vznikaly špičky napětí, které by výrazně zkracovaly únosnost celé PK a výsledky by byly nepřesné. Předmětem této práce je výzkum PK samotných, ne jejich připojení. U všech vzorků je tedy PK spojena s objemem celou svou plochou.

V tomto místě je třeba říci, že se jedná o návrh PK použitelných obecně pro všechny typy součástí, různých velikostí, ploch či tvarových prvků. Nelze proto předem určit, jakým druhem namáhání budou PK zatěžovány. Všechny vzorky v této práci byly tedy pro



Obrázek 3-1 - Schéma 3D modelu vzorků pro MKP analýzu

vidět na obrázku 3-1. Protože cílem je výzkum vlivu tvaru PK a vzorky jsou zatěžovány pouze osovou silou, musí mít stejnou plochu v průřezu (vychází z výpočtu pro napětí v tahu  $\sigma = \frac{F}{S}$ ). Tato plocha (S) byla pro daný vzorek určena na  $13,8816 \text{ mm}^2$ . PK by měla pokrývat maximální plochu podporovaného objemu, tak jak to její tvar umožňuje, při zachování pravidla stejné plochy PK. Vnější obvodová vrstva (obal) byla u všech vzorků vynechána.



Obrázek 3-2 - Schéma okrajových podmínek MKP analýzy

Okrajové podmínky jsou schematicky znázorněny na obrázku 3-2. Spodní plocha vzorku je uchycena podporou typu Fixed ( $0^\circ$  volnosti). Na horní plochu vzorku je umístěna zatěžující síla  $F = 5000 \text{ [N]}$ . Hodnota síly  $F$  v této části výzkumu není důležitá, protože nás zajímá pouze srovnání jednotlivých PK a ne konkrétní hodnoty napětí či deformace. Nicméně byla zvolena tak, aby vzorky pokud možno vyhovovaly dovolenému namáhání vypočteného dle vzorce  $\sigma_{Dov} = \frac{R_{p0,2}}{k_s} = \frac{1000}{1,5} = 666,6 \text{ MPa}$ . Kde  $R_{p0,2}$  je smluvní mez kluzu pro vybraný materiál - ocel W-Nr. 1.2709 (který bude v pozdější části této práce použit pro tisk reálných vzorků) a  $k_s$  je koeficient bezpečnosti. Složení materiálu 1.2709 (MS1) lze vidět v tabulce 3-1 a mechanické vlastnosti v tabulce 3-2. Vysítování vzorků v programu ANSYS musí být také provedeno podle totožných nastavení (velikost elementů, zhuštění v přechodných oblastech atd.).[14]

Tabulka 3-1 - Složení materiálu W-Nr 1.2709 v % [13]

Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	C	Mn	Si	P	S	Fe
17 - 19	8.5 - 9.5	4.5 - 5.2	0.6 - 0.8	0.05 - 0.15	≤ 0.5	≤ 0.03	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.01	≤ 0.01	zbytek

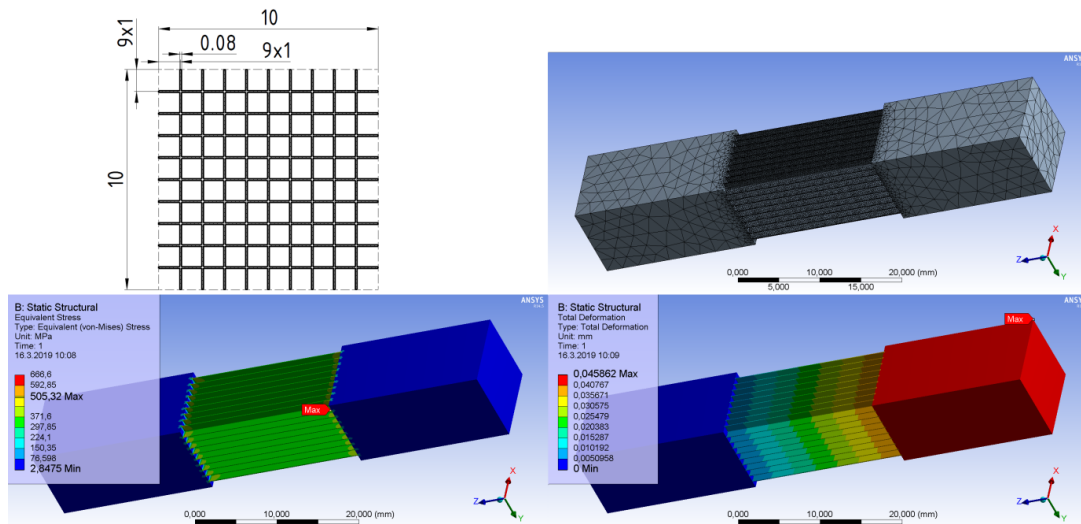
Tabulka 3-2 - Mechanické vlastnosti materiálu W-Nr 1.2709 [13]

	Ocel spěkaná (XY)	Ocel spěkaná (Z)	Ocel spěkaná po vytvrzení
Pevnost [Mpa]	1200 ± 100	1100 ± 100	2050 ± 100
Mez kluzu [Mpa]	1050 ± 100	870 ± 100	1990 ± 100
Tvrdost [HRC]	33 - 37	33 - 37	50 - 56
Prodloužení [%]	13 ± 4	12 ± 4	4 ± 2
Modul pružnosti [GPa]	160 ± 25	150 ± 30	180 ± 20
Tepelná vodivost [W/mK]	21	15 ± 0.8	20 ± 1

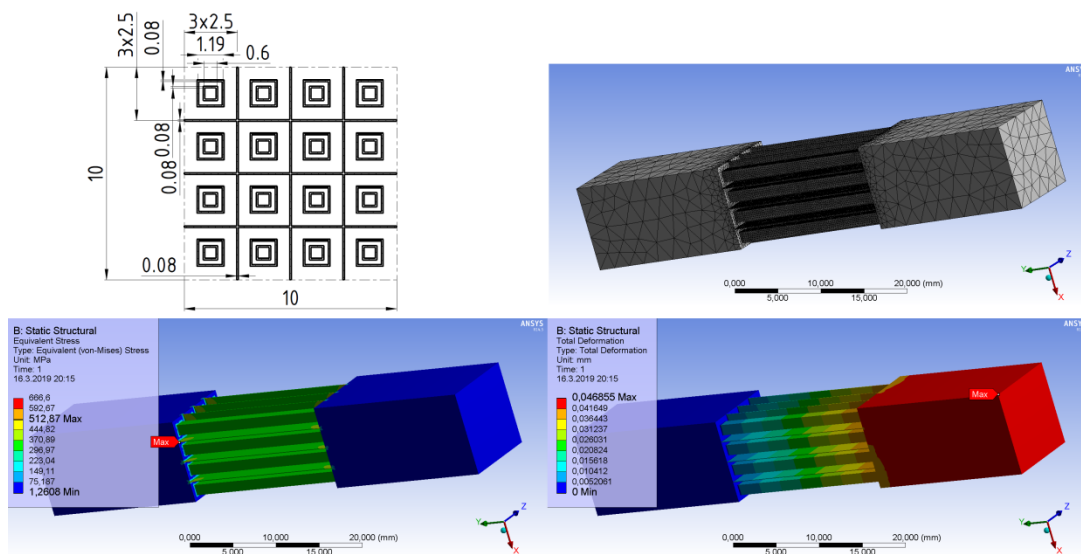
### 3.1.1 Fáze 1 – PK s konstantní stěnou

#### 3.1.1.1 Návrh a výpočet

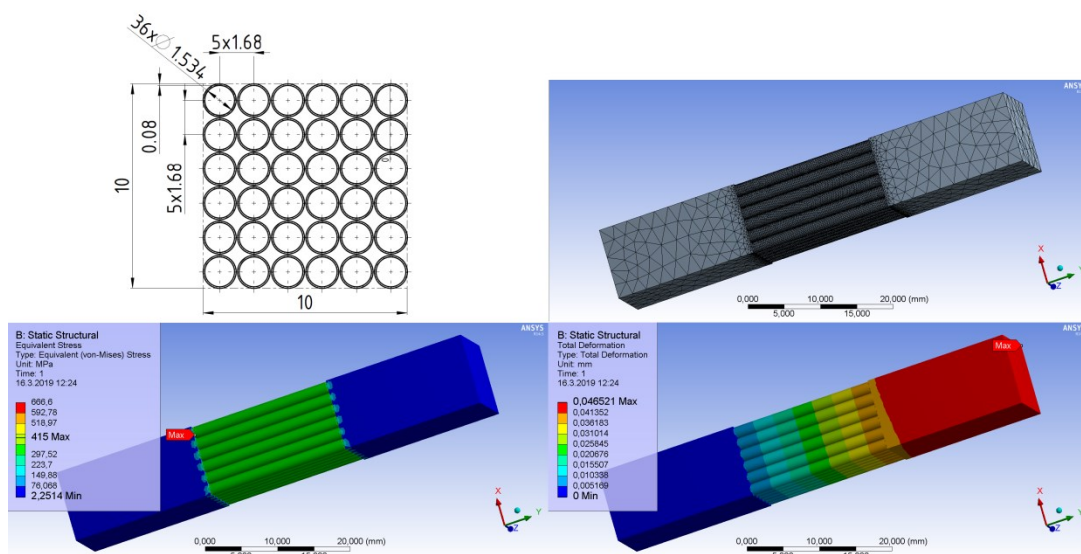
V první fázi MKP analýzy byly testovány pouze tvary PK s nepřerušovanými stěnami konstantní tloušťky 0.08 mm. Tato hodnota se rovná šířce jednoho přejezdu laseru. Na obrázcích 3-3-13 lze vidět výsledky navržených PK. Pro přehlednost jsou všechny obrázky situovány takto: vlevo nahoře skica průřezu zkoumané PK (PK je ve všech průřezích ve směru osy vzorku stejná), vpravo nahoře ukázka modelu vzorku s navrženým síťováním, vlevo dole průběh redukovaného napětí dle metody HMM v MPa s natočením na označené místo s maximálním napětím (pro porovnání je maximum barevné škály vždy nastaveno na hodnotu dovoleného namáhání 666,6 MPa) a vpravo dole celková deformace v mm.



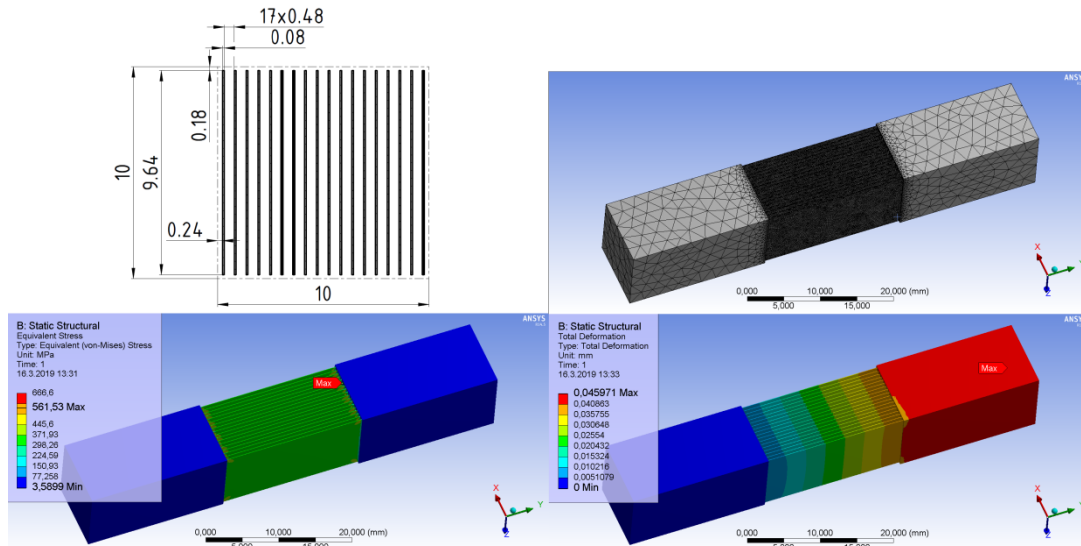
Obrázek 3-3 - MKP analýza - vzorek č. 1 - Block



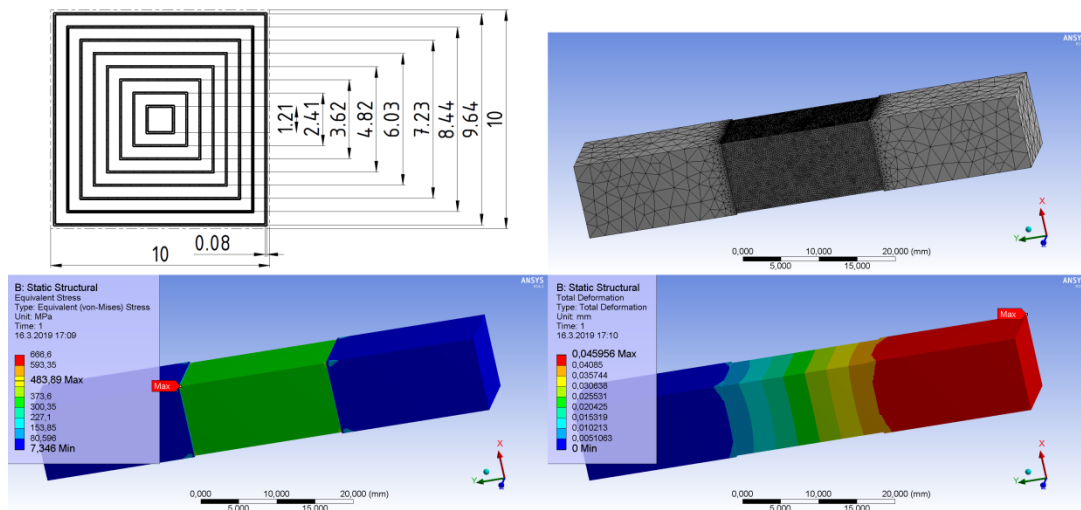
Obrázek 3-4 - MKP analýza - vzorek č. 2 - Block se čtverci



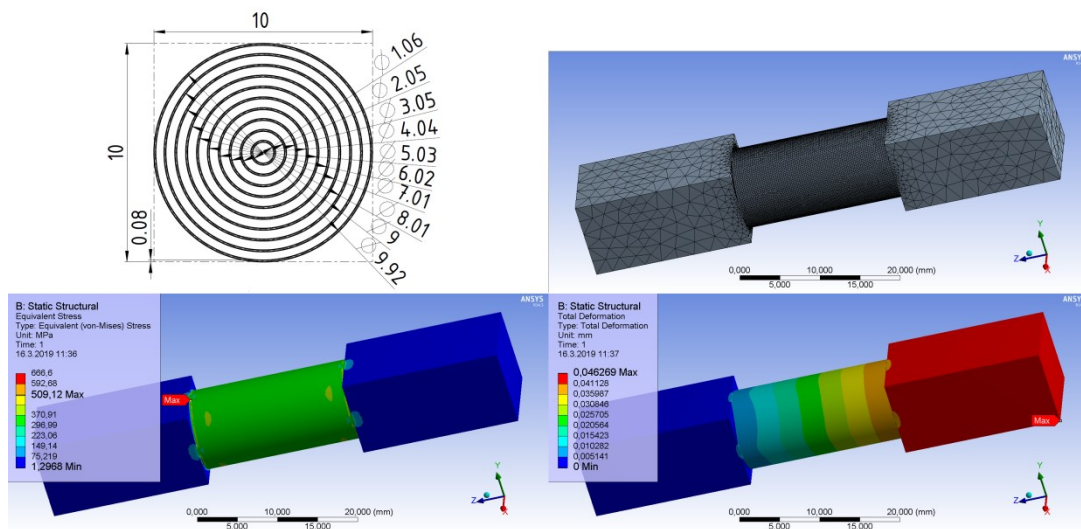
Obrázek 3-5 - MKP analýza - vzorek č. 3 - Kruhy



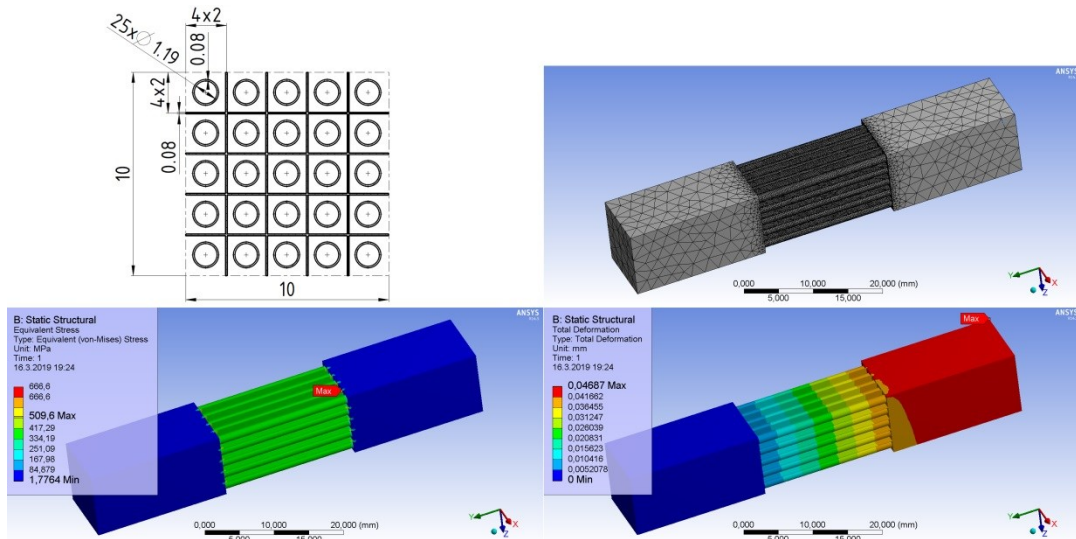
Obrázek 3-6 - MKP analýza - vzorek č. 4 - Čáry



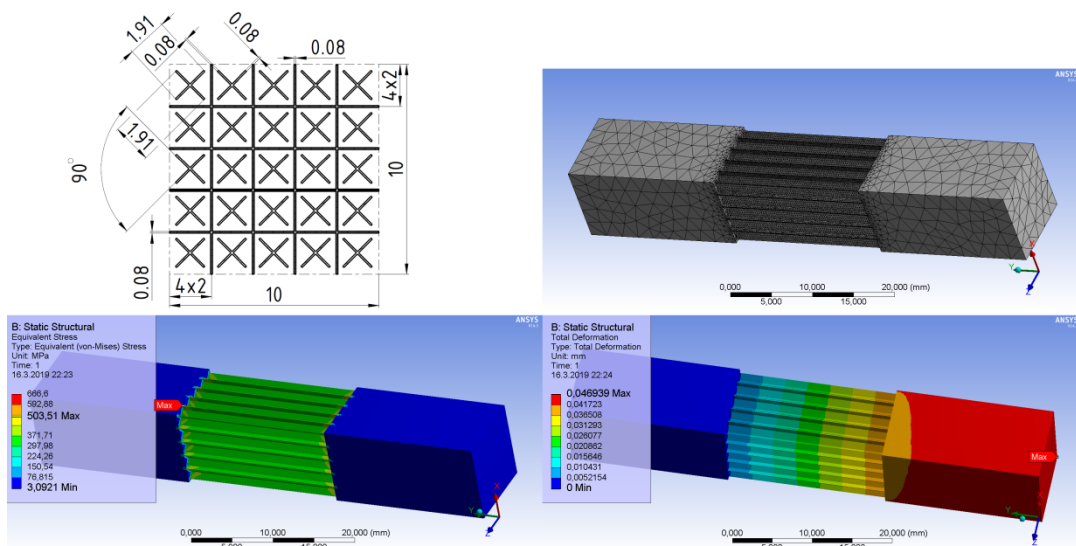
Obrázek 3-7 - MKP analýza - vzorek č. 5 - Kontura



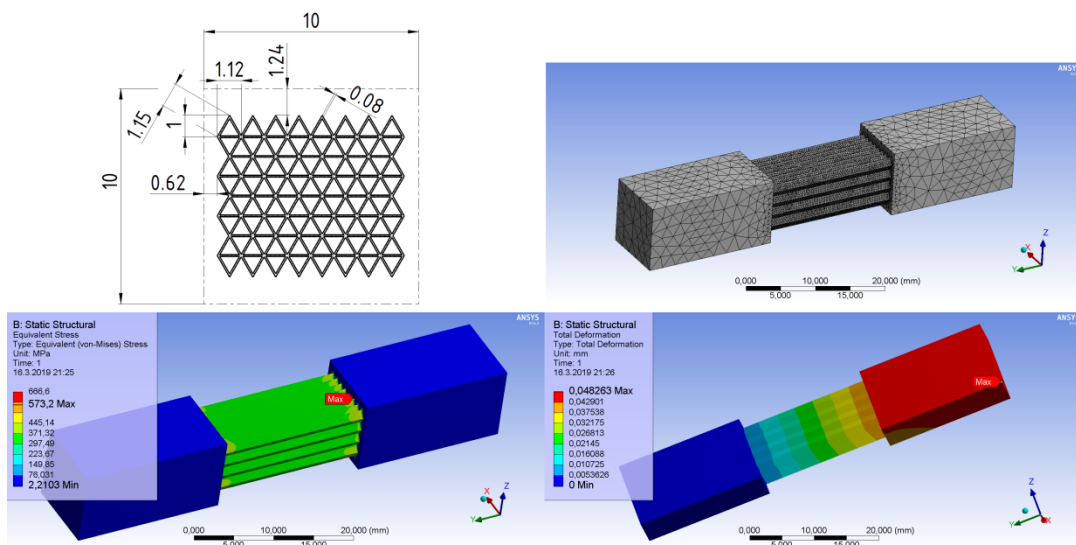
Obrázek 3-8 - MKP analýza - vzorek č. 6 - Kruhy centrické



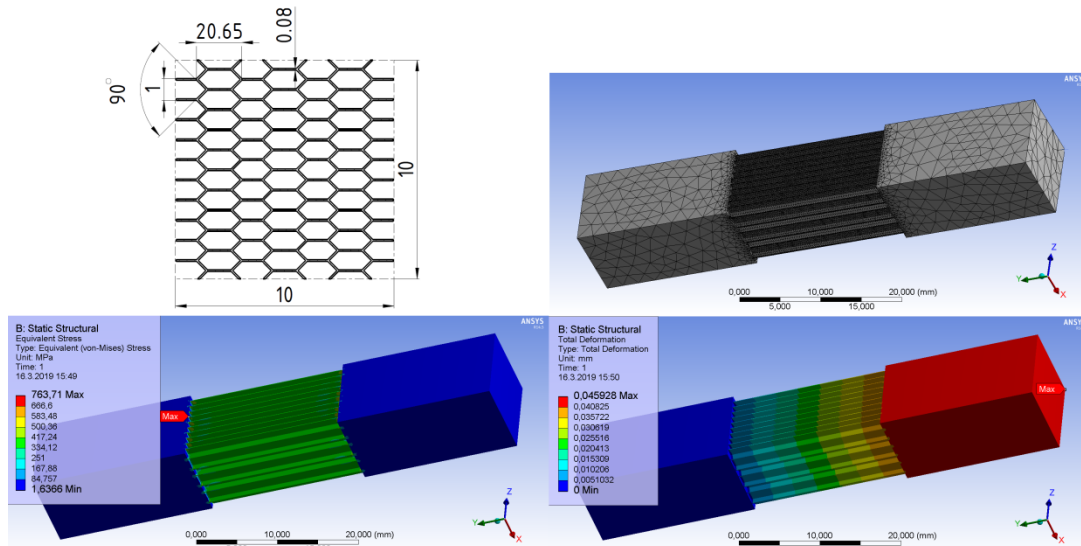
Obrázek 3-9 - MKP analýza - vzorek č. 7 - Block s kruhy



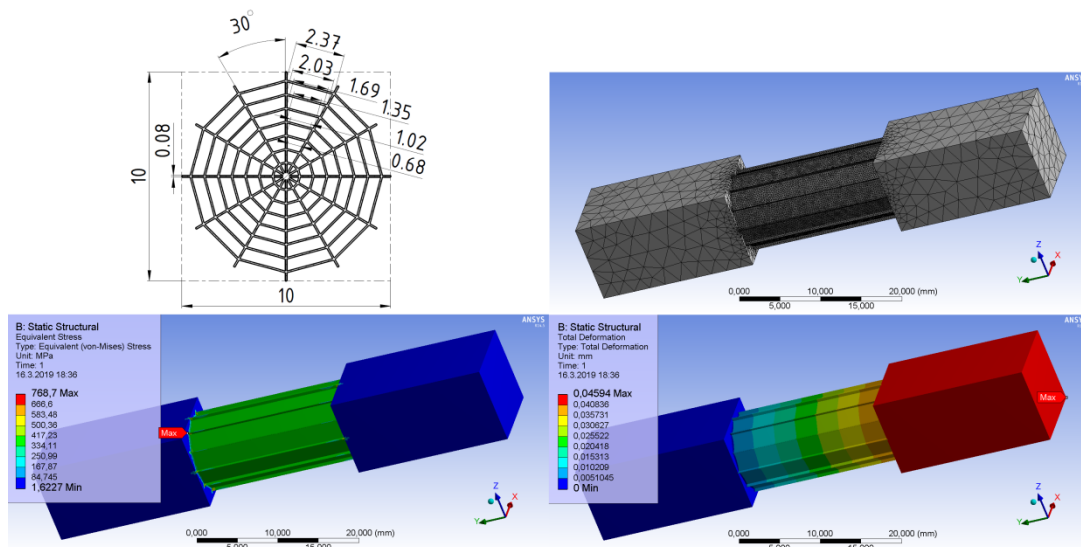
Obrázek 3-10 - MKP analýza - vzorek č. 8 - Block s kříži



Obrázek 3-11 - MKP analýza - vzorek č. 9 - Trojúhelníky



Obrázek 3-12 - MKP analýza - vzorek č. 10 - Voština



Obrázek 3-13 - MKP analýza - vzorek č. 11 - Web

### 3.1.1.2 Průběžné vyhodnocení

V tabulce 3-3 lze vidět shrnutí výsledných hodnot první fáze MKP analýzy.

Tabulka 3-3 - Shrnutí výsledků MKP analýzy - fáze 1

Číslo vzorku	Název	Redukované napětí [MPa]	Celková deformace [mm]	Celková Tuhost [Nm]	Rozdíl celkové tuhosti [%]
1	Block	505.32	0.0459	109.023	0.00
2	Block se čtverci	512.87	0.0469	106.712	-2.17
3	Kruhy	415	0.0465	107.478	-1.44
4	Čáry	561.53	0.0460	108.764	-0.24
5	Kontura	483.89	0.0460	108.800	-0.21
6	Kruhy Centrické	509.12	0.0463	108.064	-0.89
7	Block s kruhy	509.6	0.0469	106.678	-2.20
8	Block s kříži	503.51	0.0469	106.521	-2.35
9	Trojúhelníky	573.2	0.0483	103.599	-5.24
10	Voština	763.71	0.0459	108.866	-0.14
11	Web	768.7	0.0459	108.838	-0.17

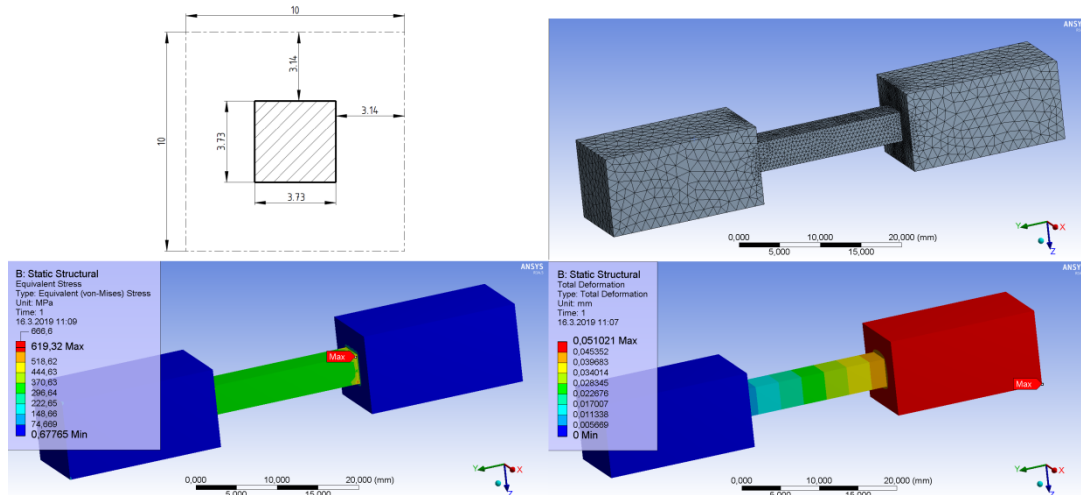
Většina vzorků pevnostně vyhověla stanovené podmínce dovoleného namáhání. Dle umístění špiček napětí ve výsledných obrázcích je patrné, že největšímu namáhání jsou vzorky vystavovány na vnějších okrajích průřezu. Z hlediska redukovaného napětí tedy nejlépe vyhověly vzorky č. 3 a 5, protože mají ze všech vzorků masu materiálu nejbližší okrajům, což nemusí být průkazné, budou-li se prvky PK periodicky opakovat na větších plochách, kde ostatní vzorky nebudou znevýhodněny absencí vnější stěny. Špičky napětí se tvoří hlavně v ostrých rozích geometrie, proto nejsou hodnoty maximálního napětí srovnatelné u všech navržených PK. Pro celkové srovnání je tedy lepší vyjít z hodnot celkového prodloužení respektive z celkové tuhosti vzorků, která se spočítá dle vzorce:  $k = \frac{F}{\Delta l}$ , kde  $k$  je tuhost a  $\Delta l$  rozdíl celkového a prodloužení a počáteční délky (v tomto případě osového namáhání se rozdíl prodloužení rovná celkové deformaci). Protože se v této pevnostní analýze pohybujeme pouze v oblasti elastické deformace (platnost Hookova zákona), jsou hodnoty celkové deformace (na takto krátkých vzorcích) dle očekávání velmi nízké. Přesto se z nich dají vyčíst určité rozdíly a z hlediska tuhosti zde nepatrně nejlépe vychází vzorek č. 1 tedy obyčejné blockové schéma. Tato PK má i dobré výsledky redukovaného napětí (i přesto, že obsahuje nejvíce ostrých rohů) a s výhodou pravidelně pokrývá celou podporovanou plochu. Blockové schéma tedy zatím vychází nejlépe. To by přímo odpovídalo zkušenostem z praxe, kde je tato PK využívána zdaleka nejvíce.

## 3.1.2 Fáze 2 – PK objemové a kombinované

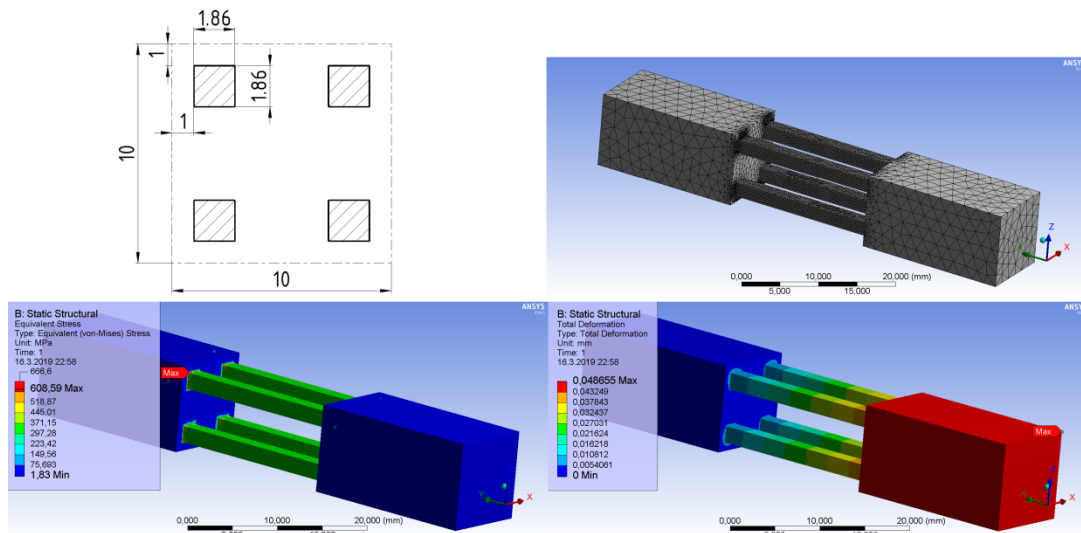
### 3.1.2.1 Návrh a výpočet

Ve druhé fázi MKP analýzy byly testovány vzorky, které již nemají pouze konstantní stěnu, ale také objemové celky nebo kombinace konstantní stěny a objemové části. Přesto však stále splňují podmínku zachování stejné plochy průřezu PK, jako v předchozím případě. Dispozice obrázků je zachována stejně jako v předchozí kapitole.

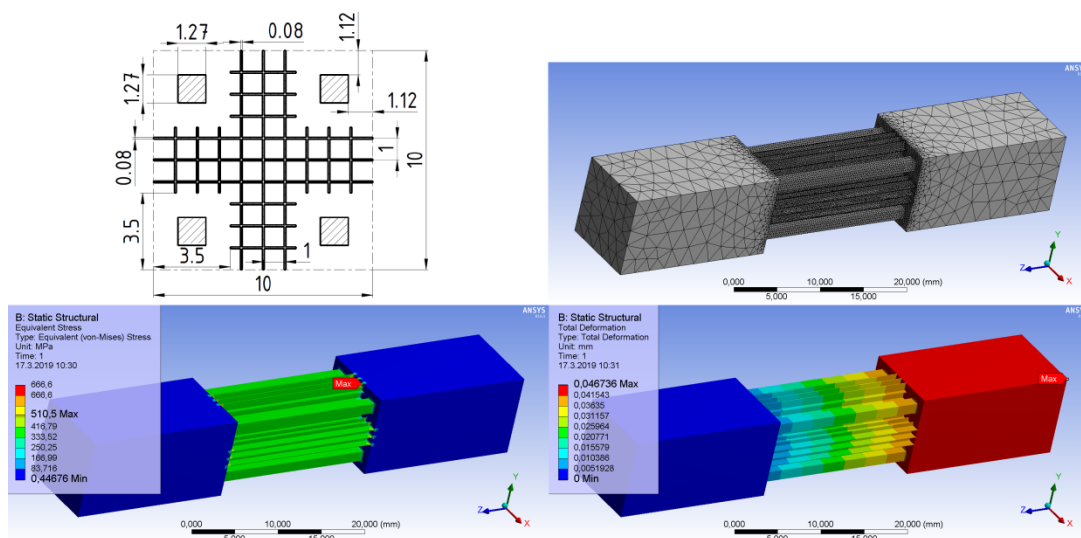




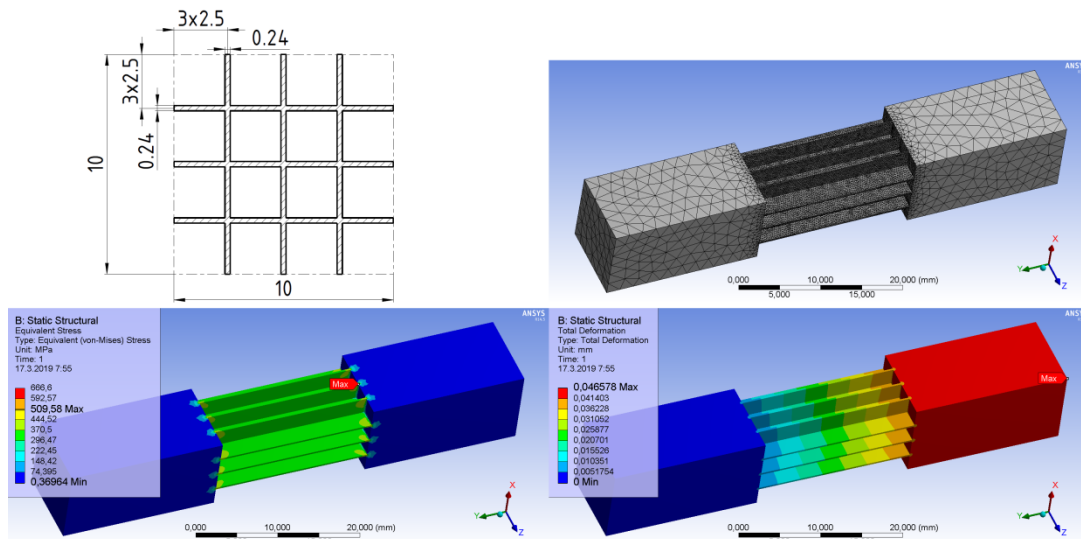
Obrázek 3-14 – MKP analýza – vzorek č. 12 - Objem čtverec



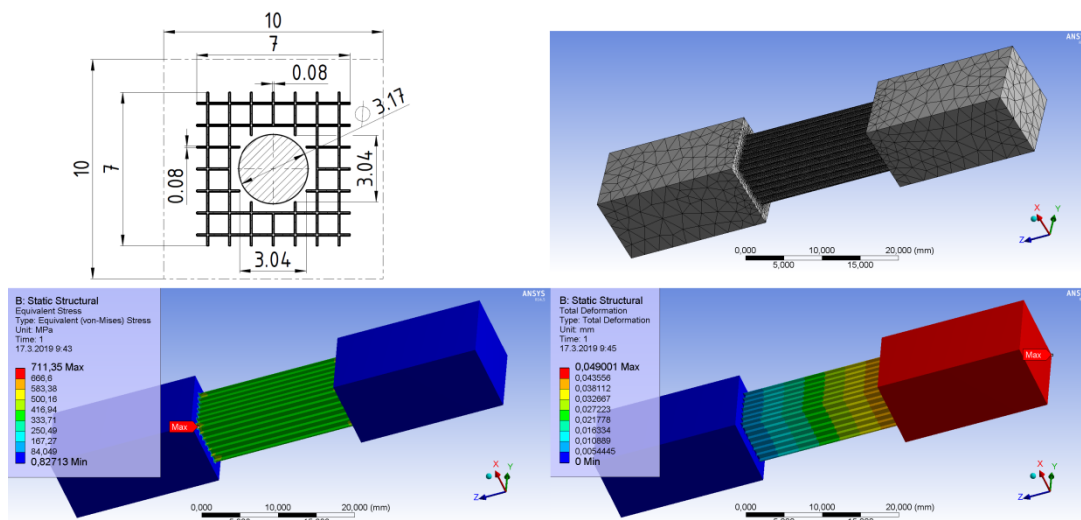
Obrázek 3-15 - MKP analýza - vzorek č. 13 - Objem 4 čtverce



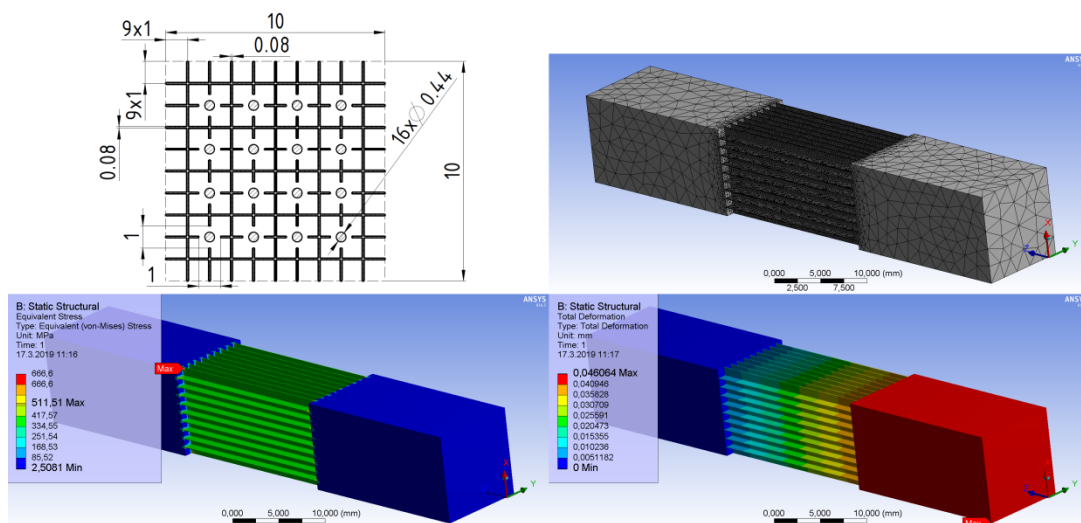
Obrázek 3-16 - MKP analýza - vzorek č. 14 - Objem 4 čtverce + Block



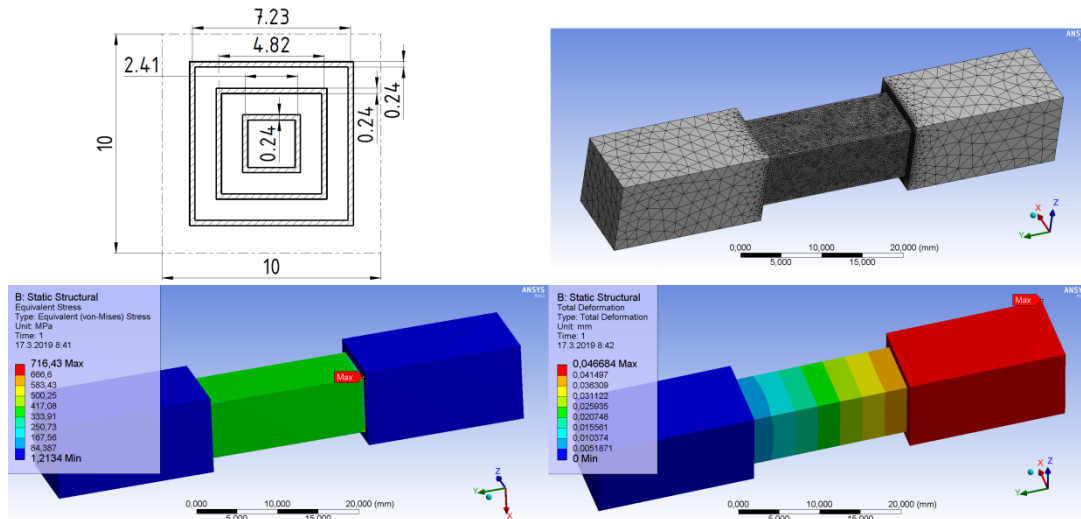
Obrázek 3-17 - MKP analýza - vzorek č. 15 - Block 3x tloušťka



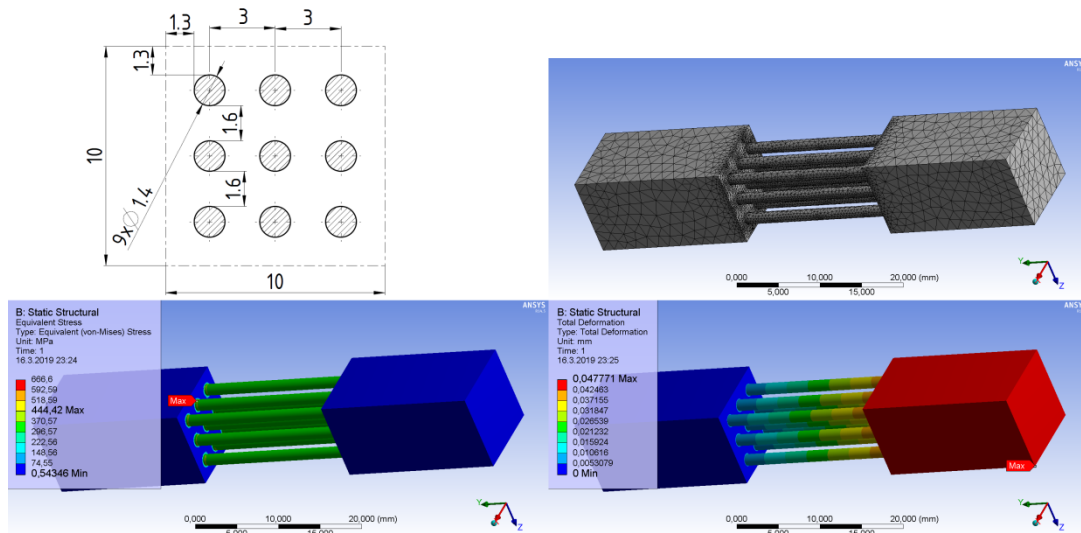
Obrázek 3-18 - MKP analýza - vzorek č. 16 - Cone + Block



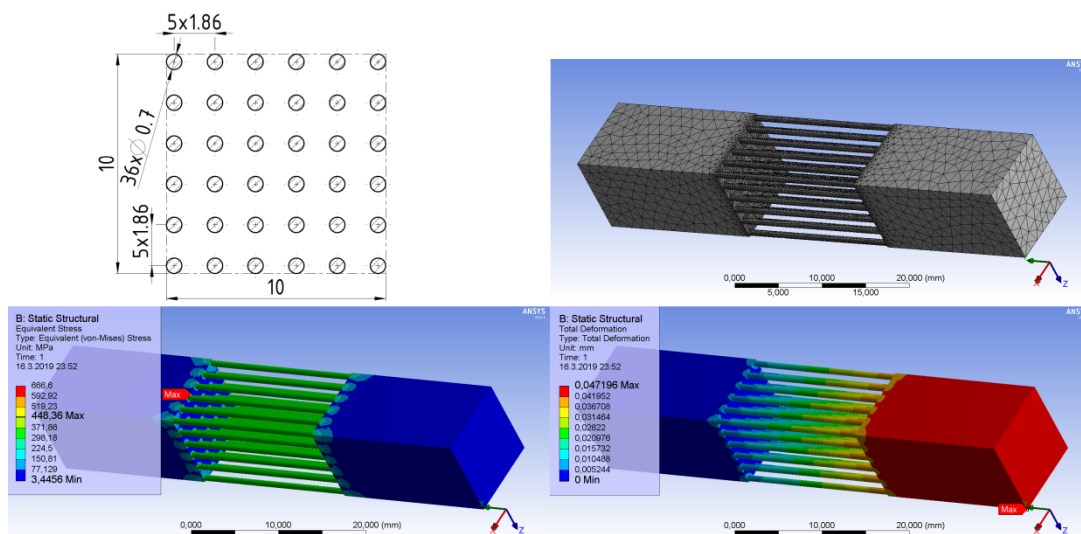
Obrázek 3-19 - MKP analýza - vzorek č. 17 - Cone 16x + Block



Obrázek 3-20 - MKP analýza - vzorek č. 18 - Kontura 3x tloušťka



Obrázek 3-21 - MKP analýza - vzorek č. 19 - Cone 9



Obrázek 3-22 - MKP analýza - vzorek č. 20 - Cone 36

### 3.1.2.2 Průběžné vyhodnocení

V tabulce 3-4 lze vidět shrnutí výsledných hodnot druhé fáze MKP analýzy.

Tabulka 3-4 - Shrnutí výsledků MKP analýzy - fáze 2

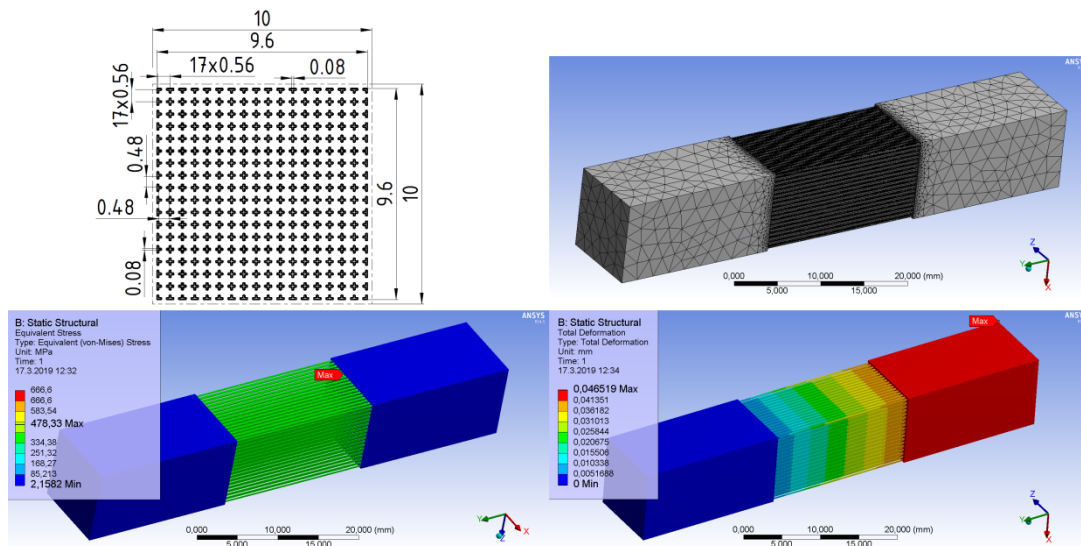
Číslo vzorku	Název	Redukované napětí [MPa]	Celková deformace [mm]	Celková Tuhost [Nm]	Rozdíl celkové tuhosti [%]
1	Block	505.32	0.0459	109.023	0.00
12	Objem čtverec	619.32	0.0510	97.999	-11.25
13	Objem 4 čtverce	608.59	0.0487	102.764	-6.09
14	Objem 4 čtverce Block	510.5	0.0467	106.984	-1.91
15	Block 3x tloušťka	509.58	0.0466	107.347	-1.56
16	Cone + Block	711.35	0.0490	102.039	-6.84
17	Cone 16x + Block	511.51	0.0461	108.545	-0.44
18	Kontura 3x tloušťka	716.43	0.0467	107.103	-1.79
19	Cone 9	444.42	0.0478	104.666	-4.16
20	Cone 36	448.36	0.0472	105.941	-2.91

Do tabulky byla pro srovnání přidána i nejlepší varianta z první fáze analýzy. Z výsledných hodnot lze vidět, že většina navržených objemových a kombinovaných PK nevykazuje lepší výsledky, než vzorky z předchozí fáze. Nejlépe zde vychází vzorek č. 17 jak celkovou tuhostí, tak maximálním napětím. Oproti blockovému schématu zde ovšem není zachována výhoda tloušťky stěny jednoho přejezdu laserem a objemové PK se také daleko hůře odstraňují.

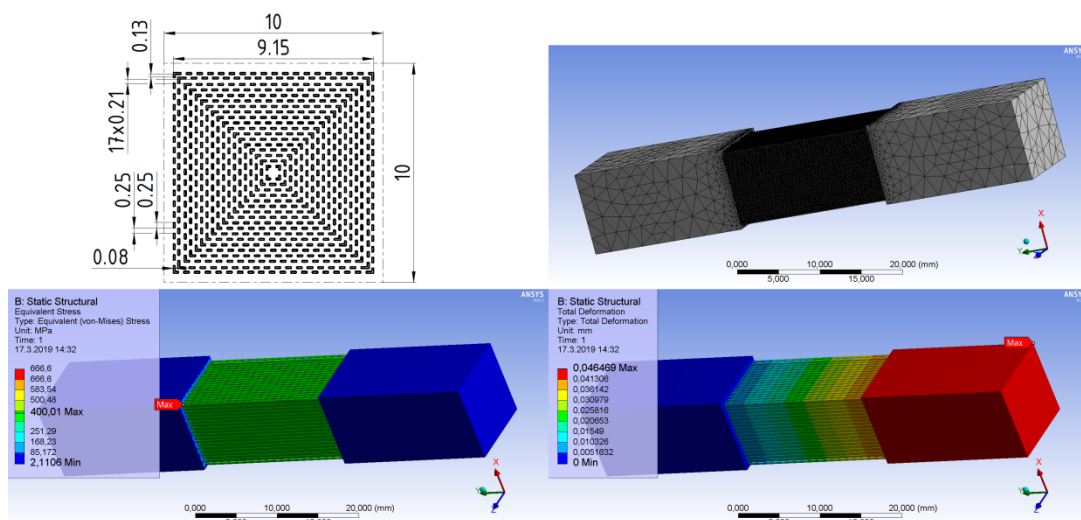
### 3.1.3 Fáze 3 – PK fragmentované

#### 3.1.3.1 Návrh a výpočet

Ve třetí fázi MKP analýzy byly testovány vzorky, které opět splňují tloušťku stěny 0,08 mm a plochu průřezu 13,8816 mm<sup>2</sup>. Nemají však jednotnou stěnu, nýbrž jsou pravidelně fragmentované (rozkouskované) za účelem ušetření prášku uvnitř struktury. Vybrány byly pouze 2 typy nejčastěji používaných struktur vhodné pro tuto modifikaci. Obrázky jsou opět situovány stejně, jako v předchozích kapitolách.



Obrázek 3-23 - MKP analýza - vzorek č. 21 – Block fragmentovaný



Obrázek 3-24 - MKP analýza - vzorek č. 22 - Kontura fragmentovaná

### 3.1.3.2 Průběžné vyhodnocení

V tabulce 3-5 lze vidět shrnutí výsledných hodnot třetí fáze MKP analýzy.

Tabulka 3-5 - Shrnutí výsledků MKP analýzy - fáze 3

Číslo vzorku	Název	Redukované napětí [MPa]	Celková deformace [mm]	Celková tuhost [Nm]	Rozdíl celkové tuhosti [%]
1	Block	505.32	0.0459	109.023	0.00
21	Block fragmentovaný	478.33	0.0465	107.483	-1.43
22	Kontura fragmentovaná	400.01	0.0465	107.599	-1.32

Do tabulky byl opět pro srovnání přidán vzorek č. 1. Obě fragmentované PK vykazují velmi dobré pevnostní výsledky. Což je dáno především tím, že pro zachování podmínky stejné plochy a zároveň pravidelného fragmentování musí mít stěny poloviční rozteč, a tedy na první pohled nejlépe pokrývají celou podporovanou plochu. Celková tuhost je opět nepatrně menší,

než u obvyčejného blockového schématu. Pokud na chvíli opustíme úvahy pouze osového napětí, je tuhost blockové PK také nejlépe vyvážená i v radiálních směrech, protože je celá propojena.

Na základě hodnocení všech tří fází MKP analýzy lze konstatovat, že se nepodařilo najít vhodnější typ PK, než je obvyčejné blockové schéma. Tato geometrie nejlépe pokrývá podporovanou plochu, všechny její stěny lze tisknout pouze jedním přejezdem laseru, díky mezerám mezi stěnami se snadno odstraňuje, je stabilní i v radiálních směrech, vykazuje dobré výsledky maximálního napětí a nejlepší celkovou deformaci a tedy i tuhost.

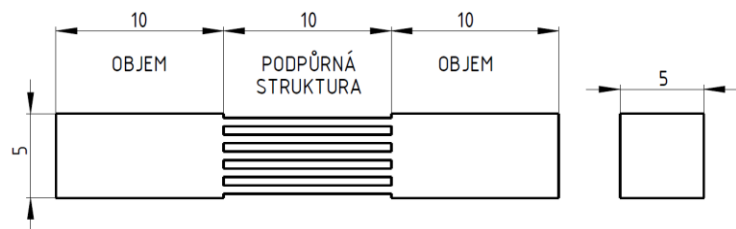
To ovšem neznamená, že už ji nelze dále modifikovat a vylepšit. Čtvrtá fáze MKP analýzy je zaměřena na detailnější výzkum perforované (děrované) blockové PK. Jak již bylo řečeno perforace, stejně jako fragmentace, ušetří prášek uvnitř struktury, ale PK díky zachování propojení stěn nadále zůstává tuhá a stabilní ve všech směrech.

### 3.1.4 Fáze 4 – Perforovaný Block

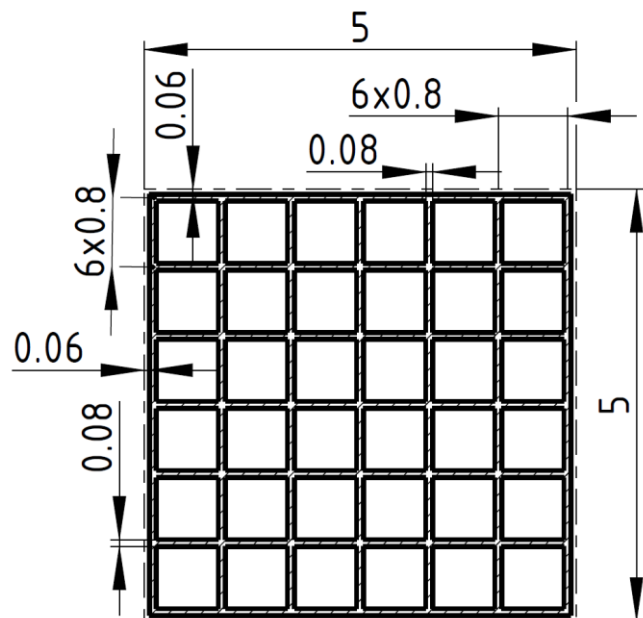
#### 3.1.4.1 Návrh

Pro výzkum vlivu perforace byl vytvořen menší vzorek, jehož schéma lze vidět na obrázku 3-25 a průřez neděrované vrstvy na obrázku 3-26. Menší vzorek byl zvolen z toho důvodu, že pro přesný výpočet radiálních děr je nutné v jejich okolí zvýšit počet prvků síťování v příčném směru stěny, což bylo pro předchozí vzorek nereálné. Detail této sítě je vidět na obrázku 3-27. Okrajové podmínky byly uspořádány stejně jako v předchozích kapitolách, ale síla  $F$  byla zmenšena na hodnotu 1250 N.

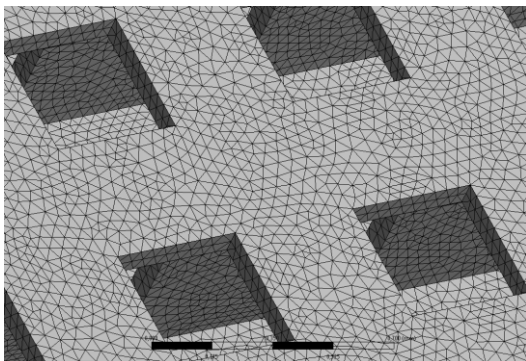
Jak bylo řečeno v kapitole 2.2.6.3. software Magics nabízí 2 geometrie děr: obdélníkové a diamantové. V následující analýze bylo zkoumáno, jaký vliv mají velikosti, tvar, vzdálenosti a počet obou těchto typů děr na pevnost zvolené PK.



Obrázek 3-25 - Schéma 3D modelu vzorků pro fázi 4 MKP

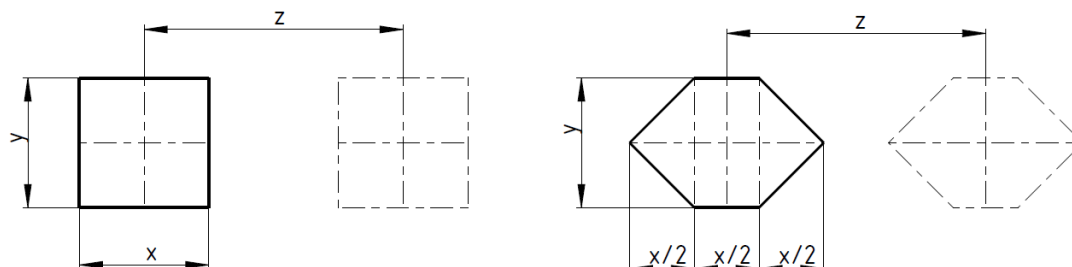


Obrázek 3-26 - Průřez neděrovanou vrstvou PK



Obrázek 3-27 - Detail zjemněné sítě

Na obrázku 3-28 jsou zakótovány rozměry děrování (x, z ve směru osy vzorku), které se v následujících experimentech budou měnit. V tabulce 3-6 lze vidět hodnoty pro jednotlivé výpočty. Plocha obou typů děr i jejich počet zůstává pro porovnání ve všech případech experimentu stejná. Vzdálenost děr v příčném směru se ve všech srovnávaných modelech rovná vzdálenosti řad blockové PK – tedy 0.8 mm a jejich pozice je vždy na středu řady. Stejně děrování platí pro všechny stěny PK.

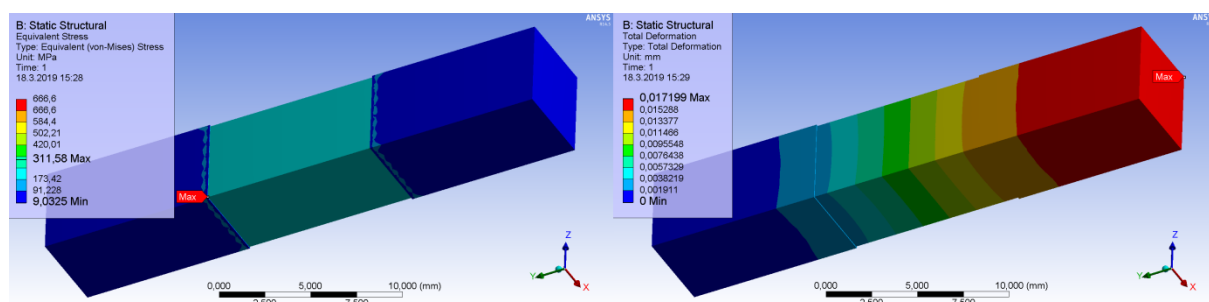


Obrázek 3-28 - Proměnné pro MKP analýzu děrování

Tabulka 3-6 - Plán experimentu MKP analýzy děrování PK

Číslo experimentu	x [mm]	y [mm]	z [mm]	Počet děr v řadě	Počet děr v každé stěně PK	Počet děr celkově	Plocha děr [mm <sup>2</sup> ]
1	0.4	0.4	0.8	12	72	1008	161.28
2	0.4	0.4	1.6	6	36	504	80.64
3	0.4	0.2	0.8	12	72	1008	80.64
4	0.4	0.2	1.6	6	36	504	40.32
5	0.2	0.4	0.8	12	72	1008	80.64
6	0.2	0.4	1.6	6	36	504	40.32
7	0.2	0.2	0.8	12	72	1008	40.32
8	0.2	0.2	1.6	6	36	504	20.16

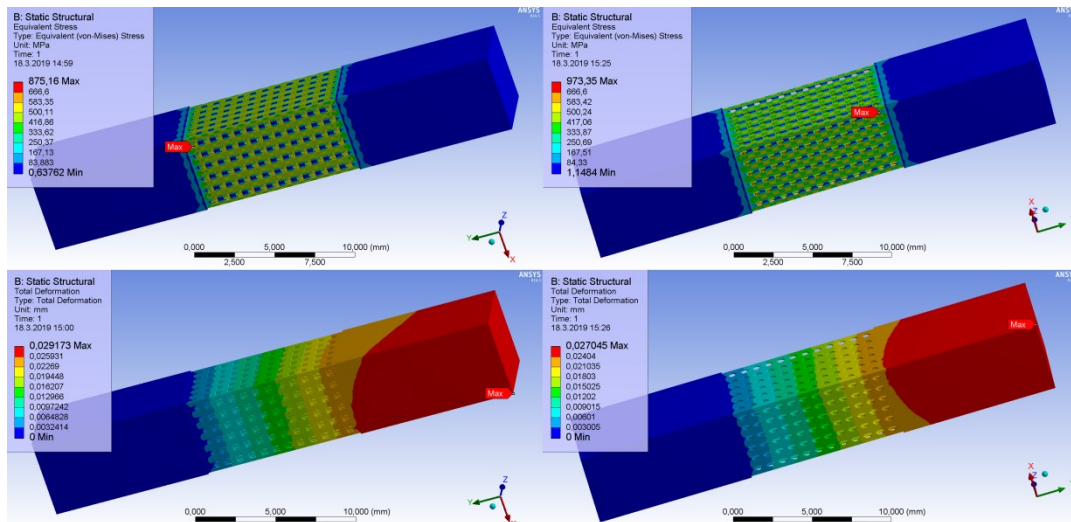
Pro porovnání byl nejprve spočten vzorek bez perforace (viz. Obrázek 3-29) – vlevo průběh redukovaného napětí dle metody HMM v MPa a vpravo celková deformace v mm.



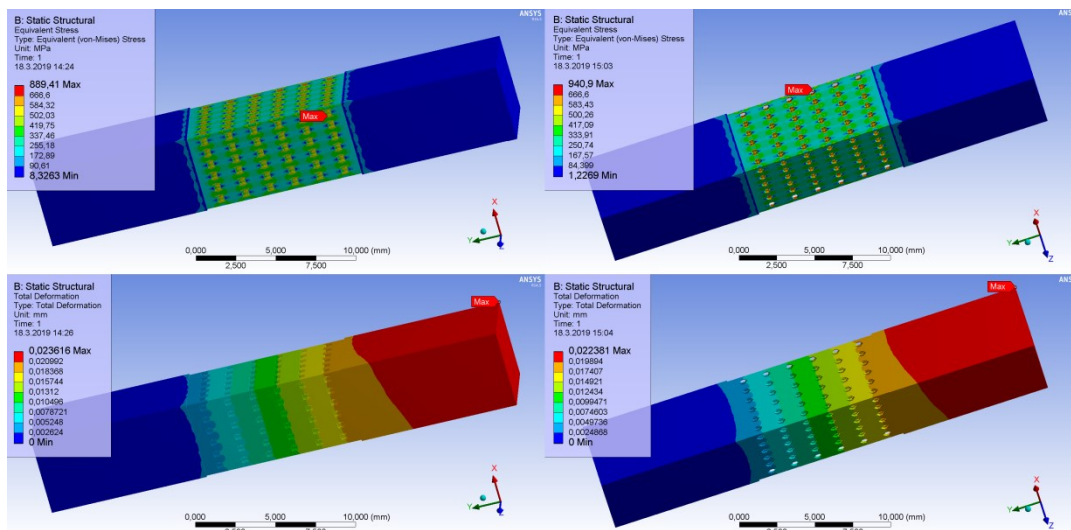
Obrázek 3-29 - MKP analýza - menší PK typu Block bez děrování – experiment č.0

### 3.1.4.2 Výpočet

Pro přehlednost a snazší porovnání výsledků jsou následující obrázky pro každý experiment situovány takto: vlevo nahoře průběh redukovaného napětí dle metody HMH v MPa obdélníkové díry (opět s natočením na označené místo s maximálním napětím a pro porovnání je maximum barevné škály stále nastaveno na hodnotu dovoleného namáhání 666,6 MPa), vpravo nahoře průběh redukovaného napětí dle metody HMH v MPa diamantové díry, vlevo dole celková deformace obdélníkové díry v mm a vpravo dole celková deformace diamantové díry v mm.

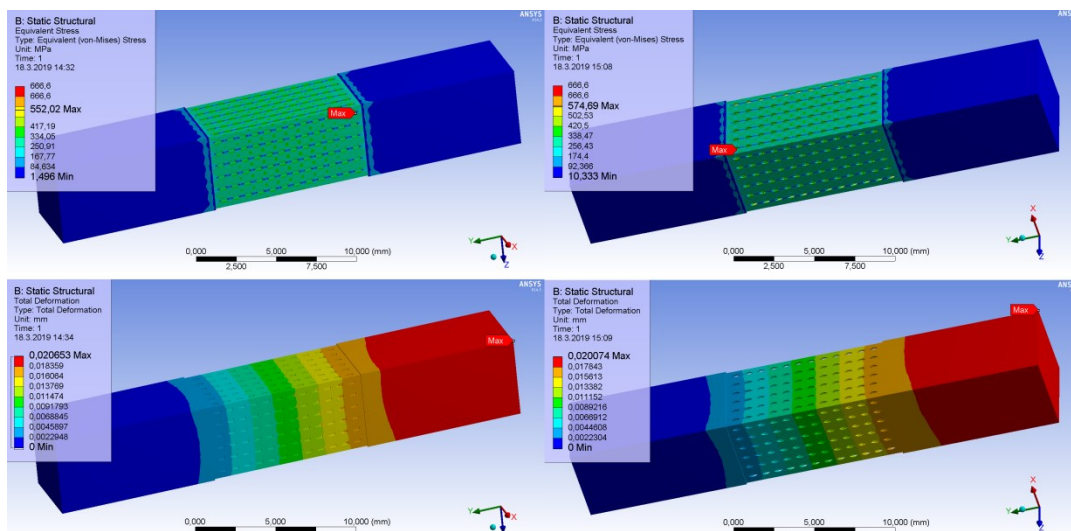


Obrázek 3-30 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 1

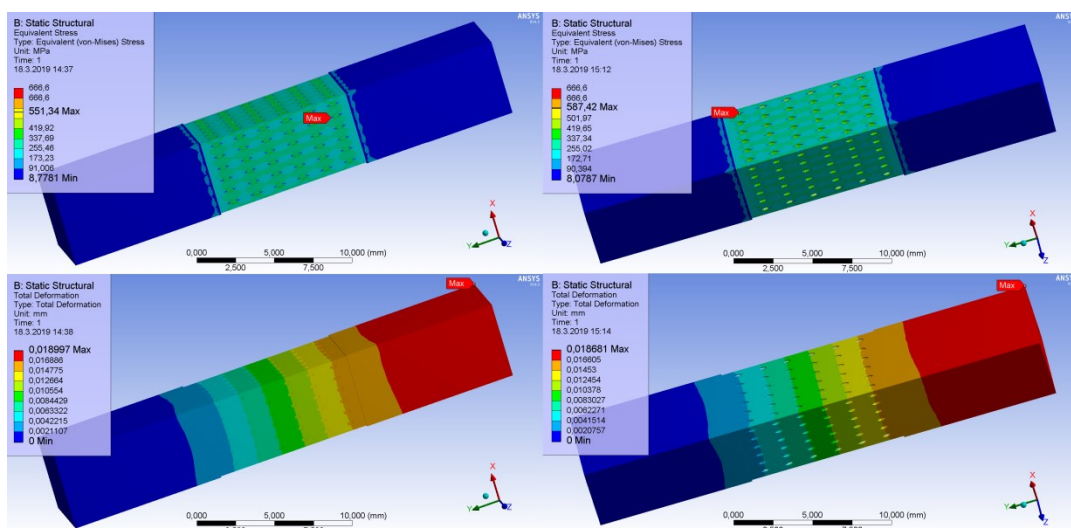


Obrázek 3-31 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 2

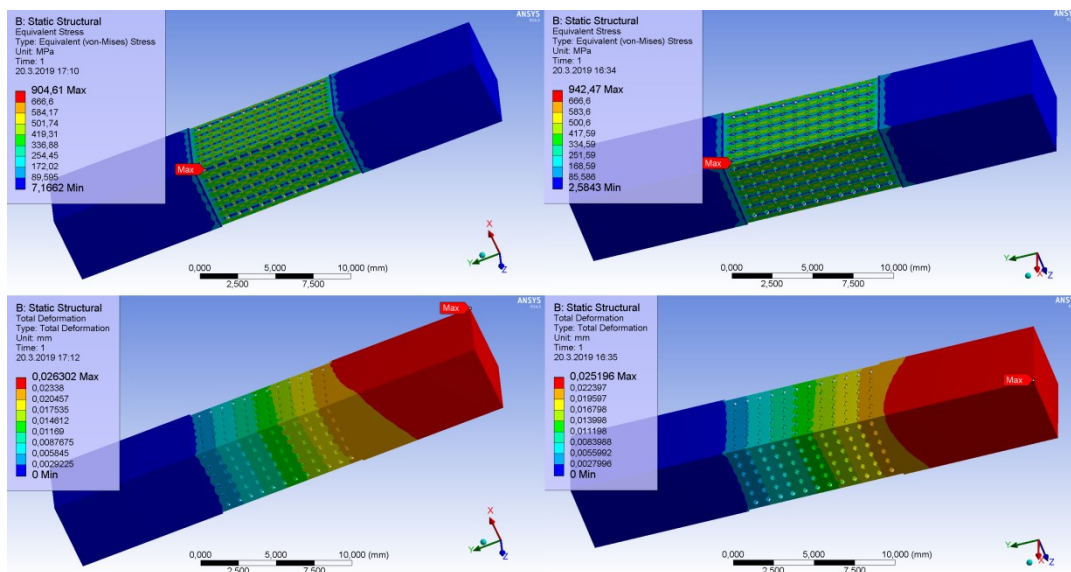




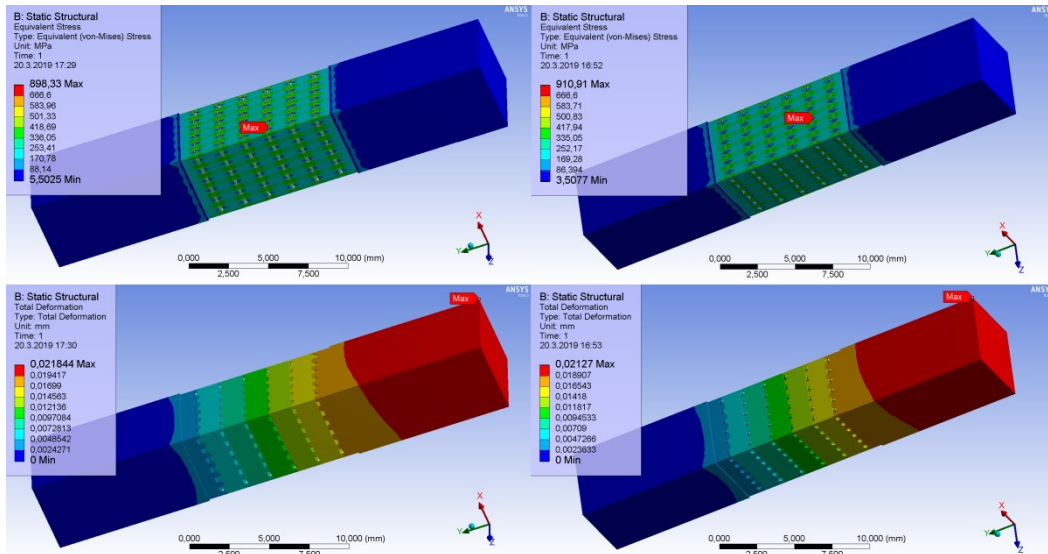
Obrázek 3-32 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 3



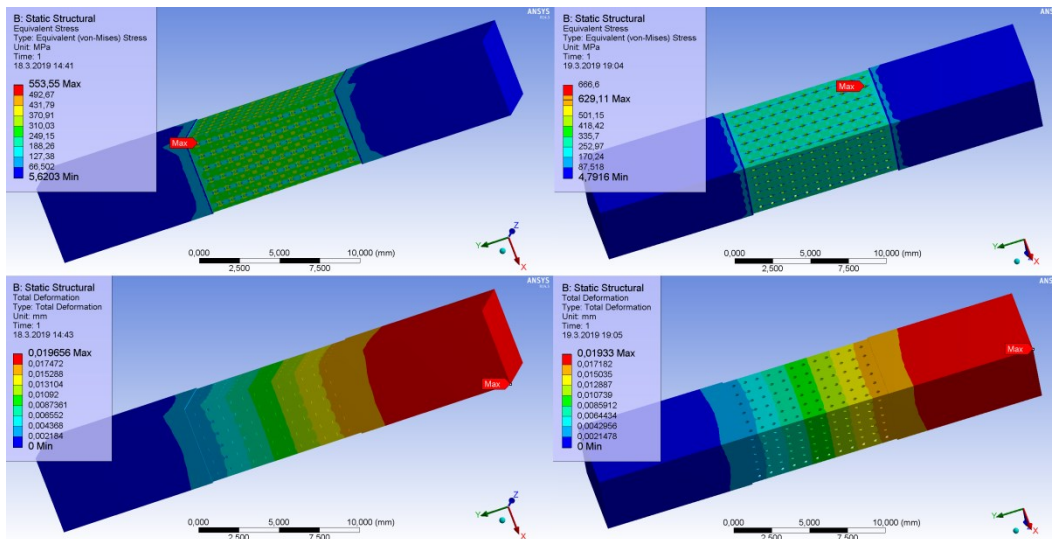
Obrázek 3-33 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 4



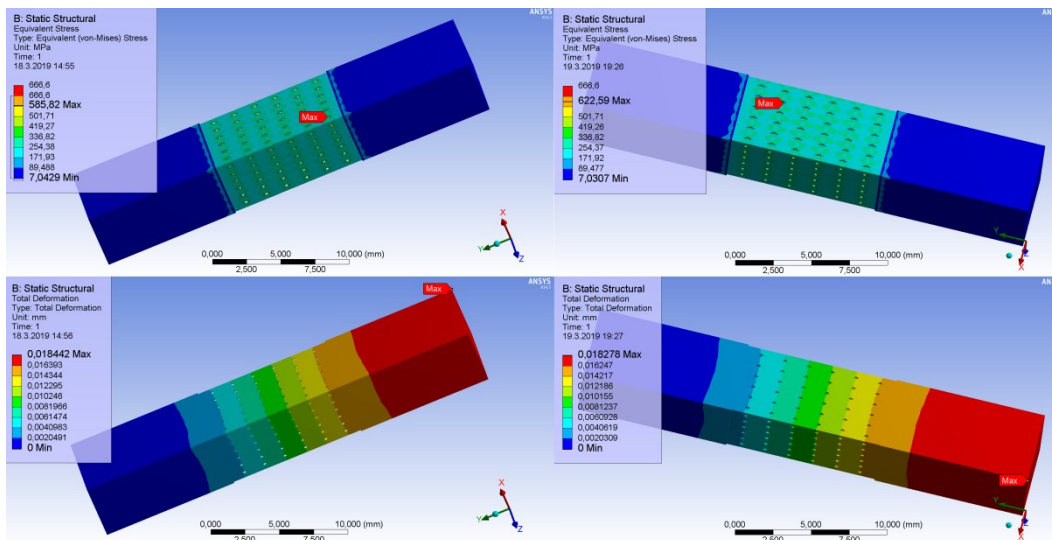
Obrázek 3-34 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 5



Obrázek 3-35 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 6



Obrázek 3-36 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 7



Obrázek 3-37 - MKP analýza perforované PK typu Block - experiment č. 8

### 3.1.4.3 Průběžné vyhodnocení

V tabulce 3-7 je vidět shrnutí výsledných hodnot perforované PK.

Tabulka 3-7 - Shrnutí výsledků MKP analýzy perforované PK typu Block

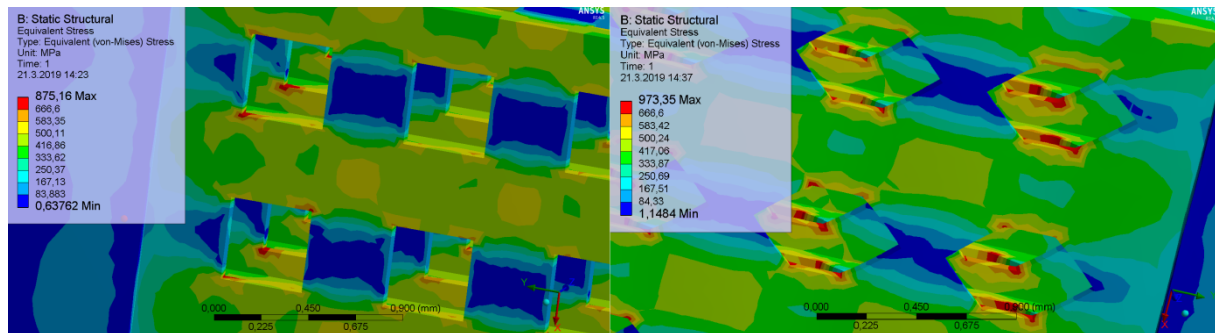
Experiment	Redukované napětí - obdélník [MPa]	Redukované napětí - diamant [MPa]	Celková deformace - obdélník [mm]	Celková deformace - diamant [mm]	Celková tuhost obdélník [Nm]	Celková tuhost diamant [Nm]
č. 0	311.58		0.0172		72.67	
č. 1	875.16	973.35	0.0292	0.027	42.808	46.296
č. 2	889.41	940.9	0.0236	0.0224	52.966	55.804
č. 3	552.02	574.69	0.0207	0.0201	60.386	62.189
č. 4	551.34	587.42	0.019	0.0187	65.789	66.845
č. 5	904.61	942.47	0.0263	0.0252	47.529	49.603
č. 6	898.33	910.91	0.0218	0.0213	57.339	58.685
č. 7	553.55	629.11	0.0197	0.0193	63.452	64.767
č. 8	585.82	622.59	0.0184	0.0183	67.935	68.306

Z těchto výsledků lze jednoznačně vyčíst následující: se snižující se celkovou plochou děrování roste tuhost PK. Dvojnásobná rozteč děr (rozměr z) - tedy snížení celkového počtu - má ve všech případech příznivé účinky. Zúžení děr v příčném směru (rozměr y) má pro tento druh osového namáhání dle očekávání lepší vliv na tuhost i napětí, než zúžení v podélném směru (rozměr x). Při minimálních hodnotách všech tří proměnných dosahují vzorky téměř stejné tuhosti, jako neděrovaná PK.

Nejlepších hodnot tuhosti dosahují díky své nejmenší ploše vzorky experimentu č. 8. Otázkou ale zůstává, zda-li je takto poměrově malými dírami možné vysypat všechny prášek uzavřený uvnitř PK. Z tohoto pohledu se nejlépe jeví experiment č. 3, který má stále velmi dobré výsledky tuhosti i napětí, ale oproti experimentu č. 8 má 4x větší plochu, což ušetří čas tisku, materiál pro tisk a snadněji se vysype zbylý prášek uvnitř PK.

Navržené parametry děrování (aplikovatelné na další rozměry blockového schématu), které by mohlo nahradit celistvou blockovou PK, při zachování téměř stejné tuhosti je tedy následující: rozměr x = polovina rozteče stěn (v tomto případě 0,4 mm), rozměr y = čtvrtina rozteče stěn (0,2 mm), rozměr z = vzdálenost rozteče stěn (0,8 mm).

S porovnáním geometrie obdélníkových a diamantových typů děr to již tak jednoznačné není. Na obrázku 3-38 lze vidět detail průběhu redukovaného napětí dle metody HMM v MPa obou typů děr. Z výsledků je patrné, že hodnoty špiček redukovaného napětí vychází pro obdélníkové díry ve všech případech nižší. To může být způsobeno tím, že masa materiálu mezi jednotlivými otvory v podélném směru je celkově větší, (obvod obdélníku je menší než diamantu stejné plochy). Z čehož vyplývá, že oblasti špiček napětí (rohy otvorů) u diamantových děr přejdou dříve do plastického stavu a začnou se nenávratně deformovat (trhat). Naproti tomu výsledky celkového prodloužení a tedy i tuhosti vzorků s diamantovým typem děr jsou ve všech případech lepší. To je zřejmě dáno příznivým (podlouhlým) tvarem díry ve směru namáhání, obdobně jako vliv zužování děr v příčném směru. Zde je ale také třeba říci, že pro namáhání v příčném směru je tento tvar naopak velmi nevhodný.



Obrázek 3-38 - Detail průběhu redukovaného napětí obou typů děr dle metody HMM v MPa

### 3.1.5 Hodnocení MKP analýzy

Na základě výsledků MKP analýzy tahového namáhání mnoha typů geometrií PK byla vybrána Blocková konstrukce jako nejlepší.

V další fázi bylo zkoumáno děrování této struktury v několika modifikacích a vytipováno jedno s nevhodnějším poměrem všech vlastností.

Z MKP analýzy osového zatížení nelze jednoznačně určit, který tvar díry je celkově lepší, protože diamantové díry tohoto tvaru mají lepší tuhost v podélném směru, ale obdélníkové nižší hodnoty maximálního napětí a velmi pravděpodobně lepší tuhost v ostatních směrech.

V další části této práce bude zkoumán pouze obdélníkový typ děrování, a to hlavně ze dvou důvodů:

- Je hledána PK použitelná i pro všechny typy geometrických prvků, jako jsou např. převisy pod úhlem či vyklonění samotné PK (angled support), kde je velmi pravděpodobné namáhání PK v jiných směrech než pouze osových, ať už od teplotní roztažnosti materiálu nebo např. nárazu pravítka do součásti při nanášení nové vrstvy. Pro tyto případy jsou obdélníkové díry vhodnější.
- Jak bylo ukázáno v kapitole 2.2.6.3 software Magics má omezené nastavení rozměrů děrování. U diamantového typu děr tedy nelze dodržet podobné rozmístění, jako bylo pro zjednodušení a porovnání zvoleno v modelech pro MKP analýzu. Konkrétně rozměr a (obrázek 2.30 pro diamantovou díru) neumožňuje zmenšení plochy a počtu děr tak, aby byla struktura pevnostně porovnatelná s dosud používanou neděrovanou PK.

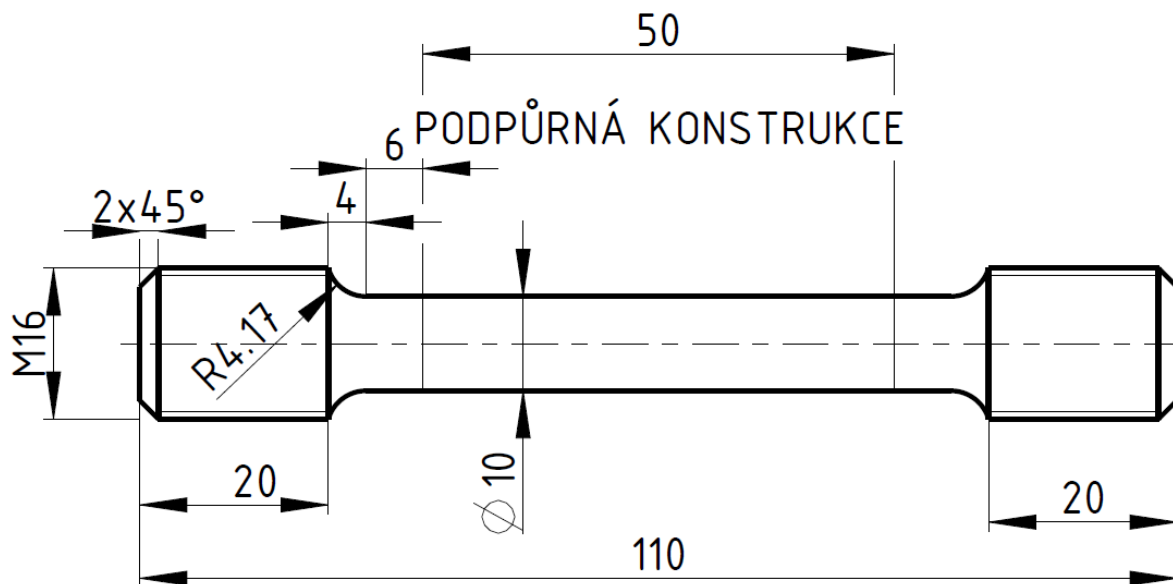
Všechny tyto výsledky budou v další kapitole aplikovány na návrh reálných vzorků pro 3D tisk a dále podrobeny tahové zkoušce, aby bylo možné určit, jak se vybrané struktury budou chovat v oblasti plastické deformace.

## 3.2 Realizace experimentu

### 3.2.1 Příprava zkušebních vzorků pro 3D tisk

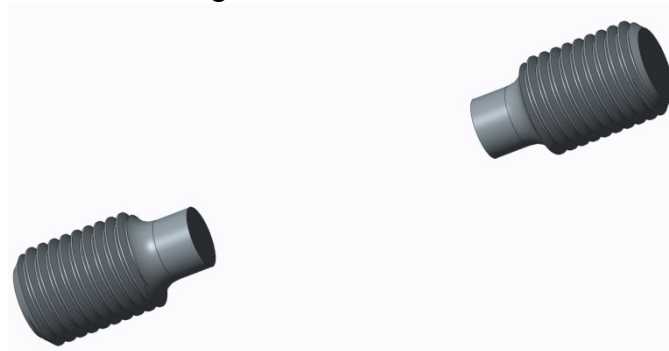
#### 3.2.1.1 Model

Pro 3D tisk a následnou tahovou zkoušku byly vytvořeny CAD modely vzorků, jejichž rozměry lze vidět na obrázku 3-39.

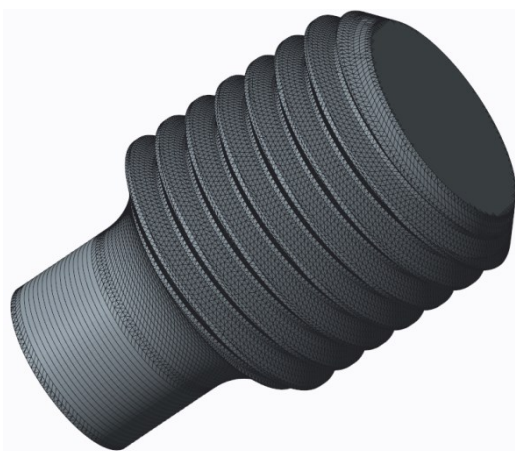


Obrázek 3-39 - Rozměry zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku

Část vzorků s PK byla do modelů přidána až v softwaru Magics. Zbylé objemové části vzorků byly vytvořeny opět v softwaru Creo Parametric 3.0. Objemové části vzorků byly modelovány rovnou s metrickým závitem M16, na základě předchozího ověření, že závity lze bez problému vytisknout a po úpravě povrchu (projetí závitovým očkem) upnout do čelistí zkušebního zařízení na tahovou zkoušku. Na obrázku 3-40 lze vidět model zkušebního vzorku, který byl následně exportován do formátu .STL (detail na obrázku 3-41) a nahrán do softwaru Magics.



Obrázek 3-40 - CAD model vzorků bez PK



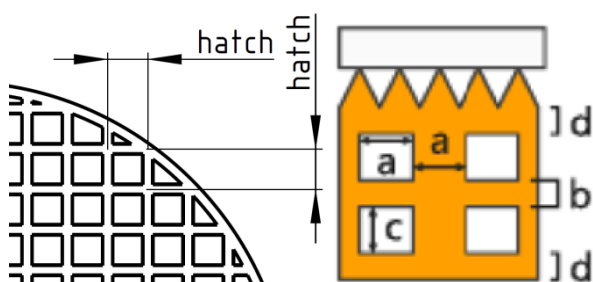
Obrázek 3-41 - Detail části vzorku ve formátu .STL

### 3.2.1.2 Parametry PK

Parametry hatchování (rozteč sousedních stěn) Blockové PK a její děrování byly zvoleny na základě zkušeností specialistů z RTI a výsledků MKP analýzy v předchozí kapitole. Pro 3D tisk byly zvoleny hodnoty hatchování 0,6, 0,5, a 0,4 mm. Hodnoty děrování byly ke každému rozměru hatchování přepočítány tak, aby přesně odpovídaly pokusu v MKP analýze. Tištěno bude pro každou hodnotu hatchování pět vzorků. Vzorek bez děrování pro porovnání (z MKP analýzy č. 0) tři nejlepší kombinace děrování (z MKP analýzy sestupně č.3, č.4, č.8) a vzorek který vyšel pevnostně nejhůře (z MKP analýzy č. 1) pro informaci, zda se takováto plocha děrování bude schopna vůbec úspěšně vytisknout. Vzdálenost začátku děrování bude u všech vzorků nastavena na 1 mm. Pro přehlednost lze všechny hodnoty nastavení PK vzorků vidět v tabulce 3-8 a význam parametrů na obrázku 3-42.

Tabulka 3-8 - Hodnoty parametrů PK pro 3D tisk

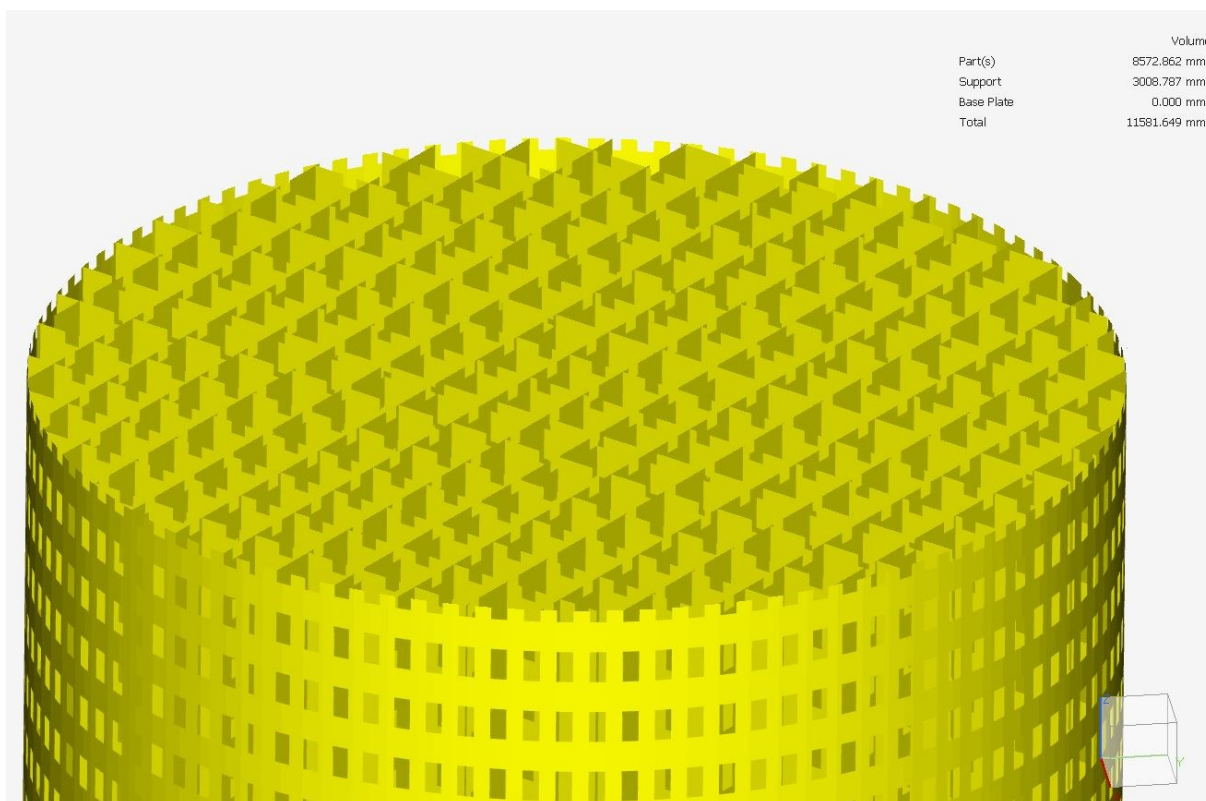
Číslo experimentu	a [mm]	b [mm]	c [mm]	hatch [mm]	d [mm]
1	-	-	-	0.6	-
2	0.15	0.3	0.3	0.6	1
3	0.15	0.9	0.3	0.6	1
4	0.15	1.05	0.15	0.6	1
5	0.3	0.3	0.3	0.6	1
6	-	-	-	0.5	-
7	0.125	0.25	0.25	0.5	1
8	0.125	0.75	0.25	0.5	1
9	0.125	0.875	0.125	0.5	1
10	0.25	0.25	0.25	0.5	1
11	-	-	-	0.4	-
12	0.1	0.2	0.2	0.4	1
13	0.1	0.6	0.2	0.4	1
14	0.1	0.7	0.1	0.4	1
15	0.2	0.2	0.2	0.4	1



Obrázek 3-42 - Parametry PK pro 3D tisk

bohužel neumožňuje v případě kulaté geometrie nastavit díry ve všech řadách přesně na střed mezery, protože tohle nastavení řídí sám a vychází z nejdelsí stěny PK, jak to lze vidět na obrázku 3-43. Vzhledem k tomu, že tohle pravidlo dodržuje pro všechny velikosti parametrů stejně, jsou vzorky stále porovnatelné a toto omezení neovlivní výsledky experimentu.

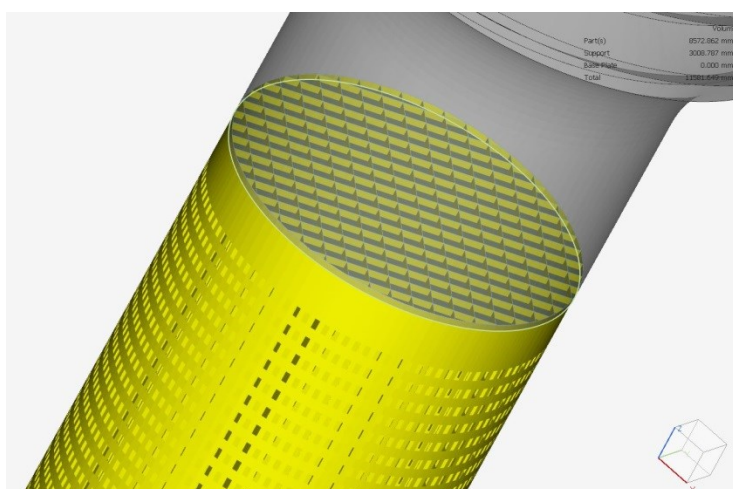
Z obrázku nastavení děrování je patrné, že rozměr a platí jak pro šířku díry, tak pro mezeru mezi nimi. Toto nastavení ovšem software Magics dodržuje pouze pro vnější hranici PK. Pro Blockové schéma zachovává nastavení jedné díry pro jednu mezeru hatchování, stejně jako tomu bylo v předchozí MKP analýze. Zároveň ale



Obrázek 3-43 - Detail děrování PK v řezu

V místě propojení PK s objemovou částí vzorku byly stejně jako v MKP analýze úplně vynechány přípojovací zuby (hatching teeth), protože v tomto případě nechceme snadno odstranitelnou PK, ale naopak přenést nejslabší místo do oblasti děrování PK. Při použití zubů by bylo velmi pravděpodobné, že by vzorky při následné tahové zkoušce praskaly právě v tomto místě viz. kapitola 2.2.6.4.

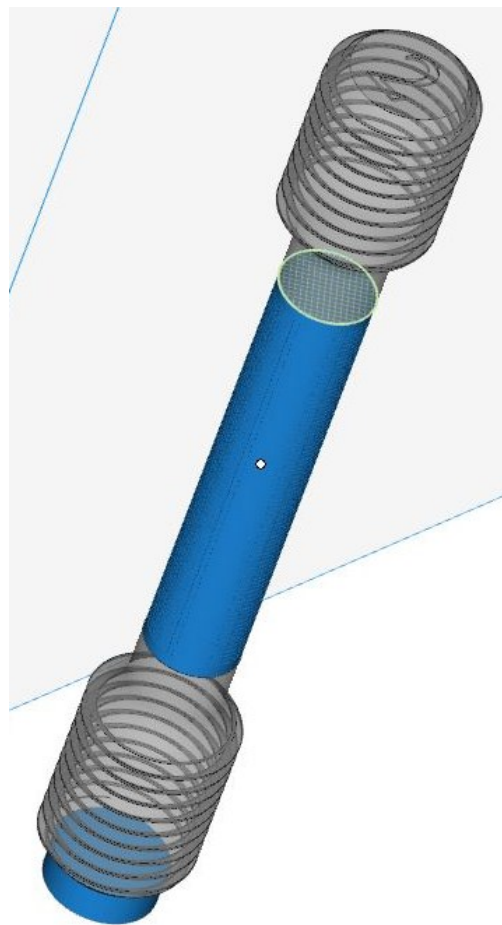
PK musí být ovšem s objemovou částí dostatečně propojeny, proto je ve všech případech provaření PK do objemu (Z- Offset) nastaveno na běžně používanou hodnotu 0.2 mm, jak lze vidět na obrázku 3-44.



Obrázek 3-44 - Detail provaření PK do objemu (Z-Offset)

Vzorky budou tištěny na výšku, aby odpadla potřeba dalších podpor. Mezi dolní plochu vzorku a platformu byla zvolena podpora typu Objem, která se po tisku odřízne nebo odfrézuje. Na horní plochu vzorků bylo v Magicsu pro přehlednost experimentu přidáno ještě popisné číslo viz. tabulka 3.8. Příklad jednoho kompletního vzorku je vidět na obrázku 3-45.

Takto připravené vzorky byly následně vyexportovány do formátu .SLI a to odděleně jejich objemová část a obě PK (dolní Objemová a sledovaná Blocková).



Obrázek 3-45 - Kompletní vzorek v softwaru Magics

### 3.2.1.3 Příprava tiskové úlohy

Příprava tiskové úlohy proběhla v softwaru EOSPRINT. Pomocí tohoto programu byly soubory formátu .SLI zkonvertovány do formátu .CLI, ve kterém je již možné je načíst do tohoto programu a umístit na platformu. Oddělení modelu podpor a objemové části je nutné proto, že se každá tato součást vzorku spéká jinými parametry. Podpory se nemohou tisknout stejnými parametry jako objemová část, protože, jak již bylo řečeno, stěny např. pro Blockové schéma jsou stavěny pouze jedním přejezdem laseru a výkon nastavený pro tisk objemových částí by tyto tenké stěny úplně roztavil. Materiál vzorků bude ocel MS1 a tloušťka tisknuté vrstvy bude nastavena na 40  $\mu\text{m}$ . Parametry tisku pro toto nastavení jsou vidět v tabulce 3-9.

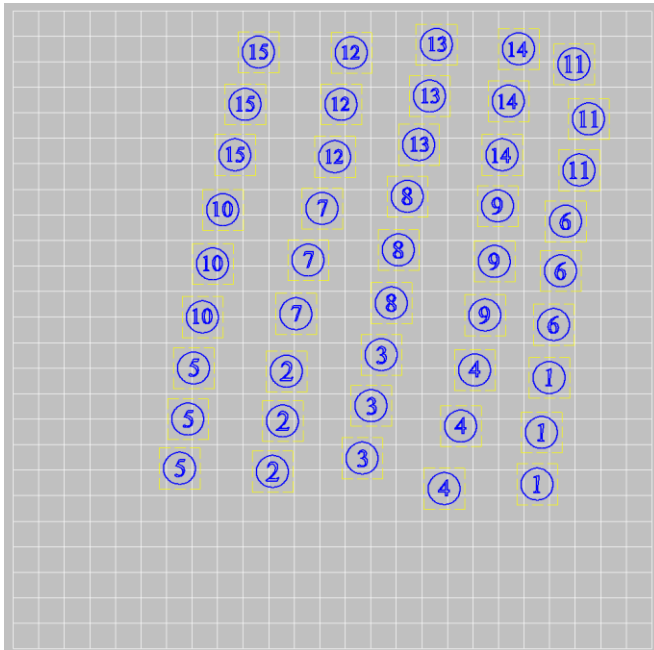
Tabulka 3-9 - Parametry tisku pro materiál MS1 tloušťky vrstvy 40  $\mu\text{m}$

	Výkon laseru [W]	Rychlost laseru [mm/s]
Objemová část	285	960
Podpůrná konstrukce (Block)	100	850



Od každého vzorku budou tištěni tři zástupci pro případ, že by byly některé vadné např. vinou nežádoucích vměstků apod.

Uspořádání vzorků na stavěcí platformě lze vidět na obrázku 3-46.



Obrázek 3-46 - Uspořádání vzorků na stavěcí platformě

Umístění součástí na stavěcí platformu bylo potřeba provést s ohledem na určitá pravidla:

- Při tisku více součástí je důležité, aby žádné dva kusy nebyly postaveny do jedné přímky kolmé na směr nanášení pravítka (z pohledu na obrázek 3-46 zprava). Během stavění může vlivem tepelné roztažnosti materiálu dojít k přizvednutí součásti a pravítko se o toto místo může zastavit. Umístění součástí tak, aby je pravítko překrývalo jedno po druhém, značně zvyšuje spolehlivost tisku. Ze stejného důvodu by se součásti s rovnými stěnami měly umísťovat pod úhlem (alespoň 5°) této stěny vůči pravítku.
- V návaznosti na předchozí bod by se měly součásti s největšími tendencemi k přizvedávání (v tomto případě např. vzorky s největší plochou děrování č. 5, č. 10, č. 15) umístit nejdále od začátku nájezdu pravítka. V případě, že jsou tyto díly skutečně při stavění problematické, lze jejich tisk vypnout a umožnit tím zbytku součástí úspěšné dokončení procesu.
- Vzhledem k tomu že ochranná atmosféra (v tomto případě Dusík) je hnána na platformu shora (z pohledu na obrázek 3-46) je lepší umísťovat součásti do horní části platformy, kde jsou lepší podmínky k tisku.
- Při vkládání vzorků na stavěcí platformu je třeba dodržet pořadí (nebo součásti následně seřadit ve stromě) tak, aby mohl laser tisknout z levého dolního rohu k pravému hornímu vždy vzorky vedle sebe. Tím se značně zkrátí vzdálenosti přejezdů a čas tisku.

Takto připravená tisková úloha (formát .EOSJOB) byla odeslána do tiskového zařízení a spuštěn proces tisku. Ten byl předem propočítán na celkový čas cca 53 hodin.

### 3.2.2 Tiskové zařízení

3D tisk vzorků byl realizován tiskovým zařízením EOS M290 Laboratoře experimentálního obrábění RTI, které lze vidět na obrázku 3-47. Parametry stroje jsou vypsány v tabulce 3-10. Parametry tisku v tabulce 3-9 viz. kapitola 3.2.1.3. Chemické složení použitého materiálu (ocel MS1) lze vidět v tabulce 3.1 a jeho mechanické vlastnosti v tabulce 3.2 viz. kapitola 3.1.



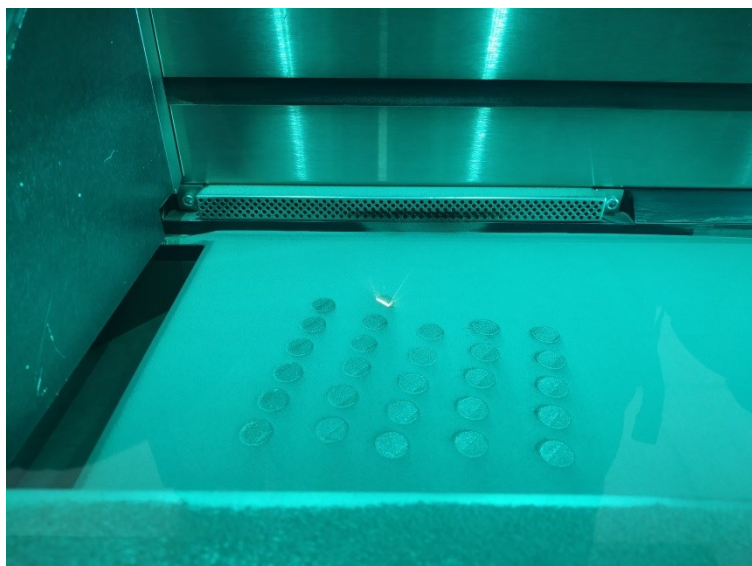
Obrázek 3-47 - Tiskové zařízení EOS M290 [13]

Tabulka 3-10 - Parametry tiskového zařízení EOS M290 [13]

Parametry zařízení	Udávané hodnoty
Velikost stavební komory	250 mm x 250 mm x 325 mm
Druh a výkon laseru	Yb-fibre laser; 400 W
Přesnost optiky	F-theta; vysokorychlostní skener
Rychlost skenování	do 7.0 m/s
Průměr ohniska čočky	100 $\mu$ m
Příkon	32 A
Spotřeba	max. 8.5 kW / obvykle 3.2 kW
Hmotnost zařízení	1250 kg

### 3.2.3 Výsledek tisku

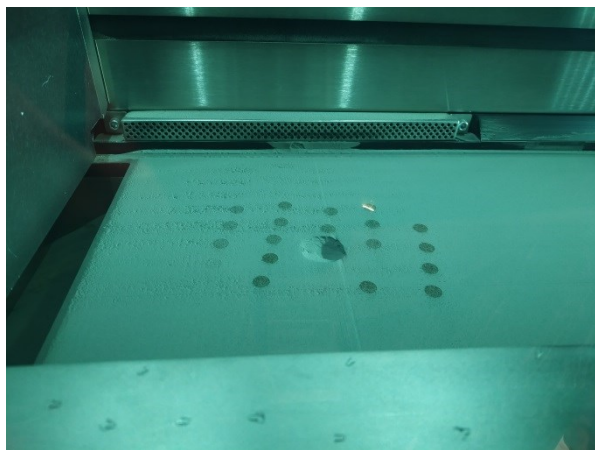
Na obrázku 3-48 lze vidět průběh tisku experimentu.



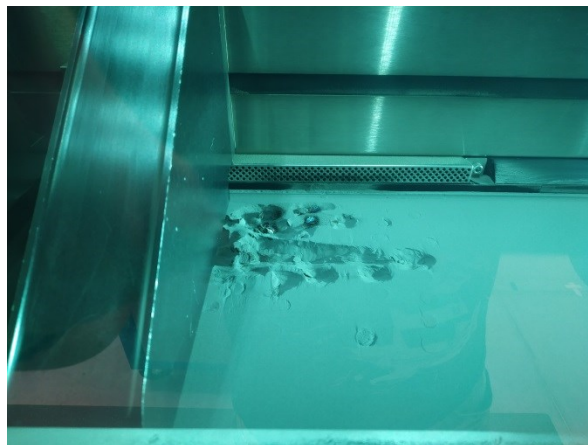
Obrázek 3-48 - Průběh tisku experimentu

Přibližně ve třetině výšky tisku sledované PK začalo stavění některých vzorků selhávat. I přes počáteční snahu operátora tyto vzorky vypnout a pokračovat v tisku, musel být proces nakonec ukončen, protože selhávaly stále další vzorky a škody již byly nenapravitelné.

Na obrázku 3-49 je vidět selhání prvního vzorku. Pravitko zde úplně ulomilo podporu a odsunulo ji do strany, na jejím místě vznikla viditelná díra. Na obrázku 3-50 je vidět finální selhání hned několika vzorků najednou.



Obrázek 3-49 - Selhání tisku prvního vzorku



Obrázek 3-50 - Finální selhání tisku

Na obrázku 3-51 lze vidět platformu s nedokončenými vzorky vyndanou ze stroje.



Obrázek 3-51 - Platforma s nedokončenými vzorky

### 3.2.3.1 Vyhodnocení neúspěšného tisku

Z počátku byl neúspěch prvního pokusu přikládán příliš velké tepelné roztažnosti děrovaných PK. Plán na nový pokus zahrnoval místo keramického pravítka použití pravítka s kartáčkem, které je při nanášení nové vrstvy schopno se vyhnout případným přizvednutým součástem. Dále byl zkrácen rozměr celého vzorku (objemové části i PK), aby se co nejvíce předešlo deformacím od teplotních vlivů.

Při přípravě nového pokusu bylo ovšem zjištěno, že software Magics při aktivaci děrování (perforace) PK bez varování vypíná provaření PK do objemové části (Z-Offset), přestože všechna příslušná nastavení jsou správně vyplněna a aktivní. Bohužel tohle nebylo při přípravě stavěcí platformy zaznamenáno. PK tedy nebyla při tisku dostatečně připojena k objemové části a pravítko ji proto velmi snadno odtrhlo.

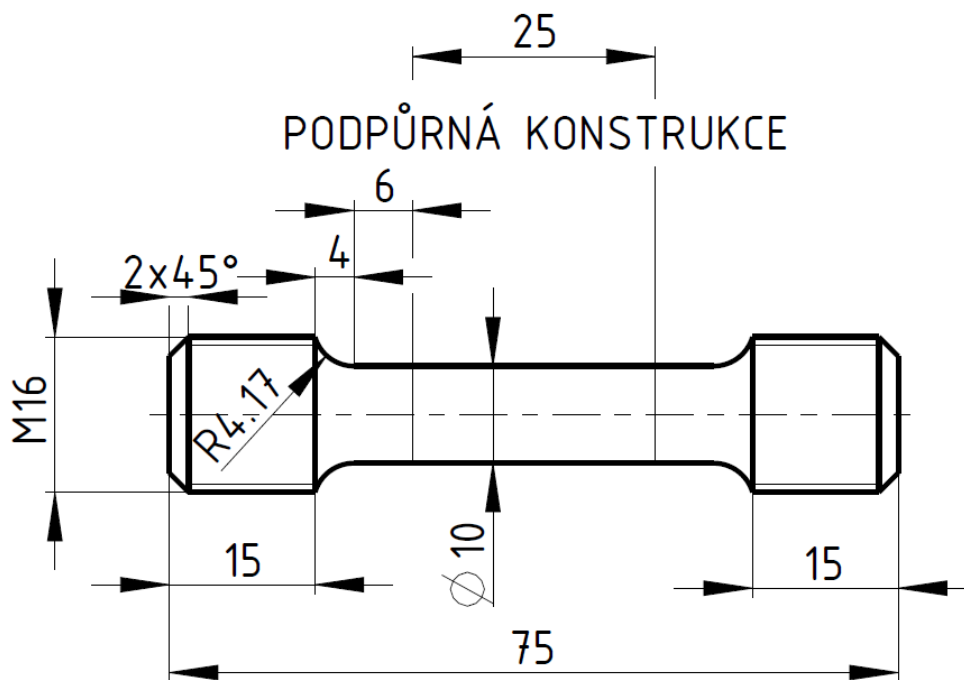
Následně bylo zjištěno, že toto omezení lze obejít aktivováním připojovacích zubů (hatching teeth), ale hodnotu výšky těchto zubů nastavit jako nulovou. Prorůstání těchto zubů (hatching teeth Z-Offset) již Magics samovolně nevypíná.

Nicméně pro nový pokus byl pro jistotu ponechán plán s kratšími vzorky a pravítka s kartáčkem.

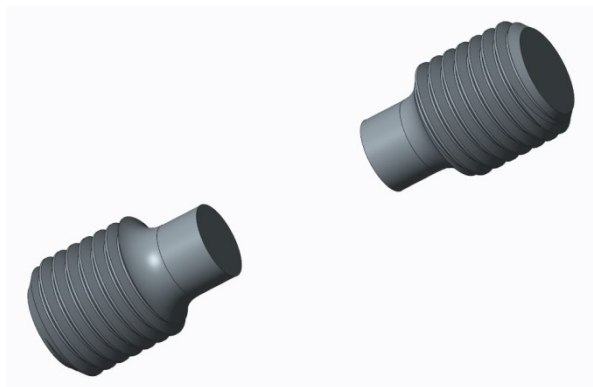
### 3.2.4 Příprava nových zkušebních vzorků pro 3D tisk

Pro přípravu nového pokusu musel být zopakován celý postup popsany v kapitole 3.2.1. Nastavení všech parametrů bylo ponecháno, pouze se zohlednily poznatky popsané v předchozí kapitole.

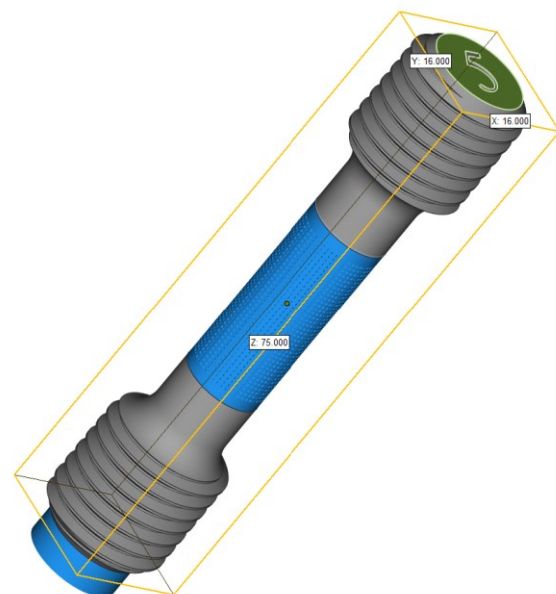
Rozměry zkrácených vzorků lze vidět na obrázku 3-52, CAD model objemových částí vzorku v Creu 3.0 na obrázku 3-53 a příklad kompletně připraveného modelu s PK pro tisk v Magicsu na obrázku 3-54. Umístění vzorků na platformě zůstalo stejně jako v předchozím případě viz. obrázek 3-46.



Obrázek 3-52 - Rozměry zkráceného zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku



Obrázek 3-53 - CAD model zkrácených vzorků bez PK



Obrázek 3-54 - Kompletní zkrácený vzorek v softwaru Magics

### 3.2.5 Výsledek druhého tisku

Druhý pokus o vytištění vzorků již proběhl úspěšně. Na obrázku 3-55 a 3-56 lze vidět platformu úspěšně dotištěných vzorků po vyndání ze stroje a vyžhání. V následující kapitole budou vzorky podrobeny tahové zkoušce.



Obrázek 3-55 - Úspěšně vytištěná platforma se vzorky - shora



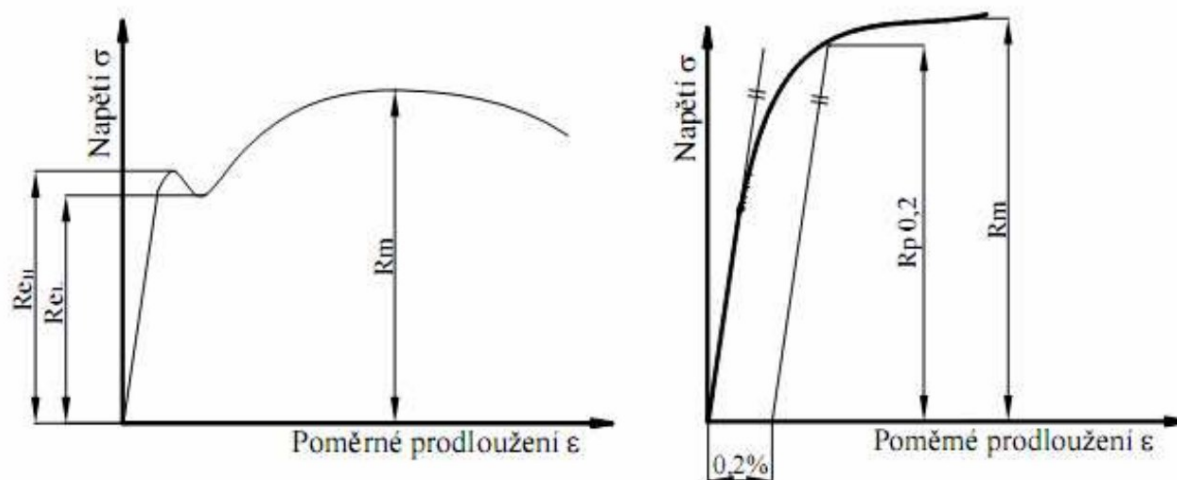
Obrázek 3-56 - Úspěšně vytištěná platforma se vzorky - z boku

### 3.3 Tahová zkouška vytištěných vzorků

#### 3.3.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška patří do skupiny statických mechanických zkoušek. Tahovou zkouškou jsou zkoumány mechanické vlastnosti materiálu. Tato zkouška se provádí podle normy ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Princip tahové zkoušky spočívá v jednoosém namáhání zkušební vzorku. Výsledkem tahové zkoušky je grafický záznam závislosti napětí na deformaci nebo zatěžovací síly na prodloužení (tahový diagram).

Tahový diagram kovových materiálů se dělí na dva základní tvary: tahový diagram s výraznou mezí kluzu a tahový diagram s nevýraznou mezí kluzu. Na obrázku 3-57 jsou vidět příklady těchto diagramů.



Obrázek 3-57 - Tahový diagram: s výraznou mezí kluzu (vlevo), s nevýraznou mezí kluzu (vpravo)[12]

Nejdůležitější stanovené mechanické vlastnosti jsou mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce.

- Mez kluzu

Jako mez kluzu se označuje napětí, při kterém se mění elastická deformace na plastickou.

- Diagramy s výraznou mezí kluzu

U diagramů s výraznou mezí kluzu, kde se vyskytuje prodleva napětí, lze určit hodnoty horní meze kluzu  $R_{eH}$  [MPa] a dolní meze kluzu  $R_{eL}$  [MPa].

- $R_{eH} = \frac{F_H}{S_0}$  ; kde  $F_H$  je hodnota příslušného zatížení [N] a  $S_0$  počáteční průřez vzorku [ $mm^2$ ].
- $R_{eL} = \frac{F_L}{S_0}$  ; kde  $F_L$  je hodnota příslušného zatížení [N] a  $S_0$  počáteční průřez vzorku [ $mm^2$ ].

- Diagramy s nevýraznou mezí kluzu

Pro diagramy s nevýraznou mezí kluzu se určuje tzv. smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  [MPa], což je hodnota napětí způsobující plastickou deformaci o 0,2%.

- $R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$  ; kde  $F_{p0,2}$  je hodnota příslušného zatížení [N] a  $S_0$  počáteční průřez vzorku [ $mm^2$ ].

- **Mez pevnosti**  
Jako mez pevnosti se označuje maximální napětí dosažené v tahovém diagramu, aniž by se vzorek porušil.  
 $R_m = \frac{F_m}{S_0}$  ; kde  $R_m$  je mez pevnosti [MPa],  $F_m$  je hodnota maximálního zatížení [N] a  $S_0$  počáteční průřez vzorku [ $mm^2$ ].
- **Tažnost**  
Jako tažnost se označuje trvalé prodloužení měřené délky po lomu zkušební tyče vyjádřené v procentech.  
 $A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100$  ; kde  $A$  je tažnost [%],  $L_u$  je konečná měřená délka po lomu [mm] a  $L_0$  je počáteční délka [mm].
- **Kontrakce**  
Jako kontrakce se označuje největší změna plochy příčného průřezu, ke které došlo během zkoušky.  
 $Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100$  ; kde  $Z$  je kontrakce [%],  $S_u$  je nejmenší konečná měřená plocha po lomu [ $mm^2$ ] a  $S_0$  je počáteční průřez vzorku [ $mm^2$ ].

### 3.3.2 Zkušební zařízení

Tahová zkouška vytištěných vzorků byla provedena na trhacím stroji Zwick/Roell Z250 řady AllroundLine, který je vidět na obrázku 3-58 a jeho parametry v tabulce 3-11. Deformace byla během zkoušky snímána pomocí extenzometru MultiXtens.

Tabulka 3-11 - Parametry zkušebního zařízení [18]

Parametry zařízení	Udávané hodnoty
Maximální síla	250 kN
Výška	2304 mm
Šířka	1531 mm
Výška zkušebního prostoru	1588 mm
Šířka zkušebního prostoru	630 mm
Váha	1870 kg
Motor	AC servo-motor Hiperface



Obrázek 3-58 - Trhací stroj Zwick/Roell Z250 [18]



### 3.3.3 Realizace tahové zkoušky

#### 3.3.3.1 Příprava tahové zkoušky

Po odříznutí vytištěných vzorků z platformy proběhl na jednom z nich pokus o úpravu závitu projektím závitovým očkem. PK však toto zatížení nevydržela a odlomila se od objemové části. Aby nedošlo k znehodnocení více vzorků, bylo rozhodnuto, že se vzorky raději do trhačích stroje nebudou upínat pomocí závitu, ale sevřením do čelistí. Způsob upnutí ovšem nemá žádný vliv na výsledky tahové zkoušky.

Z důvodu zkrácení vzorků po neúspěšném prvním 3D tisku byla měřená počáteční délka vzorku  $L_0$  nastavena ve snímačích extenzometru na 10 mm.

Předpětí všech vzorků bylo nastaveno na 30 [N].

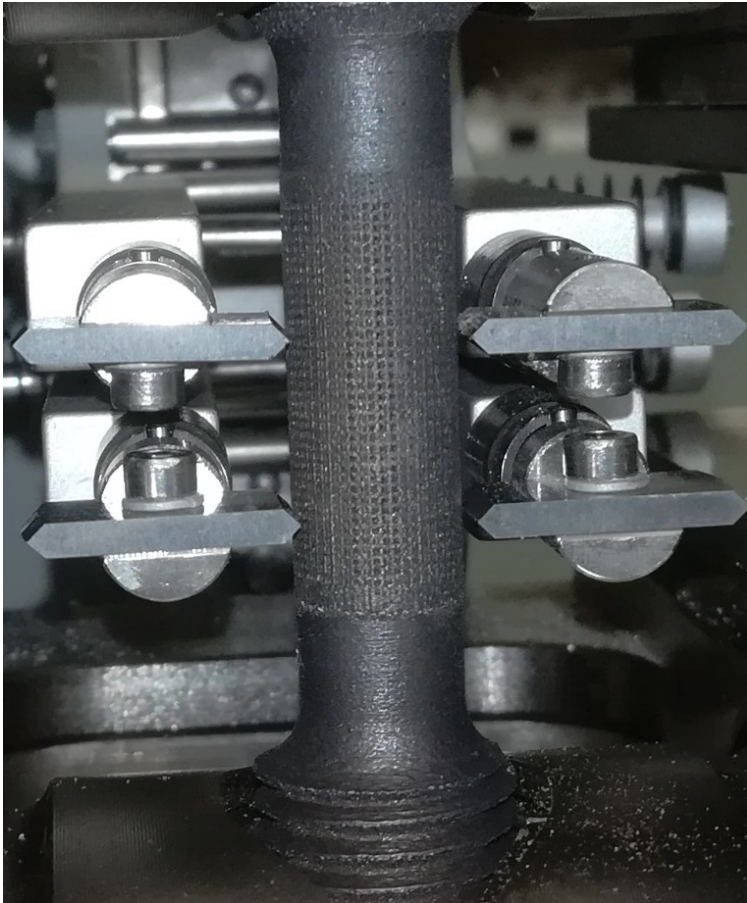
Vzorek upnutý do čelistí zkušebního zařízení a připravený na tahovou zkoušku lze vidět na obrázku 3-59.



Obrázek 3-59 - Vzorek upnutý do trhačích stroje

### 3.3.3.2 Výsledky tahové zkoušky

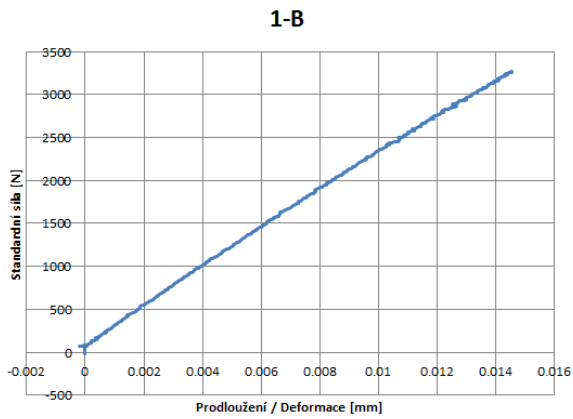
Tahová zkouška byla provedena úspěšně, nicméně výsledky nedopadly dle očekávání. Všechny vzorky byly porušeny v místě připojení PK k objemové části a to i přes to, že plocha průřezu v místě lomu je u děrovaných PK znatelně větší, než nejmenší plocha průřezu. Na obrázku 3-60 je vidět přetržený vzorek upnutý v zkušebním zařízení (lom je mezi dolní objemovou částí a PK) a na obrázku 3-61 přetržený vzorek vyndaný ze stroje. Na obrázcích 3-62-76 si lze prohlédnout tahové diagramy pro jednotlivé vzorky.



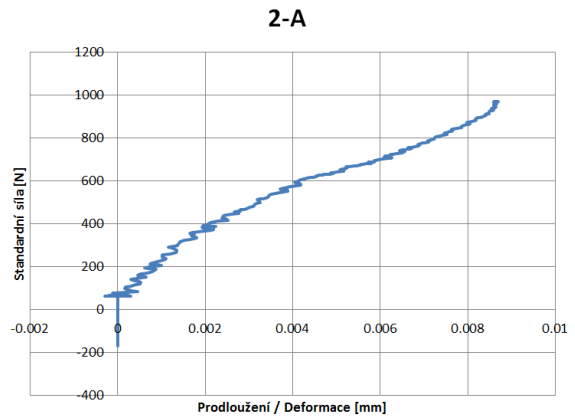
Obrázek 3-60 - Přetržený vzorek upnutý v trhacím zařízení



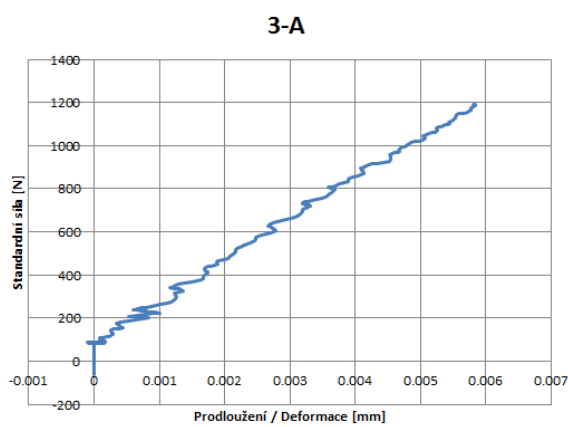
Obrázek 3-61 - Přetržený vzorek vyjmutý z trhacího zařízení



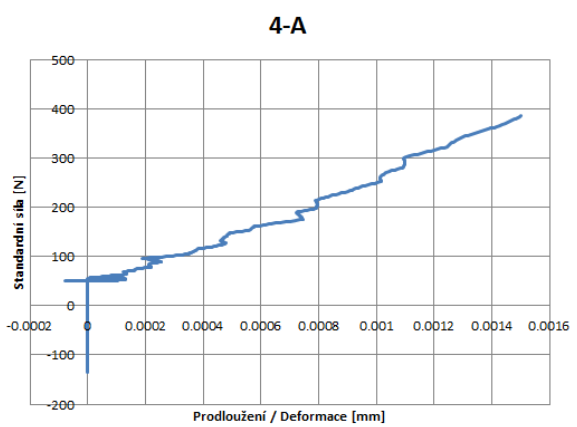
Obrázek 3-62 - Tahový diagram vzorek č.1-B



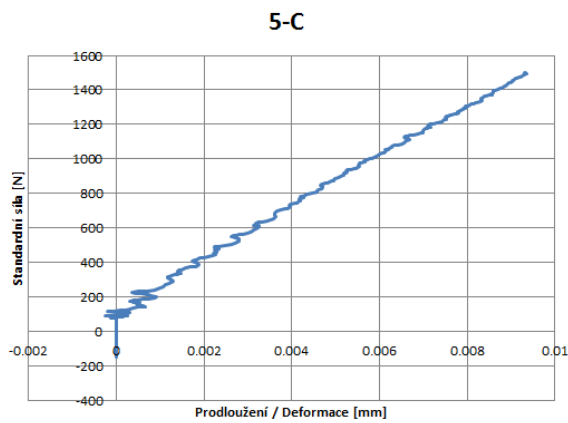
Obrázek 3-63 - Tahový diagram vzorek č.2-A



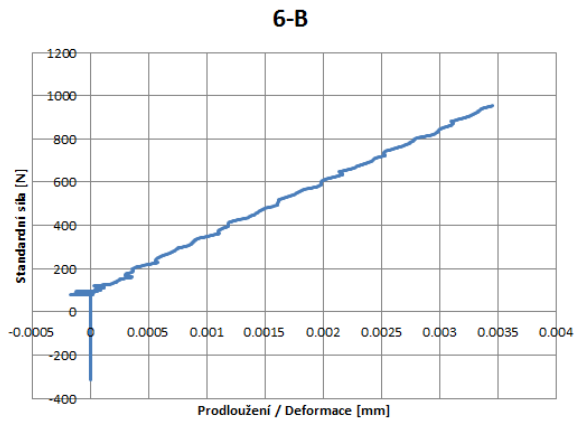
Obrázek 3-64 - Tahový diagram vzorek č.3-A



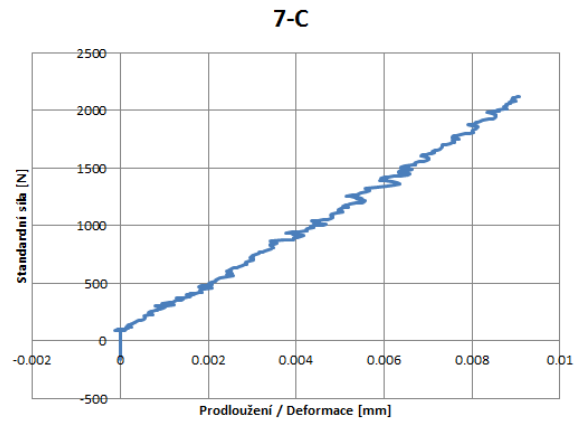
Obrázek 3-65 - Tahový diagram vzorek č.4-A



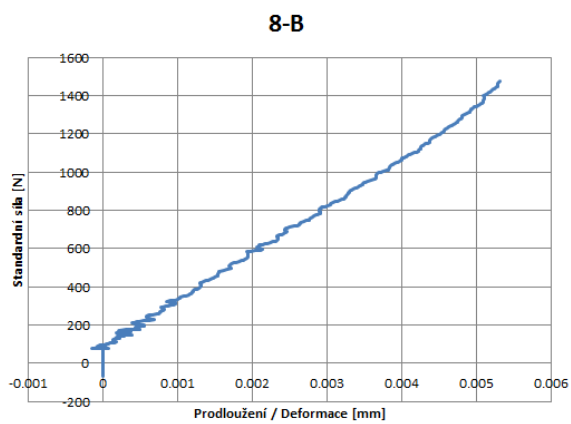
Obrázek 3-66 - Tahový diagram vzorek č.5-C



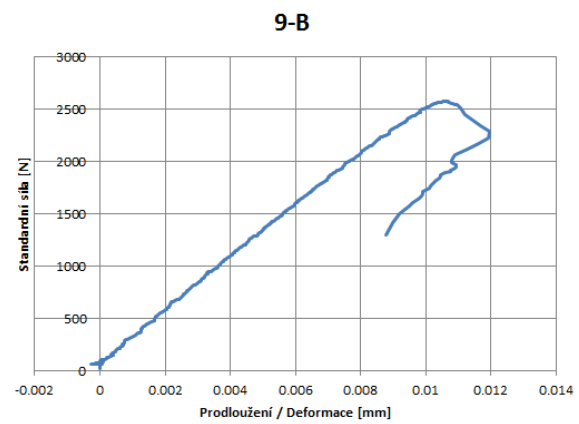
Obrázek 3-67 - Tahový diagram vzorek č.6-B



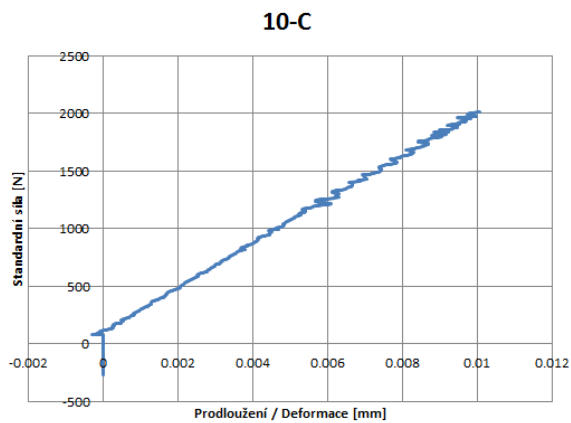
Obrázek 3-68 - Tahový diagram vzorek č.7-C



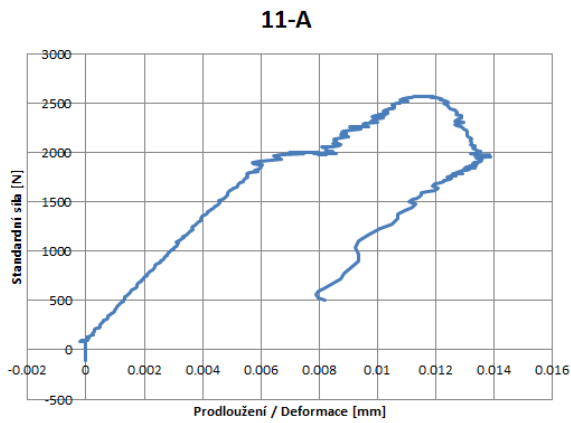
Obrázek 3-69 - Tahový diagram vzorek č.8-B



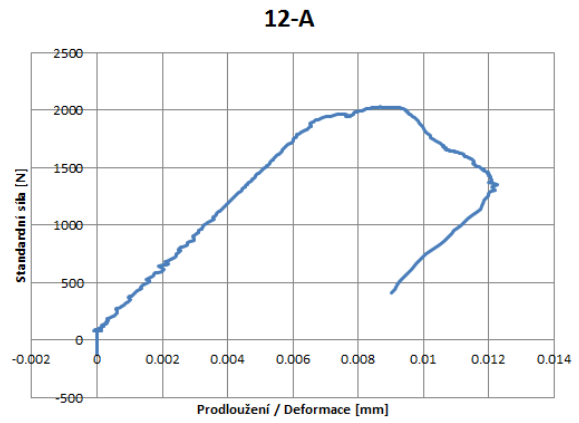
Obrázek 3-70 - Tahový diagram vzorek č.9-B



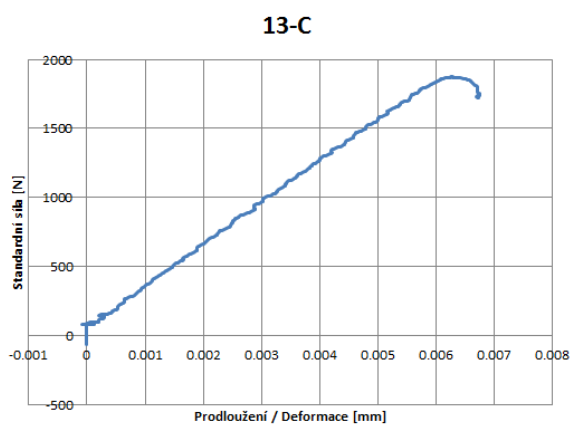
Obrázek 3-71 - Tahový diagram vzorek č.10-C



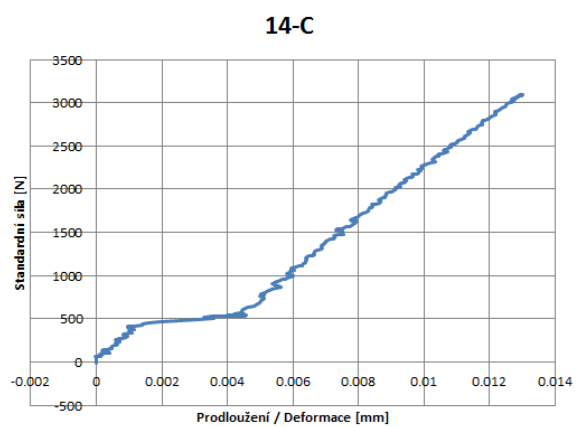
Obrázek 3-72 - Tahový diagram vzorek č.11-A



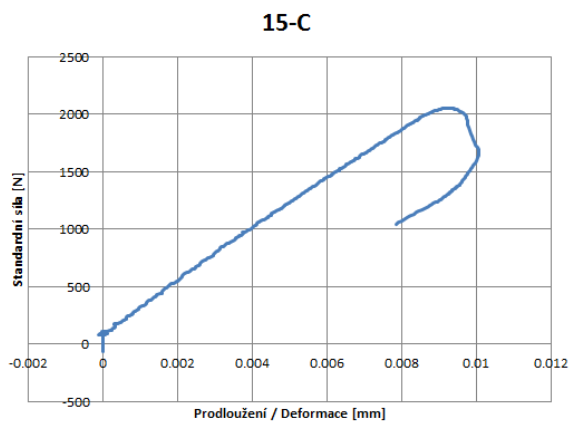
Obrázek 3-73 - Tahový diagram vzorek č.12-A



Obrázek 3-74 - Tahový diagram vzorek č.13-C



Obrázek 3-75 - Tahový diagram vzorek č.14-C



Obrázek 3-76 - Tahový diagram vzorek č.15-C

### 3.3.3.3 Vyhodnocení tahové zkoušky

V tabulce 3-12 jsou vypsány výsledné hodnoty tahové zkoušky všech vzorků.

Tabulka 3-12 - Výsledné hodnoty tahové zkoušky

Číslo experimentu	$F_m$ [N]			$\Delta L_g$ [mm]			$\Delta L_u$ [mm]		
	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C
1	315.8	3265.3			0.015			0.015	
2	970.1	177.1	400.6	0.009	0.001	0.002	0.009	0.001	0.002
3	1191.4	2262.1	2852.7	0.006	0.010	0.014	0.006	0.012	0.014
4	385.8	1964.7	1697.7	0.002	0.010	0.009	0.002	0.017	0.010
5	3041.1	825.3	1503.5	0.022	0.006	0.009	0.022	0.006	0.009
6	2099.7	954.0	1376.7	0.007	0.003	0.006	0.010	0.003	0.010
7	547.5	1550.1	2116.9	0.003	0.006	0.009	0.003	0.006	0.009
8	1020.7	1473.2	3021.7	0.004	0.005	0.013	0.037	0.005	0.013
9	1868.6	2566.9	2629.4	0.009	0.011	0.012	0.010	0.012	0.012
10	979.8	2225.0	2015.3	0.006	0.011	0.010	0.008	0.011	0.010
11	2569.2	4694.8	1742.9	0.012	0.014	0.011	0.014	0.014	0.019
12	2025.5	886.6	3095.0	0.009	0.005	0.011	0.012	0.005	0.011
13	2966.6	2408.0	1873.0	0.011	0.008	0.006	0.011	0.008	0.007
14	2686.2	933.3	3094.0	0.009	0.007	0.013	0.009	0.007	0.013
15	2129.8	3310.8	2051.3	0.009	0.014	0.009	0.020	0.015	0.010

$\Delta L_g$  je prodloužení při maximálním zatížení.

$\Delta L_u$  je rozdíl výsledné a počáteční měřené délky vzorku:  $\Delta L_u = L_u - L_0$

Vynechané hodnoty chybí z důvodu neúspěšné tahové zkoušky (vzorek praskl při upnutí) nebo zmíněného znehodnocení vzorku při pokusu upravit závit.

Z výsledných tahových diagramů je patrné, že většina vzorků byla v místě porušení tak křehká, že se v průběhu zatěžování vůbec nedostala do oblasti plastické deformace. Lze to vypočítat z tvaru křivky diagramu, která lineárně stoupá a v místě maximálního napětí obvykle vzorky praskají.

Všechny křivky grafů jsou určitým způsobem ‘‘zubaté‘‘, což je dáno tím, jak jednotlivé stěny PK praskaly postupně.

Vzhledem k tomu, že hodnoty prodloužení vzorků se pohybují v řádech setin milimetrů a všechny vzorky shodně praskly v propojení dolní objemové části s PK, je zřejmé, že tahové diagramy vůbec neukazují mechanické vlastnosti zkoumaných děrovaných částí PK, ale pouze vlastnosti propojení objemové části vzorků a PK. Tuto skutečnost dokazují i úplně nahodilé výsledné hodnoty maximálních sil a tedy i napětí, které vůbec neodpovídají zvoleným plochám PK a děrování.

Tento výsledek je poměrně překvapivý vzhledem k tomu, že očekávané kritické místo (předpokládané místo lomu), tedy nejmenší průřez vzorku, je u některých vzorků v oblasti děrování téměř třetinový oproti místu lomu.

O tom se lze přesvědčit v tabulce 3-13 kde jsou doloženy průřezy v místě lomů, nejmenší průřezy vzorků a hodnoty mezi pevností a tažností dle vztahů uvedených v kapitole 3.3.1 (ostatní směrodatné hodnoty např. mez kluzu bohužel z diagramů s tímto průběhem odečíst nelze).

Tabulka 3-13 - Dopočtené hodnoty tahové zkoušky

Číslo experimentu	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$S_{min}$ [mm <sup>2</sup> ]	rozdíl ploch [%]	$R_m$ [MPa]			A [%]		
				Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C
1	36.98	36.98	100.0	8.5	88.3	0.0	0.00	0.15	0.00
2	36.98	25.67	69.4	26.2	4.8	10.8	0.09	0.01	0.02
3	36.98	25.67	69.4	32.2	61.2	77.2	0.06	0.12	0.14
4	36.98	25.67	69.4	10.4	53.1	45.9	0.02	0.17	0.10
5	36.98	15.00	40.6	82.2	22.3	40.7	0.22	0.06	0.09
6	42.36	42.36	100.0	49.6	22.5	32.5	0.10	0.03	0.10
7	42.36	29.24	69.0	12.9	36.6	50.0	0.03	0.06	0.09
8	42.36	29.24	69.0	24.1	34.8	71.3	0.37	0.05	0.13
9	42.36	29.24	69.0	44.1	60.6	62.1	0.10	0.12	0.12
10	42.36	17.42	41.1	23.1	52.5	47.6	0.08	0.11	0.10
11	49.67	49.67	100.0	51.7	94.5	35.1	0.14	0.14	0.19
12	49.67	33.75	67.9	40.8	17.8	62.3	0.12	0.05	0.11
13	49.67	33.75	67.9	59.7	48.5	37.7	0.11	0.08	0.07
14	49.67	33.75	67.9	54.1	18.8	62.3	0.09	0.07	0.13
15	49.67	18.44	37.1	42.9	66.6	41.3	0.20	0.15	0.10

$S_0$  je počáteční průřez v místě lomu.

$S_{min}$  je minimální průřez PK.

Jak již bylo řečeno výsledné hodnoty napětí (mez pevnosti) ani prodloužení nereflektují děrování PK. V případě, že by tomu tak bylo, by musely neděrované vzorky č. 1, č. 6 a č. 11 vykazovat největší hodnoty napětí a nejmenší hodnoty prodloužení. Pokud by se nejslabší místo nacházelo dle očekávání v místě nejmenšího průřezu, dostal by se průběh tahového diagramu pravděpodobně až do oblasti plastické deformace, kde by již děrování hrálo zásadní roli.

Nejslabší místo všech vzorků se tedy reálně nachází v propojení dolní objemové části s PK. A to i přes to, že např. u vzorků č. 15 dosahuje nejmenší průřez vzorku v děrování 37,1 % průřezu místa lomu.

Důvodem tohoto jevu jsou především rozdílné parametry tisku pro objemovou část a PK jak již bylo řečeno v kapitole 3.2.1.3.

Spodní napojení PK je teoreticky slabší než horní z důvodu, že nižší parametry laseru (zejména výkon) se zde snaží provařit do objemu materiálu. Nižší parametry tisku zde proto nenataví materiál tak dobře a nedojde k dostatečnému propojení PK s objemem.

Oproti tomu při připojování horního objemu k PK naopak laser o vysokých parametrech provařuje první vrstvy objemu do tenkých stěn PK. Větší výkon tedy snadno nataví PK a dojde k lepšímu propojení. Samozřejmě za předpokladu, že se do tohoto místa PK dostaví bez deformací (což je ale v případě pravítka s kartáčkem pravděpodobné).

Tento úkaz přímo odpovídá výsledkům tahové zkoušky.

Výsledky tahové zkoušky se na první pohled zdají nepoužitelné, ale z praktického hlediska výzkumu PK je tento výsledek vlastně příznivý. Celkové zhodnocení bude provedeno v následující kapitole.

## 4 Zhodnocení výsledků a stanovení doporučení podpůrných konstrukcí

Výsledky tahových zkoušek vytištěných vzorků v předchozí kapitole bohužel nepomohly objasnit chování vytipovaných děrovaných částí PK. Avšak byla díky nim zjištěna jiná z pohledu návrhu PK zcela zásadní věc. A to, že při zachování všech dosud používaných a praxí ověřených nastavení parametrů tisku se i při významném zmenšení průřezu PK děrováním nejslabší místo nachází mimo tuto strukturu v místě propojení mezi součástí a PK. Tento fakt bude v praxi ještě umocněn použitím připojovacích zubů (hatching teeth).

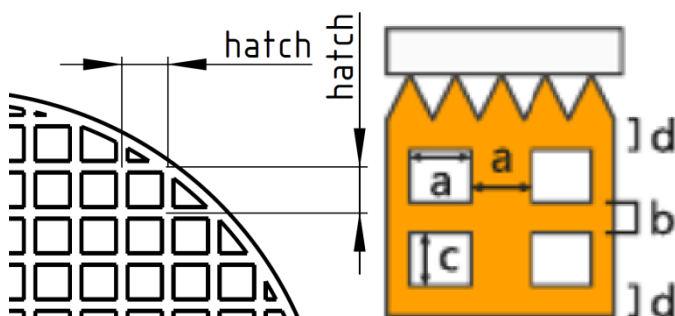
Skutečnost, že se všechny vzorky s děrovanými PK vytipovaných parametrů bez problému vytiskly (při správném nastavení procesu tisku) a tedy PK splnily svoji hlavní funkci podpory horní objemové části a přítomnost děr nemá vliv na celkovou pevnost PK, je lze tedy v praxi začít využívat jako náhradu celistvých PK a získat tím všechny výhody plynoucí z jejich použití, což jsou především: zkrácení času tisku, ušetření prášku pro tisk PK a možnost vyndání nevyužitého prášku uvnitř PK (např. pomocí vibračního přístroje), který je doposud znehodnocován.

Doporučení parametrů děrování může vyjít z výpočtů MKP analýzy v kapitole 3.1.

Výsledky tahové zkoušky ukazují, že i vzorky s největší plochou děrování (které byly do pokusu přidány pouze pro informaci, zda jsou schopny se vůbec dotisknout) mají větší pevnost než zjištěné místo lomu. Jako doporučenou konfiguraci děrování bude však vhodnější zvolit vybranou nejlepší variantu z MKP analýzy, která má sice poloviční plochu děrování, ale její hodnoty napětí a tuhosti v tahu jsou téměř srovnatelné s celistvou PK typu Block, která má být nahrazena viz kapitola 3.1.4.3.

**Výsledné doporučené nastavení pro nově navrženou PK pro všechny typy podporovaných ploch je následující:**

PK typu Block, parametry hatche (rozteč stěn) dle zkušeností operátora v závislosti na podporované ploše (jako tomu bylo doposud) a parametry děrování (perforations): obdélníková díra (rectangular),  $a = \text{hatch}/4$  ;  $b = (\text{hatch} - c)$  ;  $c = \text{hatch}/2$  ;  $d = 1$  [mm] viz. obrázek níže.



Obrázek 4-1 - Parametry PK pro 3D tisk



## 5 Závěr

Práce se věnuje návrhu nové podpůrné konstrukce pro 3D tisk kovových součástí technologií Direct metal laser sintering.

Teoretická část je zaměřena na rozbor současného stavu v oblasti této technologie. Především na získávání informací o postupu procesu tisku, používaných materiálech, nutnosti použití podpůrných konstrukcí a pravidlech jejich návrhu. Dále byly zkoumány druhy a možnosti nastavení doposud používaných podpůrných konstrukcí a to zejména v softwaru Materialise Magics, který je pro tento účel nejčastěji využíván.

První etapa praktické části práce se věnovala přípravě 3D CAD modelů všech doposud běžně užívaných (a některých nově navržených) typů podpůrných struktur a jejich následný výpočet MKP analýzou na tahové zatížení, které je z důvodu teplotní roztažnosti podporovaných částí nejběžnější. Z výsledků této analýzy se ukázal jako nejlepší typ podpůrné konstrukce doposud nejčastěji užívaný typ Block, což potvrdilo zkušenosti z praxe. Další vývoj této práce se zabýval modifikací této struktury. Konkrétně využití děrování stěn této konstrukce, což má výhody zejména ve zkrácení času tisku, ušetření materiálu na tisk podpor a ušetření materiálu uvnitř podpor, který je doposud znehodnocován. Pro tento účel byly opět vytvořeny 3D CAD modely s různými kombinacemi děrování a spočteny na tahové zatížení MKP analýzou.

Druhá etapa praktické části práce se věnuje přípravě vzorků pro 3D tisk vytvořených na základě poznatků z MKP analýzy. Tyto vzorky byly následně vytištěny a podrobeny tahové zkoušce. Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo zjištění, že děrování podpůrné konstrukce nemá vliv na pevnost celé struktury, protože všechny vzorky byly shodně porušeny na přechodu podpůrné konstrukce a objemové části a očekávané vlastnosti děrování se vůbec neprojevily. A to i přes to, že nejmenší průřez v děrování dosahoval u některých vzorků 37,1 % průřezu v místě lomu. Toto zjištění vede k závěru, že je děrované konstrukce možné používat. Doporučení parametrů děrování bylo stanoveno na základě výsledků MKP analýzy.

Tato nově navržená modifikace podpůrné konstrukce je použitelná pro všechny typy podporovaných ploch a lze ji ihned začít používat v praxi jako náhradu dosud nejběžněji využívaných podpor.

## Seznam použité literatury

- [1] *3D Printing Support Structures: A Complete Guide* [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://amfg.ai/>
- [2] *Aditivní výroba (3D tisk)* [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <http://www.parker.cz/>
- [3] JIANG, Jingchao, Xun XU a Jonathan STRINGER. *Support Structures for Additive Manufacturing: A Review* [online]. 2018-09 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [4] DMLS Prototypes. *THE CASTING COMPANY, INC.* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://thecastingcompanyinc.com/>
- [5] DOLINSEK, Slavko. *Investigation of direct metal laser sintering process* [online]. 2004-01 [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [6] LONGHITANO, G., M. LAROSA, A. JARDINI a C. ZAVAGLIA. *Surface Finishes for Ti-6Al-4V Alloy Produced by Direct Metal Laser Sintering* [online]. 2015-08 [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [7] VERMA, Anoop, Satish TYAGI a Kai YANG. *Modeling and optimization of direct metal laser sintering process* [online]. 2014-08 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [8] *An Introduction to Designing for Metal 3D Printing* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.solidworks.com/>
- [9] DANA, Milan, Ivana ZETKOVÁ a Pavel HANZL. *NEED FOR SUPPORT STRUCTURES DEPENDING ON OVERHANG SIZE* [online]. 2016-12 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/en>
- [10] MUMTAZ, K., P. VORA a N. HOPKINSON. *A Method to Eliminate Anchors/Supports from Directly Laser Melted Metal Powder Bed Processes* [online]. 2011-08 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [11] POYRAZ, O., E. YASA a A. ORGANHUL. *Investigation of Support Structures for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Of In625 Parts* [online]. 2015-08 [cit. 2019-01-19]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [12] Materialise Magics. *Materialise / 3D Printing Innovators* [online]. [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/>
- [13] EOS Electro Optical Systems: Industrial 3D Printing [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en>
- [14] SHIGLEY, E Joseph, MISCHKE, R. Charles a BUDYNAS, G. Richard, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil HARTL, Martin. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

[15] BIAN, Linkan, ed., SHAMSAEI, Nima, ed. a USHER, John, ed. *Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization and control of mechanical properties*. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis Group, 2018. ISBN 978-1-4987-3998-6.

[16] CHUA, CHee Kai a LEONG, Kah Fai. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. The 4th edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-41-8.

[17] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014.

[18] ZwickRoell Materials Testing [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/en>