ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DISERTAČNÍ PRÁCE

Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem

Autor: **Ing. Ivana Zetková**

Školitel: **doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

Garance a vedení disertační práce

Vedoucí katedry:	doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.	ZČU, FST-KTO
Školitel:	doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.	ZČU, FST-KTO
Školitel specialista	Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.	ZČU, FST-KTO

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem

vypracovala samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne: 18. 4. 2017 . . . . . .
podpis autora

Poděkování za pomoc při řešení disertační práce

Poděkování patří mému školiteli doc. Ing. Jiřímu Česánkovi, Ph.D. za podnětné připomínky k práci a za jeho vstřícný přístup. Dále děkuji školiteli specialistovi Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za podnětné připomínky a cenné rady při zpracovávání práce. V neposlední řadě patří moje poděkování mým kolegům z Regionálního technologického institutu při Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni za provedená měření a odborné konzultace. Především ale děkuji svému manželovi a celé své rodině za podporu a trpělivost.

ANOTACE

Tato práce se věnuje výzkumu v oblasti aditivních technologií metodou DMLS (přímé spékání kovových materiálů) konkrétně materiálu W-Nr. 1.2709. Stěžejní část práce je zaměřena na výzkum prášků pro 3D tisk. Jedná se o oblast hodnocení kvalitativních parametrů jako je velikost a tvar zrna a rozložení velikosti částic v určeném objemu. Výsledky tohoto bádání přináší celou řadu zajímavých závěrů, které jsou nezřídka v rozporu s údaji od výrobce. Na základě výsledků byla zpracována interní metodika hodnocení rozložení velikosti zrn v určeném objemu pro prášky vyráběné metodou gas atomization, VIM gas atomization, rotating electrode proces a plasma atomization.

Další stěžejní částí práce je ověřování vlivu použitého prášku na mechanické vlastností při statické zkoušce tahem. I zde bylo provedeno komplexní hodnocení, které v tomto rozsahu nelze v odborné literatuře dohledat. Závěry této experimentální části mimo jiné uvádí i vliv rozložení velikosti zrn v zásobníku stroje na kvalitu tisku, konkrétně v dopadu na mechanické vlastnosti a na strukturu tištěného materiálu.

V rámci prohlubování znalostí v této problematice přináší práce například také srovnání mechanických vlastností tištěného a konvenčně vyráběného materiálu.

Znalosti a dovednosti získané výzkumem a experimentálním ověřováním prověřuje praktická část práce, v níž se řeší konkrétní případová studie.

Klíčová slova: 3D tisk kovů, kovové prášky, velikost zrna, mechanické vlastnosti, Wr.-N 1.2709

ANNOTATION

This thesis deal with research in the area of additive technology by using of the method DMLS (Direct Metal Laser Sintering) during the sintering of material W-Nr. 1.2709. The main aim of this thesis is focused on the research of powders for 3D print. This means evaluation of qualitative parameters, concretely size and shape of the particles and evaluation of the distribution of the particle size in specific volume. The conclusions brings a lot of interesting points, which are often different than specifics the producer. The internal methodology for evaluation of the particle size in specific volume was develop on the base of thesis conclusion for the methods gas atomization, VIM gas atomization, rotating electrode process a plasma atomization.

Next main point is the research of mechanical properties in dependence on print direction, powder quality and size of the experimental samples. Evaluation of mechanical properties with respect of these parameters was made. Any professional literature does not provide complexly conclusions about it.

The thesis also describe and compare mechanical properties of the material which is produced by 3D print an conventional way too. This is important for a deepening of the knowledge in this issue. The knowledge and skills, which was acquired by the research and the experimental verification, are verified in the practical part, which solves a specific case study.

Key words: 3D metal print, metal powder, size of particles, mechanical properties, Wr.-N 1.2709

Obsah

Obsah 5
Seznam obrázků, tabulek, zkratek a symbolů 7
Seznam obrázků 7
Seznam tabulek 10
Seznam zkratek, symbolů a značek veličin 11
1 Úvod 13
1.1 Aktuálnost tématu a jeho význam 13
1.2 Cíle disertační práce 18
2 Současný stav v oblasti 3D tisku kovů 19
2.1 Materiál pro 3D tisk kovových součástí 20
2.1.1 Technologie výroby prášků pro aditivní výrobu 21
2.1.1.1 Výroba metodou Gas atomization [21],[22], [74] 22
2.1.1.2 Vacuum induction melter gas atomization (VIM gas atomization) 23
2.1.1.3 Electrode induction melting gas atomisation (EIGA) 23
2.1.1.4 Plasma atomization 23
2.1.1.5 Metoda hydride-hydride (HDH) [22] 24
2.1.1.6 Morfologie částic podle použité technologie 24
2.2 Postup výroby 26
2.3 Omezující parametry 3D tisku. 30
2.3.1 Orientace součásti 31
2.3.2 Tloušťka vrstvy 33
2.3.3 Podpůrné struktury 34
2.3.4 Parametry tisku 38
2.3.5 Pnutí 40
3 Výzkum technologických vlastností 3D tisku 42
3.1 Vstupní materiál – prášky 44
3.1.1 Hodnocení tvaru a struktury prášku MS1 45
3.1.2 Hodnocení velikosti prášku MS1 52
3.1.2.1 Hodnocení rozložení velikosti zrn prášku v transportním barelu 52
3.1.2.2 Hodnocení rozložení velikosti zrn prášku v zásobníku 56
3.1.2.3 Sumarizace výsledků hodnocení rozložení velikosti prášku 58
3.1.3 Interní metodika hodnocení distribučního rozložení velikosti prášku 60
3.1.3.1 Odběr vzorků 60
3.1.3.2 Příprava, scanování a měření vzorků 60
3.1.3.3 Hodnocení distribučního rozložení 61
3.1.3.4 Práce s výsledky měření 63
3.1.3.5 Použití interní metodiky 63
3.1.4 Proces spékání jednotlivých vrstev prášku 64
3.1.5 Struktura a mikrostruktura materiálu po tisku 66
3.2 Výzkum mechanických vlastností aditivně vyráběné oceli ..... Wr. N 1.2709 a jejich porovnání s konvenčně vyráběnou 70
3.2.1 Zjišťování mechanických vlastností tištěné oceli ze statické zkoušky tahem 70
3.2.2 Výsledky statické zkoušky tahem pro vzorky po rozpouštěcím žíhání a po tisku 71
3.2.2.1 Fáze 1 – Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 10 mm [86] 71

3.2.2.2 Fáze 2 Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 4 mm ... 74
3.2.2.3 Fáze 3 – Zkouška tahem pro ploché vzorky o průřezu 1,5 x 1 mm ... 77
3.2.2.4 Sumarizace výsledků zkoušky tahem pro vzorky po rozpouštěcím žíhání a po tisku ... 79
3.2.3 Výsledky statické zkoušky tahem pro vytvrzené vzorky ... 81
3.2.3.1 Fáze 1 – Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 10 mm ... 81
3.2.3.2 Fáze 2 – Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 4 mm ... 82
3.2.3.3 Fáze 3 – Zkouška tahem pro ploché vzorky průřezu 1,5 x 1 mm ... 83
3.2.3.4 Sumarizace výsledků zkoušky tahem pro vytvrzené vzorky ... 84
3.2.4 Fraktografie zatěžovaných těles ... 84
3.2.4.1 Fraktografie žíhaných vzorků ... 84
3.2.4.2 Analýza vlivu rozložení prášku v zásobníku na mikrostrukturu ... 87
3.2.4.3 Fraktografie vytvrzených vzorků ... 90
3.2.4.4 Měření mikrotvrdosti a RTG analýza ... 92
3.2.4.5 Sumarizace výsledků fraktografie zkušebních těles ... 93
3.2.5 Závěr výzkumu mechanických vlastností při zkoušce tahem ... 94
4 Ověření všeobecných zásad a pravidel 3D tisku ... 96
4.1 Výchozí stav ... 96
4.2 Výroba 3D tiskem kovů ... 98
4.2.1 Sumarizace výsledků ... 103
4.3 Úprava V2 pro reálný tisk ... 104
4.3.1 Sumarizace varianty V3 ... 113
4.3.2 Postprocesing dílů ... 114
4.4 Úprava – V4 ... 115
4.4.1 Sumarizace výsledků ... 117
4.5 Závěr praktického ověření ... 121
5 Závěr ... 122
6 Směr budoucího výzkumu ... 125
Použitá literatura ... 126
Seznam příloh ... 131

Seznam obrázků, tabulek, zkratek a symbolů

Seznam obrázků

Obr.1 Vstřikovací tryska raketového pohonu [26], [29] 13
Obr.2 Proudové motory vyrobené aditivní technologií [30], [31] 14
Obr.3 Lopatka vyrobená technologií SLM [32] 14
Obr.4 Vodní pumpa pro sportovní auto vyrobené pomocí SLM (vlevo [33]); odlehčená zkušební verze ventilu pro spalovací motor (vpravo) [34] 15
Obr.5 Porovnání systému chlazení konvenční vs. konformní [37] 15
Obr.6 Oprava formy technologií DLMS [38] 16
Obr.7 Vrtáky s vnitřním chlazením vyrobené aditivní technologií [39] 16
Obr.8 Příklady využití AM v medicíně [40], [41], [42] 16
Obr.9 Poloautomatická pistole M1911 vyrobená technologií DMLS [44], [47] 17
Obr.10 Horské kolo vyrobené AM s rámem ze slitiny titanu [45] 17
Obr.11 Příklady možností 3D v umění [46], [47], [48], [49], [50] 17
Obr.12 Schéma principu výroby metodou DMLS [72] 19
Obr.13 Nádoby pro transport prášků [11] 21
Obr.14 Schéma výroby prášků metodou Gas atomization [21] 22
Obr.15 Schéma indukčního tavení a následného rozprášení kovu – technologie EIGA [75] 23
Obr.16 Schéma výroby prášků metodou Plasma atomization [75] 23
Obr.17 Ukázka SEM snímků typických tvarů částic Ti-6Al-4V prášku pro různé technologie výroby - a) HDH proces; b) rozprašování plynem; c) rozprašování plazmou; d) rozprašování rotující elektrodou [22] 24
Obr.18 Vliv rychlosti ochlazování a použitého rozprašovacího média na velikost a mikrostrukturu prášku Al 86 Ni 6 Y 4,5 CO 2 La 1,5 [77] 25
Obr.19 Tvrdost a mez kluzu materiálů pro aditivní technologii vyrobených různými způsoby [76] 25
Obr.20 Vstupem pro finální díl je model ve formátu .stl 26
Obr.21 Schématický popis aditivní výroby 27
Obr.22 Nekvalitní (vlevo), kvalitní (vpravo) .stl model pro 3D tisk [8] 27
Obr.23 Funkce podpor [11] 27
Obr.24 Příklady vhodného a nevhodného umístění součásti na stavěcí platformu[24] 28
Obr.25 Schématické znázornění možnosti zásahu operátora do nastavování parametrů tisku [11] 29
Obr.26 (a) vzorek; (b) orientace součásti [17] 32
Obr.27 Vliv orientace vzorku na velikost smrštění [17] 32
Obr.28 Součást se zhoršenou drsností – viditelný schodišťový efekt 33
Obr.29 Vliv směru klesání (stoupání) problematické plochy na výsledný tvar a rozměry součásti [17] 33
Obr.30 a) Vliv tloušťky vrstvy na povrch součásti [18]; b) schodišťový efekt na reálné součásti 34
Obr.31 Příčný výbrus Inconelu 718 slinovaného při teplotě 1260°C a tl. vrstev – a)100µm; b)125µm; c)150µm; d)200µm 34
Obr.32 Příklady nutnosti použití podpůrných struktur [11] 35
Obr.33 Detail vytištěných převisů [77] 35
Obr.34 Otvory zhotovené 3D tiskem bez použití podpůrných struktur [78] 36
Obr.35 Základní typy podpor [24] 36
Obr.36 Ukázka obecných parametrů nastavení podpor [11] 36
Obr.37 Nástin možností ovlivnění podpor typu Block [11], [79] 37
Obr.38 Pokročilé typy podpor [80] 38
Obr.39 Parametry ovlivňující proces tisku [25] 39
Obr.40 Laserový paprsek a oblast ovlivnění [24] 39
Obr.41 Schématická ukázka vlivu pozice spékané součásti na platformě na velikost spékané oblasti [24] 40
Obr.42 Ukázka možností volby strategie tisku [24] 40
Obr.43 Ukázka trhlin na součásti způsobených vnitřním pnutím 41
Obr.44 Zvednutí dílu způsobené vlivem pnutí 41
Obr.45 Zařízení EOS M290 Laboratoře experimentálního obrábění 42
Obr.46 Proces vytvrzení dle doporučení výrobce 43
Obr.47 Rozpouštěcí žíhání dle doporučení výrobce 44

Obr.48 Informace o rozložení velikosti prášků ze školicích podkladů výrobce [81] 45
Obr.49 Scan prášku oceli MS1 46
Obr.50 Ukázka tvarů zrn z hlediska tvaru vyskytující se v dodaném prášku MS1; a) kulový tvar, propojení větší a menší částice, b) několik vzájemně prorostlých částic, c) v popředí odlupující se vrstva, v pozadí protáhlý tvar zrna, d) nepravidelný tvar zrna 47
Obr.51 Detailní pohled na zrníčka prášku MS1 47
Obr.52 Metalografie zrn prášku MS1 48
Obr.53 SEM dendritické struktury zrna prášku s vměstkem vysokého podílu Fe a Ti (bez Co) 48
Obr.54 Recyklovaný prášek MS1 49
Obr.55 Zbylý prášek MS1 na sítě 50
Obr.56 Zrnko prášku bez dendritické struktury sloní kůže (okolní zrna mají zmíněnou dendritickou strukturu) 50
Obr.57 Metalografický výbrus zrna s hladkou povrchovou vrstvou 51
Obr.58 Prášek od jiného výrobce zařízení 51
Obr.59 Transportní barel s označením hladin odběru 52
Obr.60 Vlevo – hladina 1; uprostřed – hladina 2; vpravo – hladina 3 53
Obr.61 Rozložení velikosti zrn v transportním barelu 54
Obr.62 Distribuční funkce Weibullova rozdělení pro jednotlivé hladiny a pro jejich průměr vygenerované programovacím jazykem SW Matlab 55
Obr.63 Rozložení velikosti zrn v transportním barelu 56
Obr.64 Distribuční funkce Weibullova rozdělení pro jednotlivé hladiny a pro jejich průměr vygenerované programovacím jazykem SW Matlab 58
Obr.65 Idealizovaná velikost zrnitosti prášku – a) prášek ze dvou hrubostí zrn; b) menší hrubost zrn, c) větší hrubost zrn [3,62] 58
Obr.66 Weibullova distribuční funkce celkově pro zásobník a pro transportní barel 59
Obr.67 Stub → stub polepený oboustrannou lepicí páskou → stub vložený do stolku mikroskopu 60
Obr.68 Vlevo – snímek ze světelného mikroskopu, vpravo – snímek z elektronového řádkovacího mikroskopu 61
Obr.69 Příklad zobrazení kumulativní distribuční funkce (PRAVDA) a funkce hustoty pravděpodobnosti (NEPRAVDA) Weibullova rozdělení 63
Obr.70 Vývoj ustálení procesu tisku při spékání MS1 defaultními parametry MS1_040_110_performanceM291 65
Obr.71 Ukázka nastavení funkce Dosing factor 65
Obr.72 Kulovité částice vznikající při procesu spékání – vlevo – scan ze SEM; vpravo - zachyceno vysokorychlostní kamerou 66
Obr.73 Porovnání mikrostruktury tištěné martenzitické oceli v příčném a podélném směru [63] 66
Obr.74 Feriticko-perlitická struktura vzorku 3 67
Obr.75 Vlevo – velmi jemné bílé částice uvnitř buněk a na jejich rozhraní; vpravo – Šipka ukazuje na růst buněčné hraniční fáze do sousedního prostoru [63]. 67
Obr.76 Nespečená částice [69] 68
Obr.77 EBSD - elektrolyticky leštěný povrch 69
Obr.78 Schématické znázornění značení vzorků v závislosti na jejich orientaci 71
Obr.79 Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro žíhané D10 73
Obr.80 Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro žíhané D4 75
Obr.81 Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro D4 po tisku 77
Obr.82 Závislost síla – poměrné prodloužení včetně dokumentace vývoje plastické deformace 79
Obr.83 Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro D4 83
Obr.84 Vlevo - Makro lomové plochy, SEM – velké množství jamek pravidelného tvaru; vpravo - Detail lomové plochy – kavita na lomové ploše s členitým dnem (vzorek 6) 85
Obr.85 Vlevo - Makro lomové plochy, SEM; vpravo - Detail lomové plochy (vzorek 15) 85
Obr.86 Vlevo - Makro lomové plochy, SEM; vpravo - Detail řádku jamek na přechodu středové a okrajové části lomové plochy (vzorek 19) 85
Obr.87 Chemie lomové plochy 86
Obr.88 Feritická buněčná struktura s velmi jemnými částicemi 86
Obr.89 Tvárný lom s výraznou morfologií konvenčně vyráběného vzorku 3 (T_16_1.2709_1) 87
Obr.90 Chemie lomové plochy konvenčně vyráběného vzorku 3 87
Obr.91 Feriticko-perlitická struktura vzorku 3 87

Obr.92 Podélný řez vzorků; šipky označují analyzované oblasti 88
Obr.93 Okrajová oblast vzorků – vlevo – kratší část s větším množstvím nečistot; vpravo – delší část výrazně lepší čistota 88
Obr.94 Odlišný tvar stopy na okraji (označeno šipkou) – vlevo – celkový pohled; vpravo – detaill 89
Obr.95 Buněčná struktura delší části s hrubšími útvary a její chemické složení 89
Obr.96 Mikrostruktura kratší části 90
Obr.97 Průběh tvrdosti obou částí vzorků v závislosti na poloze vtisku 90
Obr.98 Vlevo – makrolomové plochy, SEM; vpravo – detail lomové plochy – sekundární trhlina – vzorek 12 (T_16_45_X_2) 91
Obr.99 Detailní oblasti lomu – vzorek 10 (T_16_0_X_3) 91
Obr.100 Buněčná feritická mikrosturktura, oxidy titanu a železa – Chemické složení oblasti: Fe (48 %) – C (23 %) – Ni (17 %) – Co (7,4 %) – Mo (3,3 %) 91
Obr.101 Vtisky po měření tvrdosti matrice 93
Obr.102 Model zadaného dílu původně vyráběného z plastu 97
Obr.103 Namontovaný plastový kryt (vlevo); plastový kryt deformovaný v průběhu provozu (vpravo) 97
Obr.104 Ukázka popraskání dílu po smontování – materiál polykarbonát - technologie výroby FDM 98
Obr.105 Sestava tištěná metodou SLS 99
Obr.106 Navržený spoj „puzzle“ 99
Obr.107 Pohled na spodní část většího dílu sestavy – původní (vlevo), upravený (vpravo) 100
Obr.108 Původní (vlevo) a upravený (vpravo) díl v řezu 100
Obr.109 Podpůrné konstrukce dílu A varianty V1 a V2 101
Obr.110 Úprava dílu ve spojení s menším dílem 101
Obr.111 Podpůrné konstrukce dílu B, varianty V1 a V2 101
Obr.112 Úprava dílu C 102
Obr.113 Ukázka vzniku trhlin při nevčasném tepelném zpracování 103
Obr.114 Možnosti polohování součásti A pro reálný tisk – vlevo V3_a; vpravo V3_b 104
Obr.115 Nejčastější problémy ploch modelu .stl 105
Obr.116 Ukázka vlivu změny intervalu rozřezání .stl modelu na spékání vrstev 106
Obr.117 Vlevo – SW návrh ploch pro podepření dílu; vpravo – SW vygenerované podpory 106
Obr.118 Řešení podepření spoje „puzzle“ 107
Obr.119 Ukázka původního řešení otvorů pro mazací kanálky a jejich optimalizace (vpravo nahoře) 108
Obr.120 Ukázka navržení podpor SW Magics (vlevo) a jejich úprava dle zkušeností operátora (vpravo) 108
Obr.121 Ukázka stěžejních podpor dílu A typu Block a jejich parametrů pro V2 a V3_a 109
Obr.122 Ukázka úpravy navržených podpěrných struktur a jejich destrukce 110
Obr.123 SW navržené podpory vybrání pro hlavy šroubů a reálný stav po tisku bez podpor 110
Obr.124 Náhled podpor typu Cone pro A-V3_a 110
Obr.125 Díl A ustavený na platformu v SW EOS Print (vlevo); pří procesu spékání (uprostřed); po vytištění (vpravo) 111
Obr.126 Vlevo – SW návrh ploch pro podepření dílu; vpravo – SW vygenerované podpory 111
Obr.127 Návrh ploch pro podepření dílu B 112
Obr.128 Vlevo – SW návrh ploch pro podepření dílu; vpravo – SW vygenerované podpory 112
Obr.129 Ukázka úpravy dílů V3 oproti SW navržené V2 113
Obr.130 Tisk součástí B, C1 a C2 pro variantu úpravy V3 113
Obr.131 Finální sestava dle V3 115
Obr.132 Rozdělení dílu A na tři části – A1, A2, A3 115
Obr.133 Úprava dílu A1 – V4 116
Obr.134 Úprava dílu A2 a A3 – V4 116
Obr.135 Úprava dílu B – V4 117
Obr.136 Úprava dílu C1 – V4 117
Obr.137 Ustavení dílů na platformy - vlevo díly A1, A2, A3; vpravo díly B, C1 a C2 119
Obr.138 Vytištěné součásti A - V4 119
Obr.139 Vytištěné součásti B, C - V4 120
Obr.140 Vpravo – pravidlo umisťování dílů na platformu; vlevo – tisk dílů B a C – viditelné odletující částice 120
Obr.141 Vytištěné díly po montáži a otestování mazacích kanálků 120

Seznam tabulek

Tab.1 Materiály používané v AM 20
Tab.2 Ochranná atmosféra pro prášky používané pro tisk na zařízeních od fy EOS GmbH [11] 21
Tab.3 Chemické složení tištěné a konvenčně vyráběné oceli W-Nr. 1.2709 42
Tab.4 Mechanické vlastnosti oceli 1.2709 44
Tab.5 Souhrn výsledků mikrotvrdosti a průměrných velikostí zrn 53
Tab.6 Rozložení velikosti zrn v transportním barelu 53
Tab.7 Rozložení velikosti prášku v zásobníku 57
Tab.8 Rozloženi velikosti prášku sumárně v barelu a v zásobníku 59
Tab.9 Vývoj ustálení procesu tisku 64
Tab.10 Skutečné chemické složení testovaných materiálů 70
Tab.11 Výsledky zkoušky tahem pro žíhané vzorky D10 ve vztahu k tabulkovým hodnotám 72
Tab.12 Výsledky zkoušky tahem pro žíhané vzorky D4 ve vztahu k tabulkovým hodnotám 74
Tab.13 Výsledky zkoušky tahem tištěných vzorků D4 ve vztahu k tabulkovým hodnotám 76
Tab.14 Výsledky zkoušky tahem vzorků u průřezu 1,5 x 1 mm po rozpouštěcím žíhání 77
Tab.15 Výsledky zkoušky tahem vzorků u průřezu 1,5 x 1 mm po tisku 78
Tab.16 Sumarizace výsledků zkoušky tahem vytvrzených vzorků D10 81
Tab.17 Sumarizace výsledků zkoušky tahem vytvrzených vzorků D4 82
Tab.18 Výsledky zkoušky tahem vzorků u průřezu 1,5 x 1 mm po vytvrzení 83
Tab.19 Tvrdosti hodnocených vzorků v oblasti pod lomem, pod závitem a v bílé fázi 92
Tab.20 Sumarizace výsledků V1 vs. V2 103
Tab.21 Sumarizace výsledků V3 vs. V2 a V1 114
Tab.22 Sumarizace výsledků V4 vs. V3, V2 a V1 118
Tab.23 Porovnání reálných a SW údajů o hmotnosti sestavy V4 121

Seznam zkratek, symbolů a značek veličin

Zkratka	Význam zkratky	Jednotky
3D	Three dimension – tří rozměrný (obraz)	
Al	Hliník	
AM	Additive manufacturing - aditivní výroba	
BCC mřížka	Prostorově středěná krystalová mřížka	
C	Uhlík	
CAD	Computer-aided design - počítačem podporované projektování	
Co	Kobalt	
CO_2	Oxid uhličitý	
Cr	Chrom	
Cu	Měď	
ČSN	České normy	
DIN	Deutsches Institut für Normung - Německý ústav pro průmyslovou normalizaci	
DMLS	Direct Metal Selective Laser Melting - přímé kovové laserové spékání	
E	Yangův modul	[GPa]
EBM	Electron Beam Melting - spékání svazkam elektronů	
EBSD	Electron Backscatter Diffraction Analysis - analýza difrakce zpětného toku elektronů	
EIGA	Electrode induction melting gas atomisation - indukční tavení a následné rozprášení	
EOS	Electro Optical Systems	
F	Síla	[N]
FCC mřížka	Plošně středěná krystalová mřížka	
FDF	Fused filament fabrication - výroba metodou natavování nití	
FDM	Fused deposition modeling - výroba metodou natavování nití	
Fe	Železo	
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung - společnost s ručením omezeným	
H_2	Dvou atomová molekula vodíku	
HDH	hydride-hydride	
HRC	Tvrdost dle Rockwella	
HV	Tvrdost dle Vickerse	
ISO	International standard organization - Mezinárodní organizace pro normalizaci	
Kap.	Kapitola	
konst.	Konstantní / Konstanta	
LENS	Laser Engineered Net Shaping - spékání pomocí laseru	
Mn	Mangan	
Mo	Molybden	
např.	Například	
NASA	National Aeronautics and Space Administration - Národní úřad pro letectví a kosmonautiku	
Ni	Nikl	
NTC	Nové technologie - výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni	

Obr.	Obrázek	
P	Fosfor	
PC	Osobní počítač	
popř.	Popřípadě	
QDT	Quality Diamond Tools	
S	Síra	
Si	Křemík	
SLM	Selective Laser Melting - selektivní spékání laserem	
SLS	Selective Laser Sintering - selektivní spékání laserem	
STL	STereoLithography	
SW	Software	
Tab.	Tabulka	
Ti	Titan	
Tzn.	To znamená	
Tzv.	Takzvaně	
V	Vanad	
VIM	Vacuum induction melter – vakuové indukční tavení	
vs.	Versus	
W	Wolfram	
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni	

1 Úvod

Současnost je označována jako počátek IV. průmyslové revoluce. Je vyvíjen velký tlak na propojování jednotlivých výrobních zařízení do podoby chytrých továren (tzv. Průmysl 4.0), které budou schopny pružně reagovat nejen na neustále se měnící poptávku, ale také na různé nepředvídatelné události či poruchy. Nástup těchto továren nové generace je – či teprve bude – umožněn především rozvojem tzv. Internetu věcí, distribuovaných on-line služeb (Cloud Computing) a vývojem mnoha dalších moderních technologií jako je autonomní robotika, umělá inteligence, inteligentní materiály, 3D tisk či virtuální realita [1].

3D tisk kovových součástí je relativně novou, ale velmi intenzivně používanou technologií. Lze o ní hovořit jako o revoluční, neboť otevřela nové možnosti výroby v mnoha oblastech a posunula finální výrobek na zcela jinou úroveň. Tento způsob výroby, který byl prvotně pod názvem Rapid Prototyping používán především při výrobě rychlých prototypů, je dnes označován termínem Additive Manufacturing (dále jen AM) a lze ho najít v kusové, malosériové, ale i hromadné výrobě [2].

Konstruktéři a designeři z různých odvětví pružně zareagovali na nástup této technologie a uchopili možnost vytvářet součásti „neomezených“ možností. I díky tomu se obory využívající tuto technologii posouvají mílovými kroky kupředu. Mezi nesporné výhody AM kromě tvarové rozmanitosti výrobků patří rychlost výroby bez nutnosti skladování polotovarů, nástrojů na výrobu, přípravků, likvidace technologických kapalin a třísek. Odpadá zde přeupínání obrobků, lze vyrábět více kusů najednou s minimálním odpadem – výrobci udávají 2–4%.

Jako všechny technologie i 3D tisk má svá úskalí a omezení, např. přesnost tisku, postprocesing (technologie vedoucí k úpravě povrchu a přesnosti), potřeba podpůrných struktur, smrštění součásti, vznik vnitřního pnutí a další. Některá z těchto omezení se dají eliminovat ve fázi přípravy tisku, kapitola 2.

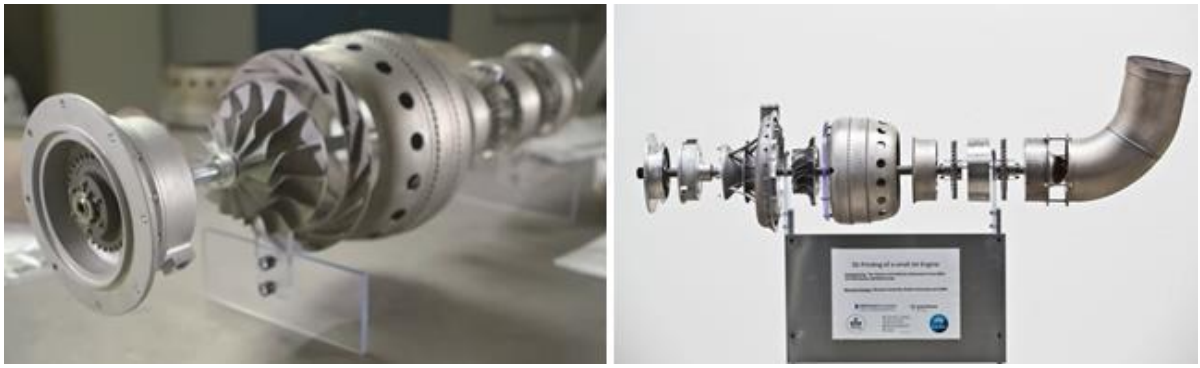
Aditivní technologie jsou právě díky své krátké historii (cca 25 let) jen velmi málo zmapované z hlediska finálních vlastností výrobku a nejsou pro ně v současné době vytvořeny jednotné normy a postupy tak, jako je tomu u konvenčních způsobů výroby. To na jednu stranu vytváří prostor pro výzkum nových poznatků, ale na druhou stranu nelze zajistit pro jedno konkrétní zadání tiskové úlohy jednotný postup s přesně definovaným výstupem.

1.1 Aktuálnost tématu a jeho význam

Aditivní výroba kovových součástí má uplatnění v mnoha oblastech, od vesmírného programu až po umění a zdravotní průmysl. Příkladem efektivního nasazení technologie AM **ve vesmírném programu** je vstřikovací tryska raketového pohonu výzkumného programu NASA, viz Obr.1. Při dosažení vyšší účinnosti došlo ke snížení hmotnosti, nákladů a výrobních časů.

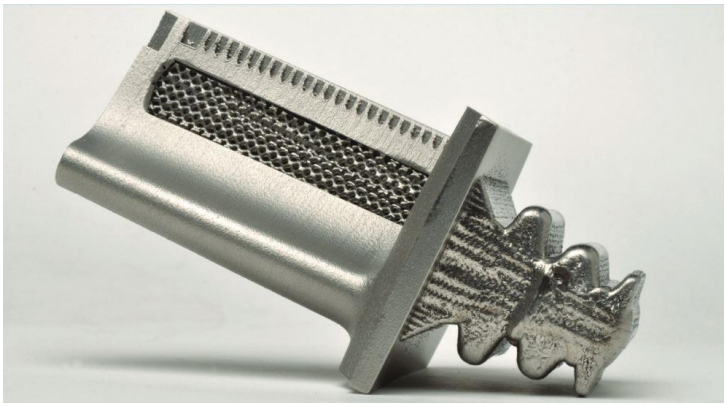
Obr.1 *Vstřikovací tryska raketového pohonu [26], [29]*

Inženýři z Monash University v Melbourne v Austrálii pomocí 3D tisku postavili 2 proudové motory, ovšem není známo, zda byly motory zažehnuty, tedy otestovány z hlediska funkčnosti.



Obr.2 *Proudové motory vyrobené aditivní technologií [30], [31]*

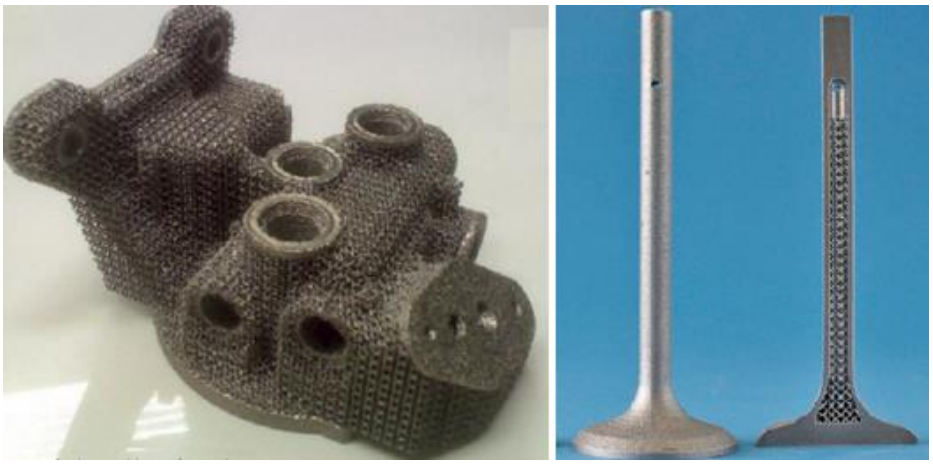
Příklad úspěšného nasazení AM je možné najít i **v energetice**. Společnost Fraunhofer-Innovations-cluster se v projektu SimuGen zabývá zvýšením účinnosti lopatek integrací chladících kanálků a nasazením lehkých porézních struktur. Snížením hmotnosti se při zatížení rotoru generátoru vysokými otáčkami dociluje enormního poklesu napětí v materiálu.



Obr.3 *Lopatka vyrobená technologií SLM [32]*

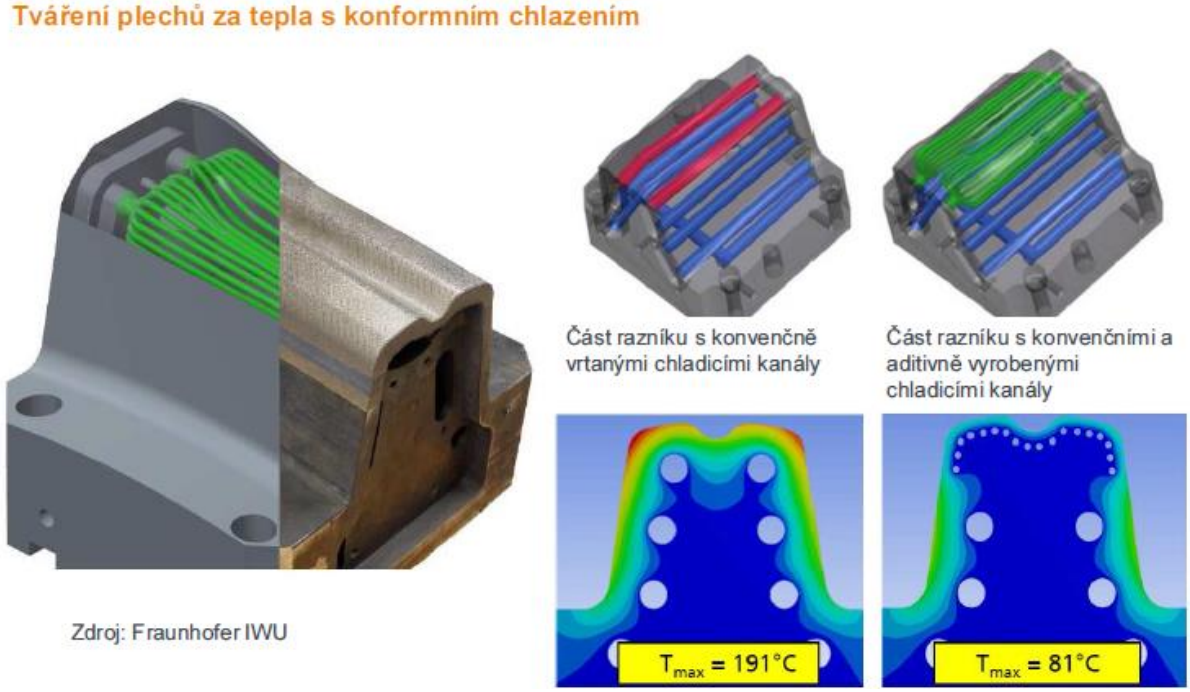
V automobilovém průmyslu lze vhodně zvolené porézní struktury začlenit do prvků pasivní bezpečnosti automobilů tak, že efektivně vyplňují prázdné prostory aut a v případě nehody spotřebují vzniklou hybnou energii na deformaci své buněčné struktury a sníží dopady na posádku automobilu.

Porézní struktura je často využívána pro chlazení, neboť jí může protékat kapalné médium (zvýšení plochy pro přestup tepla), případně může naopak sloužit jako tepelný nebo zvukový izolant.



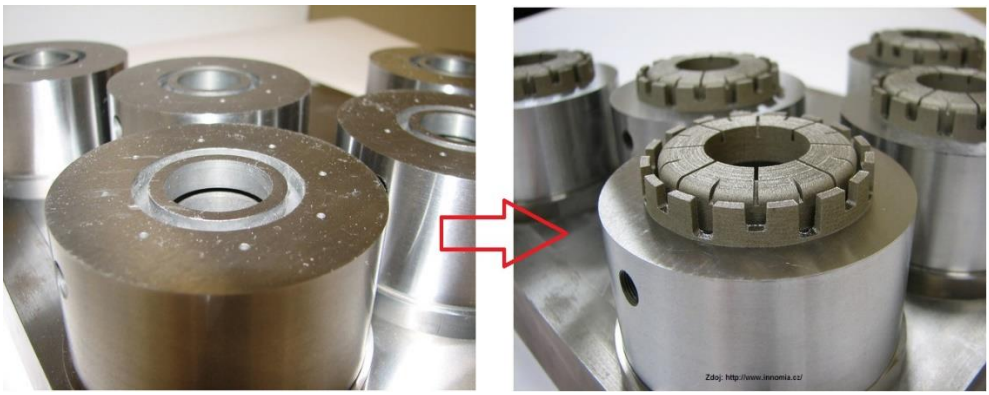
Obr.4 *Vodní pumpa pro sportovní auto vyrobené pomocí SLM (vlevo [33]); odlehčená zkušební verze ventilu pro spalovací motor (vpravo) [34]*

Další aplikací AM je tzv. **konformní chlazení**, které nahrazuje klasické chlazení vyráběné vrtáním a následným zaslepováním otvorů. Konvenčně vyráběné kanály nezajišťují u tvarově složitých forem ideální účinnost chlazení. Výsledkem je tedy kombinace přímých vrtaných kanálů s omezenou možností sledování tvarové zakřivenosti dutiny formy. Konformní chlazení tento problém eliminuje tím, že umožňuje vyrobit chladicí okruh v ideálním tvaru i vzdálenosti od povrchu. Díky tomu je možné chladit místa formy, která jsou nejvíce tepelně namáhaná. Při použití této metody dochází k menším deformacím výlisku, zkrácení výrobních časů, vyšší rozměrové přesnosti a zvýšení životnosti nástroje [35], [36].



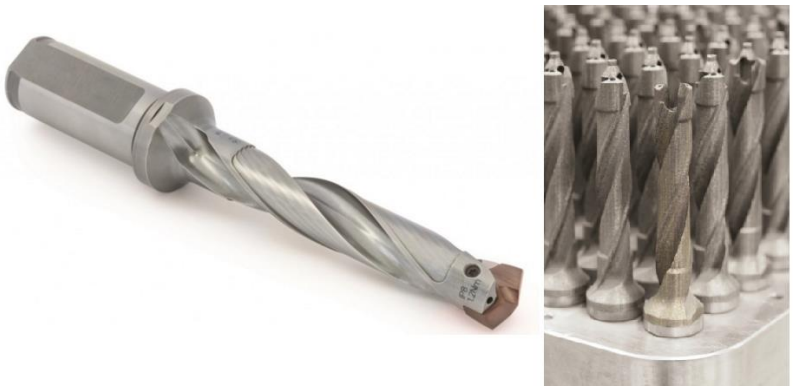
Obr.5 *Porovnání systému chlazení konveční vs. konformní [37]*

Technologie 3D tisku je vhodná nejen při výrobě nových dílů, ale i pro **repasy forem**. Oprava poškozené formy se provádí opětovným přidáním chybějícího materiálu. To do současné doby bylo nejen časově, ale i finančně náročné. V minulosti se případná oprava prováděla navařováním chybějícího materiálu, následovalo frézování, broušení a ruční leštění. Opravy tímto způsobem byly vhodné pouze pro malá poškození. Využitím technologie 3D tisku v této oblasti dochází k časovým i finančním úsporám [38].



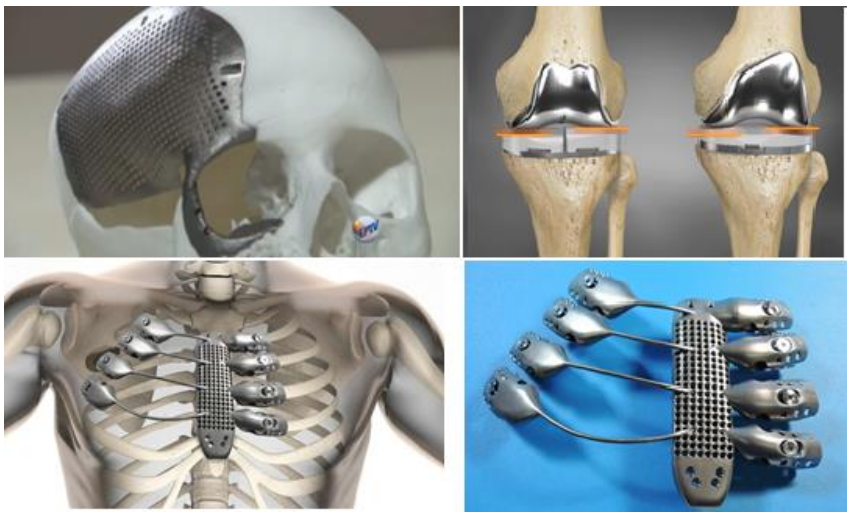
Obr.6 *Oprava formy technologií DLMS [38]*

Aplikace technologie 3D tisku **v nástrojářském průmyslu** je ukázkou jejího využití v sériové výrobě. Příkladem je sériová výroba tělesa vrtáku QTD s vyměnitelnou špičkou o průměru 13 mm s vnitřním chlazením. Toto zcela inovativní řešení posouvá aplikaci řezných nástrojů na dimenzionálně jinou úroveň.



Obr.7 *Vrtáky s vnitřním chlazením vyrobené aditivní technologií [39]*

Díky 3D tisku se otvírají **ve zdravotnictví** nové možnosti léčby pacientů, neboť každému pacientovi může být vyroben implantát na míru.



Obr.8 *Příklady využití AM v medicíně [40], [41], [42]*

Aditivní výroba má rovněž potenciál **ve zbrojním průmyslu**, mohla by být revoluční při výrobě nukleárních zbraní. Při vývoji zbraní se tato technologie využívá především pro výrobu určitých částí, ale je možné vytisknout celou plně funkční pistoli. Příkladem úspěšné a funkční výroby zbraní je tisk legendární poloautomatické pistole M1911, na níž bylo

demonstrováno, že vytištěné díly bez problémů odolají rázům při střelbě. Z pistole vyrobené z více než 30 dílů z nerezové oceli a slitiny Inconelu se úspěšně vypálilo 50 přesných střel na vzdálenost 27 m.

Obr.9 *Poloautomatická pistole M1911 vyrobená technologií DMLS [44], [47]*

Technologie 3D tisku nachází uplatnění i **v oblasti sportu**. Společnost Empire Cycles ve spolupráci s firmou Renishaw (jeden z předních výrobců zařízení pro AM) vytvořila během 17 týdnů horské kolo ze slitiny Ti, které bylo navrženo jako puzzle tak, aby se jednotlivé části mohly vyrobit v komoře výrobního systému AM250 o velikosti 250 x 250 x 300 mm. V konečné podobě se podařilo vytvořit lehčí a pevnější rám.

Obr.10 *Horské kolo vyrobené AM s rámem ze slitiny titanu [45]*

Další oblastí, v níž 3D tisk prosperuje, je **umění**. Díky možnostem aditivní výroby je dnes možné realizovat velmi kreativní návrhy. Několik příkladů je uvedeno na následujících obrázcích.

Obr.11 *Příklady možností 3D v umění [46], [47], [48], [49], [50]*

1.2 Cíle disertační práce

Aditivní výroba je relativně novou technologií, pro kterou zatím nebyly vytvořeny normy ani metodické postupy, které by jednoznačně definovaly vlastnosti vytištěné součásti v závislosti na nastavení procesu tisku. Výrobce deklaruje při použití defaultních (výrobcem přednastavených) parametrů pouze několik základních údajů o fyzikálně-mechanických vlastnostech vytištěného dílu v závislosti na tepelném zpracování a na směru tisku. Je tedy nezbytné v první fázi používání této technologie provést výzkum v několika stěžejních oblastech. Konkrétně v oblasti vstupního materiálu pro tisk a v oblasti mechanických vlastností při použití výrobcem přednastavených parametrů tisku. Dále je stěžejní provést porovnání materiálových a mechanických vlastností tištěného materiálu, označovaného dle mezinárodně uznávaných norem, a ekvivalentního konvenčně vyráběného materiálu. Z toho plynou následující cíle práce.

Stěžejním cílem této práce je **provést výzkum vstupního materiálu z hlediska jeho tvaru a rozložení velikosti částic** v rámci vybraného objemu. Kvalita prášku má významný vliv na konečné mechanické vlastnosti vytištěného výrobku. V současné odborné literatuře je však částečně popisován pouze tvar jednotlivých částic prášku, ale tato problematika není řešena komplexně v návaznosti na finální výrobek. O homogenitě či nehomogenitě rozložení velikosti se doposud nikde nepojednává.

Z prvního výzkumného cíle vyplývá cíl druhý. Úkolem bude na základě získaných výsledků výzkumu vstupního materiálu **vytvořit interní metodický postup pro hodnocení distribučního rozložení velikosti částic v požadovaném objemu**. Tomuto tématu se doposud nevěnuje žádný autor, proto bude vytvořená interní metodika zcela jedinečná a unikátní.

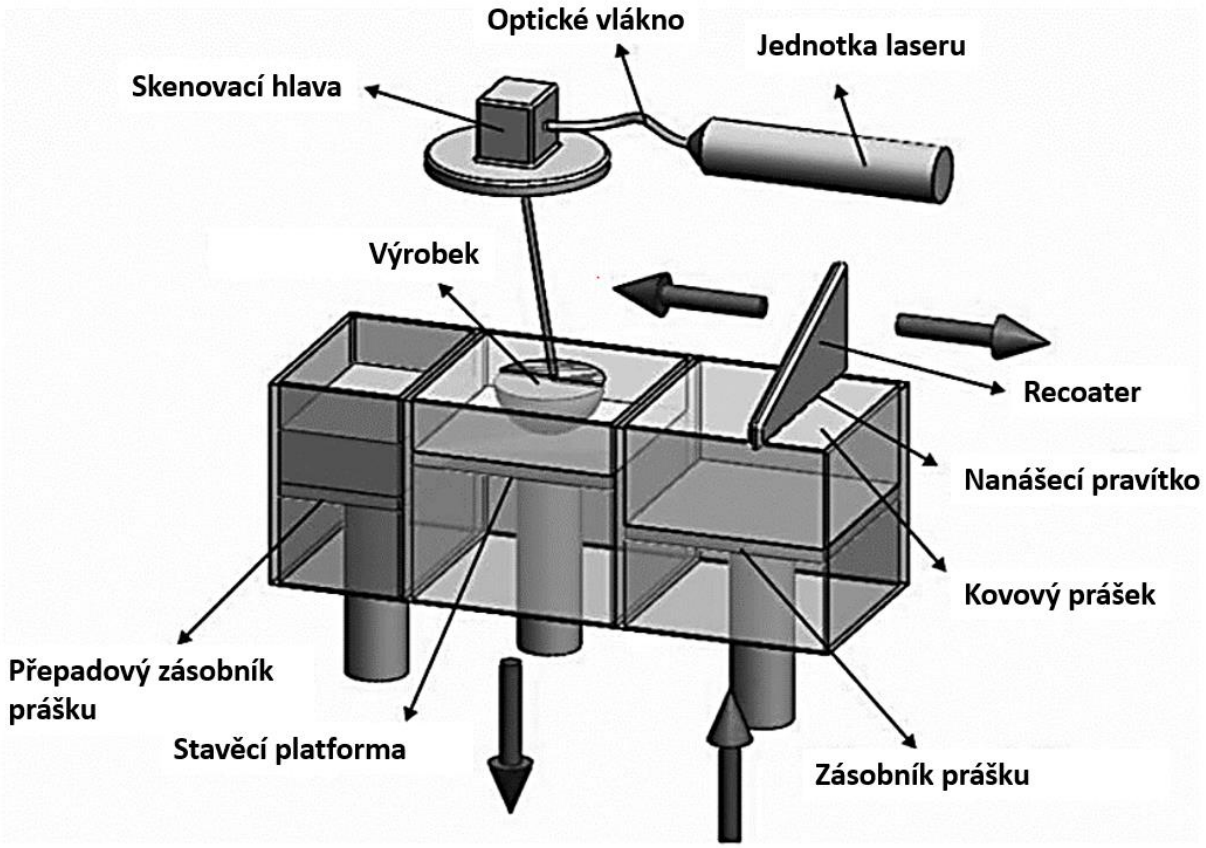
Dalším cílem je **provést experimentální výzkum mechanických a materiálových vlastností tištěného materiálu v závislosti na směru tisku, tepelném zpracování a na velikosti průřezu a ověřit, zda jsou zjištěné vlastnosti shodné s údaji, které deklaruje výrobce.** V rámci tohoto výzkumu bude jedním ze stěžejních bodů **popsat vliv rozložení velikosti prášku v zásobníku na kvalitu vytištěného vzorku**. Dílčím úkolem je **porovnat aditivně vyrobený materiál s konvenčně vyráběným materiálem**. Autoři vědeckých publikací se věnují pouze sledování mechanických vlastností tištěných vzorků v závislosti na směru tisku, případně ve srovnání s konvenčním materiálem, ale nikde není proveden soubor komplexního hodnocení v závislosti na směru tisku, velikosti průřezu vzorků, tepelném zpracování a kvalitě vstupního prášku.

Posledním cílem této práce je **na reálné součásti prakticky ověřit všeobecně uznávané zásady a pravidla 3D tisku s ohledem na nové poznatky získané v průběhu experimentálního výzkumu.**

Splnění vytyčených cílů bude mít přínos jak pro akademickou sféru v podobě nových poznatků a interní metodiky, tak i pro praxi ověřením funkčního vzorku, popř. zavedením ověřené technologie do praxe.

2 Současný stav v oblasti 3D tisku kovů

Obecně je aditivní způsob výroby kovových dílů založen na principu nanesení tenké vrstvy kovového prášku (obvykle mezi 20 μm až 100 μm) nanášecím pravítkem – recoterem na stavěcí platformu, viz Obr. 12, na níž je prášek vystaven energetickému paprsku, nejčastěji laserovému, který jej speče do tvaru průřezu výrobku vygenerovaného z příčných řezů CAD modelu vždy pro konkrétní vrstvu. Zbylý kovový prášek zůstává nespečen. Dalším krokem je posunutí platformy o přírůstek tloušťky vrstvy dolů a nanesení nové vrstvy prášku. Tento postup se opakuje až do vystavění a spečení celé součásti. Takto aditivně postavené těleso obklopuje po spečení neexponovaný kovový prášek. Ten se recykluje a použije pro budoucí tisk. Na následujícím obrázku je schematicky znázorněn princip výroby DMLS [4], [5].



Obr.12 *Schéma principu výroby metodou DMLS [72]*

Na trhu je dnes celá řada výrobců zařízení pracujících na principu technologie AM. Mezi firmy s tradicí patří firmy EOS, SLM Solutions, Concept Laser, Renishaw, 3D Systems, Arcam a Laser Engineered Net Shaping (LENS), které stojí za vývojem technologií s označením Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Direct Metal Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM).

2.1 Materiál pro 3D tisk kovových součástí

Jak již bylo zmíněno, výchozím polotovarem pro aditivní výrobu je prášek o velikosti zrna v řádech desítek mikrometrů. Tyto prášky nejsou univerzálně doporučované pro všechna zařízení od různých výrobců. Každý výrobce doporučuje „vlastní“ prášek s vlastním označením. Možnosti výběru materiálů pro tisk kovů jsou poměrně rozmanité a neustále se rozšiřují. Tato široká škála nabízí uživateli značnou možnost výběru vhodného materiálu pro dosažení produktu s požadovanými vlastnostmi. Nejběžnější materiály pro proces laserového spékání jsou uvedeny v Tab. 1. Obchodní názvy materiálů se liší v závislosti na výrobci, proto jsou uvedena i označení dle DIN [76].

Tab.1 Materiály používané v AM

	Materiál	DIN
Hliníkové slitiny	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Kobaltové slitiny	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Nástrojové oceli	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357
Niklové slitiny	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Nerezové oceli	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542
Titanové slitiny	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Drahé kovy	zlato	18 Carat
	stříbro	930 Sterling
Slitiny mědi	CC 480 K	2.1050

Proces tisku probíhá v ochranné atmosféře dusíku nebo argonu v závislosti na použitém prášku a nastavení výrobního zařízení. V Tab. 2 jsou uvedeny ochranné atmosféry pro prášky dodávané firmou EOS GmbH. Jak je z tabulky patrné, pro většinu materiálů

existuje alternativa ochranné atmosféry. Není však standardní atmosféru v rámci jednoho materiálu střídat, neboť použitý ochranný plyn musí být pro daný materiál softwarově nastaven na daném výrobním zařízení. Tiskárny EOS získávají dusík z atmosféry a argon je obvykle přiváděn ze svazku lahví.

Tab.2 Ochranná atmosféra pro prášky používané pro tisk na zařízeních od fy EOS GmbH [11]

Typ kovového prášku	Povolený ochranný plyn	
	Dusík	Argon
DirectMetal 20	X	X
EOS CobaltChrome MP1	X	X
EOS CobaltChrome SP2	X	X
EOS MaragingSteel MS1	X	X
EOS NickelAlloy HX	X	X
EOS NickelAlloy IN625	X	X
EOS NickelAlloy (niklové slitiny) IN718	X	X
EOS StainlessSteel 316L	X	X
EOS StainlessSteel GP1	X	X
EOS StainlessSteel PH1	X	X
EOS Aluminium AlSi10Mg		X
EOS Titanium Ti64		X
EOS Titanium Ti64 ELI		X

2.1.1 Technologie výroby prášků pro aditivní výrobu

Prášky jsou vstupním materiálem pro aditivní technologie. Jejich jakost ovlivňuje mechanické vlastnosti finálního dílu, resp. jeho funkčnost a kvalitativní parametry povrchu.

Prášky jsou od výrobce k uživateli přepravovány v zaplombovaných barelech. Práce s nimi musí probíhat v souladu s bezpečnostními zásadami uvedenými výrobcem pro daný typ materiálu.

Obr.13 *Nádoby pro transport prášků [11]*

Z transportního barelu je prášek dle aktuální potřeby nasypán do zásobníku, ze kterého je v průběhu tisku postupně nanášen v souvislých vrstvách na stavěcí platformu a spékán. Důležité je, aby vrstva byla po nanesení co nejvíce homogenní, protože jakákoliv úroveň nehomogenity může vést k pórovitosti. Homogenitu vrstvy ovlivňuje především kvalita spěchování prášku a rozložení velikosti zrn prášků v zásobníku.

Technologie výroby prášků se volí na základě materiálu prášku a na základě jeho požadované výstupní kvality Mezi nejpoužívanější metody se řadí metody Gas atomization neboli rozprašování plynem, VIM gas atomization (rozprašování plynem ve vakuu), Electrode induction melting gas atomisation, Plasma atomization, Water atomization a metoda Hydride-hydride.

Žádná z výrobních metod nevykazuje 100% výtěžnost. Z vyrobeného prášku se filtrují zrna o nevhodné zrnitosti, proto je nezbytné určit toleranci rozměrů velikosti částic. Obecně je pro proces laserového spékání stanoveno rozmezí 15–45 μm a pro spékání svazkem elektronů 45–106 μm [21].

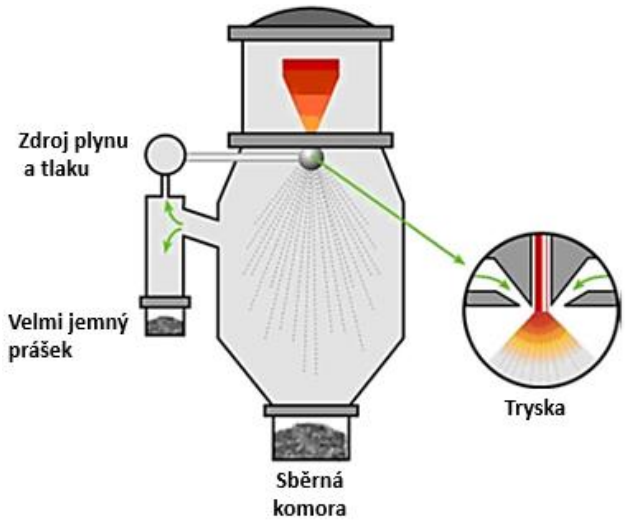
2.1.1.1 Výroba metodou Gas atomization [21],[22], [74]

Tato metoda spočívá v rozprašování proudu roztaveného kovu na malé částice, které po ztuhnutí tvoří částice výrobního prášku, pomocí vysokotlakého inertního proudu plynu (dusík, argon, helium). Schematicky je tato metoda znázorněna na Obr. 14.

Rozprašování plynem je fyzikální metoda, která je podobná metodě rozprašování vodou (water atomization). Prášky vyrobené plynovou atomizací mají kulovitý tvar, výhodný pro zabíhání a vyplňování vzduchových mezer v prášku, zatímco prášky vyrobené atomizací vodou mají nepravidelný tvar.

Tato nejběžněji používaná metoda výroby prášku zajišťuje[21],[22]:

- kulovitý tvar částic prášku
- dobrou hustotou prášku díky kulovitému tvaru a rozdílu velikostí částic (v prášku jsou rozdílné průměry částic, které efektivně vyplňují prostor)
- dobrou opakovatelnost zrnitosti prášku
- možnost výroby široké škály výrobních prášků



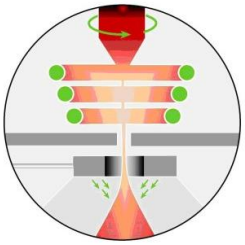
Obr.14 *Schéma výroby prášků metodou Gas atomization [21]*

2.1.1.2 Vacuum induction melter gas atomization (VIM gas atomization)

Tato technologie vychází z metody Gas atomization. Plynem pro rozprašování tekutého kovu je H_2. Hlavním rozdílem je to, že proces probíhá ve vakuu, čímž se zabezpečuje vyšší čistota prášku, která je vyžadována pro výrobu některých materiálů, jako např. pro slitiny Ti a Al, u nichž je nutné zabránit přístupu kyslíku [21], [74].

2.1.1.3 Electrode induction melting gas atomisation (EIGA)

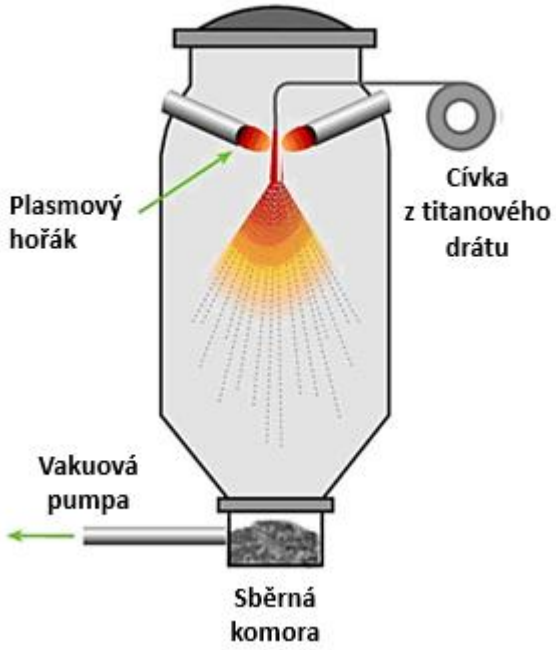
Tam, kde hrozí vysoké riziko kontaminace roztaveného kovu jiným prvkem (například uvolněním prvku z keramických částí pecí), je nasazena technologie EIGA. Rozdíl spočívá v tom, že ingot (polotovar) je indukcí taven přímo nad zařízením plynového rozprašovače, a tím se omezí kontakt tekutého kovu s okolními materiály na minimum [22].



Obr.15 *Schéma indukčního tavení a následného rozprášení kovu – technologie EIGA [75]*

2.1.1.4 Plasma atomization

Rozprašování plazmatem vyniká produkcí vysoce sférických částic. Výchozí materiál pro tento proces může být buď ve formě drátu, nebo ve formě prášku. Tento materiál je přiveden do rozprašovací komory, v níž je současně roztaven a rozprášen plazmovým hořákem.



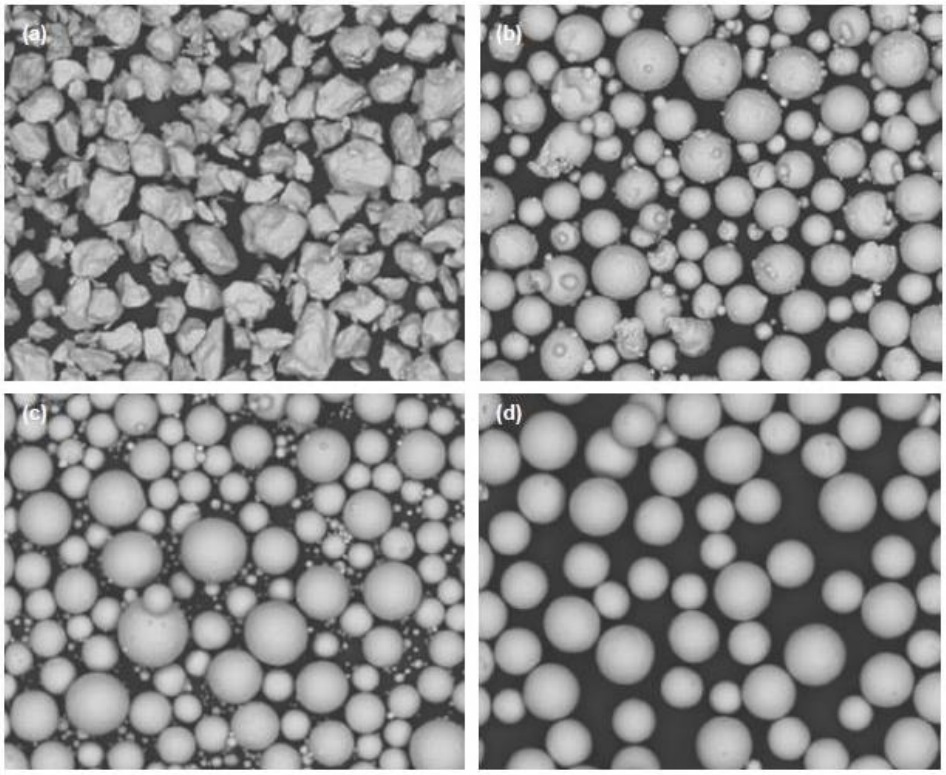
Obr.16 *Schéma výroby prášků metodou Plasma atomization [75]*

2.1.1.5 Metoda hydride-hydride (HDH) [22]

Tato metoda se od předchozí metody liší tím, že výchozí materiál není taven, ale je mechanicky zpracován. To zahrnuje řadu operací jako drcení, frézování a třídění hrudek kovových částic dle velikosti. Tento proces se opírá o křehkost některých kovů. V případě výroby slitin titanu jsou titanové hydridy vytvořeny v hydridové jednotce za pomoci přivedeného vodíku a tepla. Tento křehký materiál je poté drcen a proséván. Prášek se následně vrací do hydridové jednotky, v níž je zbaven přebytečného vodíku. Práškové částice vyrobené za použití HDH jsou typicky velmi nepravidelné. Tyto prášky se buď používají jako výrobní prášky pro aditivní výrobu, nebo slouží jako prášková surovina pro rozprášení plazmatem.

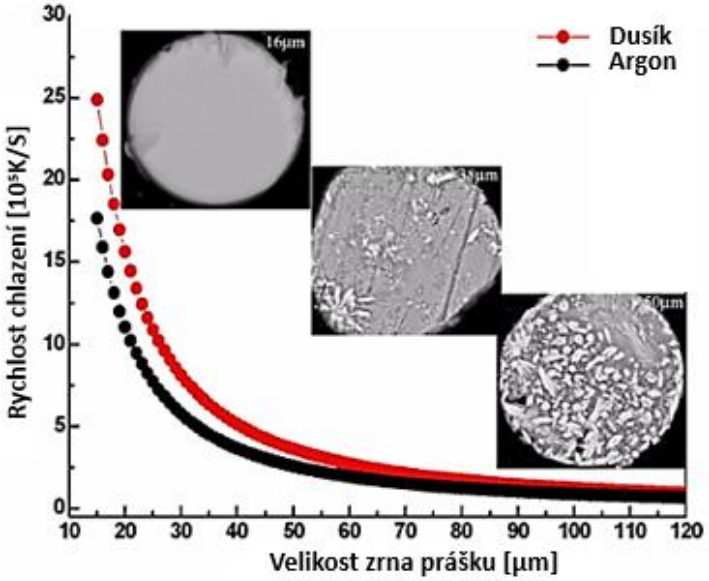
2.1.1.6 Morfologie částic podle použité technologie

Výsledkem výše uvedených metod výroby prášků jsou rozdílné tvary částic, viz Obr. 17.



Obr.17 *Ukázka SEM snímků typických tvarů částic Ti-6Al-4V prášku pro různé technologie výroby - a) HDH proces; b) rozprašování plynem; c) rozprašování plazmou; d) rozprašování rotující elektrodou [22]*

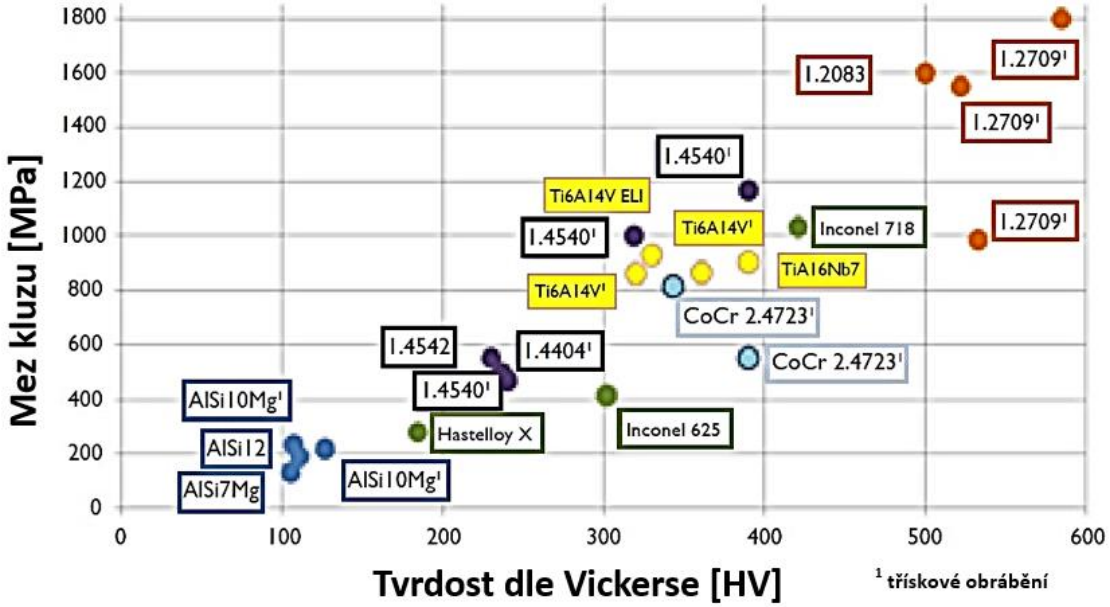
Rychlost ochlazování a plyn použitý pro rozprašování ovlivňuje dle výsledků zdroje [77] průměr vyrobených částic a jejich mikrostrukturu, viz Obr. 18.



Obr.18 *Vliv rychlosti ochlazování a použitého rozprašovacího média na velikost a mikrostrukturu prášku Al 86 Ni 6 Y 4,5 CO 2 La 1,5 [77]*

Zdroj [76] uvádí, že běžně používané prášky pro AM jsou sférického tvaru vyrobené metodou gas atomization s obvyklou velikostí částic 10–50 μm.

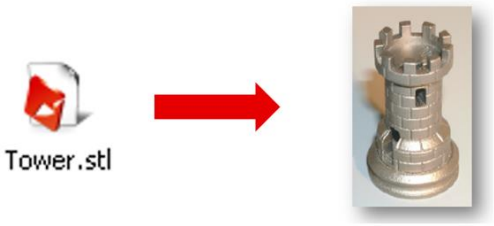
V závislosti na použité výrobní technologii prášků se mohou lišit mechanické vlastnosti pro jeden konkrétní materiál. Níže uvedený obrázek ukazuje hodnoty meze kluzu a tvrdosti pro materiály vyrobené různými technologiemi. Hodnoty meze kluzu byly vzaty z listů výrobce a představují minimální naměřené hodnoty [76].



Obr.19 *Tvrdost a mez kluzu materiálů pro aditivní technologii vyrobených různými způsoby [76]*

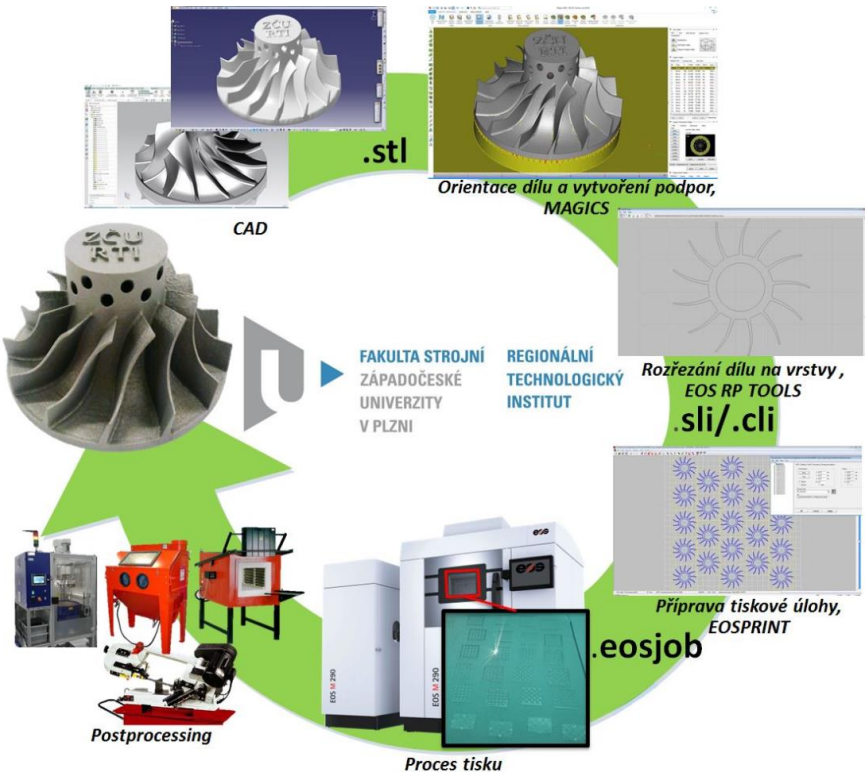
2.2 Postup výroby

Aditivní výroba je často představována jako technologie neomezených možností, při níž pro výrobu požadovaného dílu postačuje pouze model ve formátu .stl. V zásadě nelze toto tvrzení rozporovat, ale je nutné si uvědomit, že mezi zmiňovaným vstupním modelem a hotovým dílem je celá řada operací, které mají dopad na jeho funkčnost a kvalitu.



Obr.20 *Vstupem pro finální díl je model ve formátu .stl*

Aditivní výrobu lze rozdělit do několika kroků, viz Obr. 21, přičemž každý z nich ovlivňuje výslednou kvalitu vytištěné součásti. Vstupem pro 3D tisk jsou, jak již bylo zmíněno, CAD data ve formátu .stl. Tyto modely jsou zorientovány dle charakteru součásti a vypodporovány tak, aby byly tisknutelné – většina tiskáren pro tento krok používá SW Magics. Dále musí dojít k tak zvanému „rozsliceování“ (rozřezání modelu ve směru vrstvení prášku) a k orientaci součásti na stavěcí platformu. Všechny tyto kroky se většinou provádí mimo stroj na externím PC. Následně se data nahrají do zařízení a po přípravě stroje (doplnění prášku, vyrovnání a ustavení platformy, předehřátí platformy dle použitého prášku atd.) je možné spustit tisk. Po ukončení procesu výroby je součást ze stroje vyjmuta, odstraněna z platformy a postprocesingem upravena do finální podoby, tím se rozumí odstranění podpor, pískování, případně leštění nebo doobrobení součásti konvenčním způsobem. Jsou-li všechny tyto kroky provedeny korektně, měla by součást dosahovat kvalitativních parametrů, které udává výrobce zařízení při použití standardních parametrů tiskové úlohy.



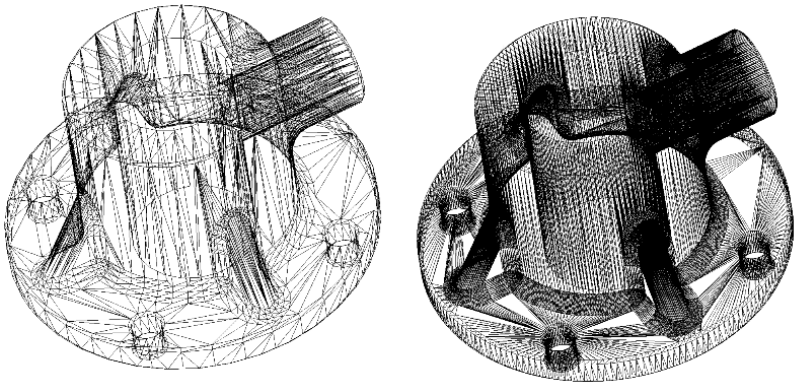
Obr.21 *Schématický popis aditivní výroby*

V následujícím textu jsou podrobněji popsány jednotlivé kroky výroby, vč. jejich vlivu na kvalitu vytištěné součásti [1].

Krok 1: Model ve formátu .stl

STL je zdrojovým formátem pro aditivní výrobu, jehož kvalita významně ovlivňuje výslednou kvalitu vytištěné součásti. Model je obvykle výsledkem CAD softwaru nebo reverzního inženýrství [7, 8].

Nekvalitní model, tzn. „málo trojúhelníků“, popř. chyby v jejich překrývání, znamená nekvalitní povrch tištěné součásti. Některé drobné vady .stl modelu se dají opravit v následujícím kroku, ale je to na úkor času přípravy samotného tisku.



Obr.22 *Nekvalitní (vlevo), kvalitní (vpravo) .stl model pro 3D tisk [8]*

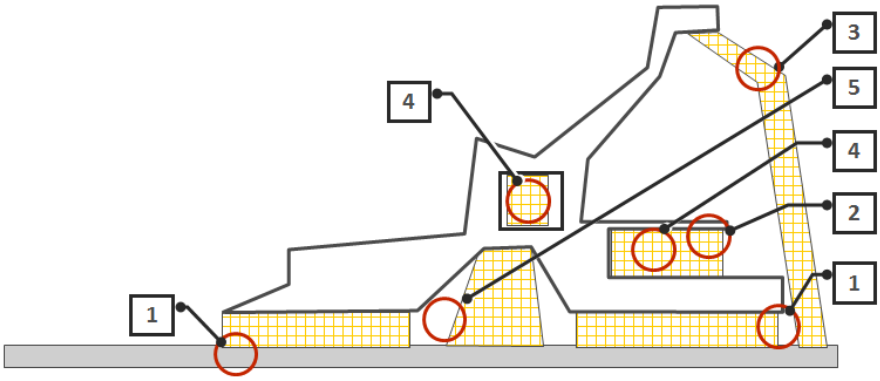
Krok 2: Tvorba podpor a ustavení součásti - .cli

Tímto krokem dochází k určení výrobní polohy součásti. Orientace součásti by měla být volena s ohledem na požadované mechanické vlastnosti finálního dílu, neboť výrobce udává, že jsou ovlivňovány směrem tisku.

Pokud je potřeba součást vyrábět s podporami, objem prášku pro výrobu součásti se zvyšuje, tzn., roste cena a čas potřebný pro výrobu [10].

Obecně musí podpory:

1) zajistit součást proti oddělení od stavební platformy v průběhu procesu výroby
2) umožnit odvod tepla ze součásti
3) podpírat převislé konce
4) být snadno odstranitelné



Obr.23 *Funkce podpor [11]*

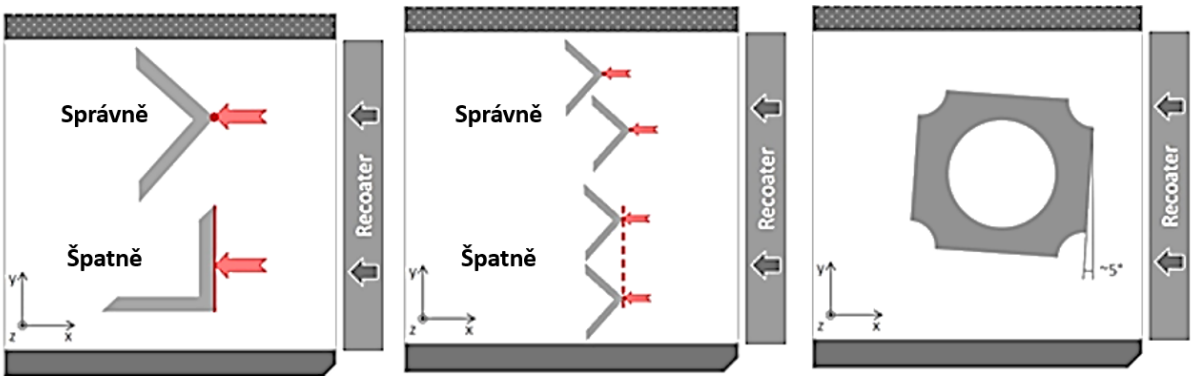
Podpory mají jiné mechanické vlastnosti než samotná součást – jsou spékány jinými parametry. Obecně mají za úkol propojit součást s platformou a podpírat ji v místech, která jsou pro tisk problematická. Jedná se např. o stěny, které svírají se stavěcí platformou úhel menší než 40–45°, převislé konce, díry s osou rovnoběžnou se stavěcí platformou a průměrem větším než 8 mm atd.

Nastavení orientace a vypodporování součásti u většiny výrobních zařízení probíhá v SW Magics. Za pomoci tohoto SW lze odstranit drobné vady modelu. Tuto etapu přípravy dat je možné označit jako poloautomatickou – SW navrhne podpory, které operátor upraví dle doporučení výrobce a vlastních zkušeností. Výstupem tohoto kroku je model definovaný polohou ve formátu .cli.

Krok 3: Rozřezání modelu a umístění na platformu

Zorientovaný model a k němu příslušné podpory musí být rozřezány ve směru výstavby po zvolených intervalech – tyto intervaly nemusí odpovídat tloušťce spékané vrstvy. Tato fáze přípravy tisku probíhá po zvolení intervalu zcela automaticky. „Rozřezané“ modely jsou uloženy ve formátu .sli. Takto připravené díly se umístí na stavěcí platformu s ohledem na dodržení zásad pro minimalizace kolizí mezi díly a nanášecím pravítkem.

Umístění součástí na stavěcí platformu je třeba provádět s ohledem na hlavní pohyb nanášecího pravítka a spolehlivost tisku. Recoater by měl na součásti nabíhat postupně, aby nedocházelo k jeho zvýšenému namáhání, a tím ke zhoršení kvality nanesení vrstvy. **Při tisku více kusů najednou je doporučeno, aby každý díl začínal v jiný okamžik**, protože během výroby může vlivem tepla a vnitřních pnutí v součásti docházet k „přizvednutí“ součásti a v případě, že jsou tato kritická místa v jedné přímce rovnoběžná s pravítkem, dochází v tomto místě často k zastavení tisku. Pokud se ale tato kritická místa rozmístí a nanášecí pravítko je bude překonávat postupně, stává se proces tisku spolehlivějším. Při tisku součástí s rovnými plochami je pak z tohoto důvodu **doporučené natočit díl alespoň o 5°**, to je dle výrobce spolehlivé natočení pro eliminaci kolizí [11].



Obr.24 *Příklady vhodného a nevhodného umístění součásti na stavěcí platformu[24]*

Krok 4: Nastavení parametrů tisku a odeslání do stroje

V tomto kroku dochází k nastavování vlastních parametrů tisku. Výrobci 3D tiskáren mají tento proces rozdělen obvykle na dvě oblasti:

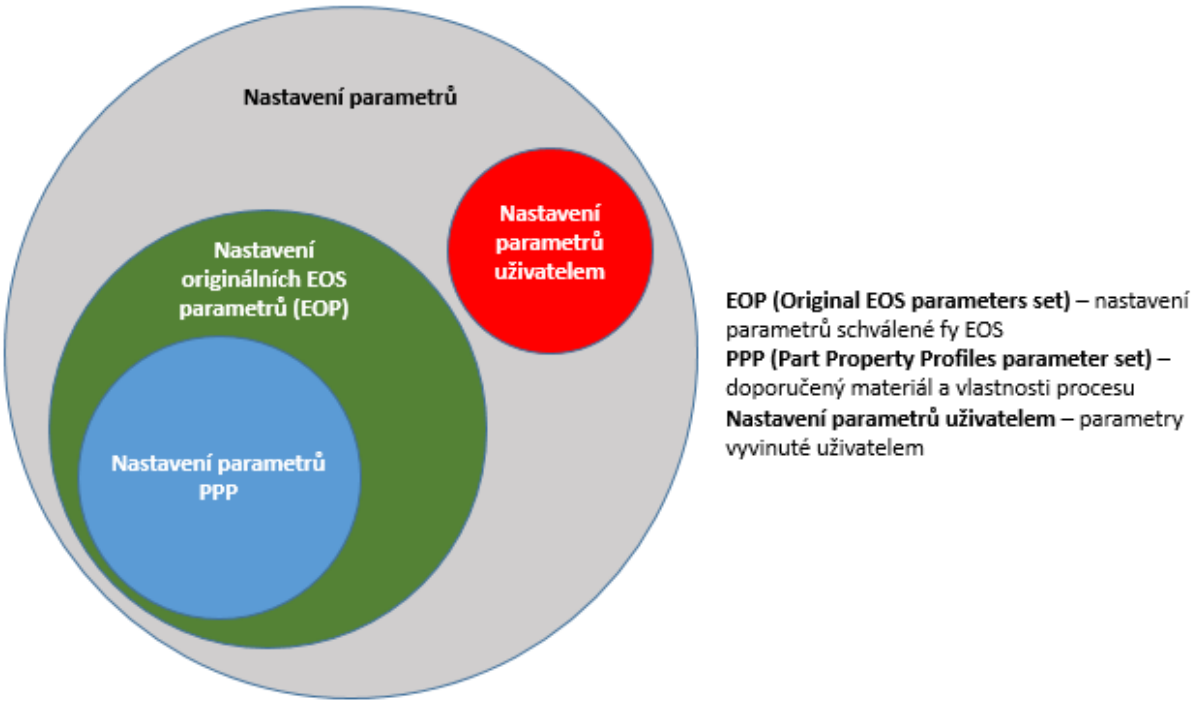
1) tisk dle nastavení parametrů výrobce

Zde je většina parametrů nastavená pevně a tisk lze ovlivňovat jen minimálně, např. změnou tloušťky vrstvy, počtu vrstev, které budou spečeny vícekrát (standardně první

dvě vrstvy), posunutím středu paprsku laseru od skutečné hrany součásti, strategií tisku atd. Kvalitu součásti vytištěnou přednastavenými parametry deklaruje výrobce.

Tyto přednastavené parametry jsou tzv. univerzální, lze jimi tisknout jak plnoobjemové díly, tak i díly tenkostěnné, tím je otevřen prostor pro vytvoření parametrů „na míru“ pro konkrétní součást v otevřeném programování, viz dále.

2) otevřené programování tisku
Zde si uživatel může libovolně nastavovat celou škálu parametrů, jako je např. výkon laseru, scanovací rychlost, strategie tisku atd. tak, aby nejlépe vyhovovaly konkrétní aplikaci. Tento způsob programování vyžaduje vyšší znalosti této technologie. Kvalita tisku může být lepší, než udává výrobce, ale i horší – výrobce za ni neodpovídá. Tento způsob nastavování parametrů je vhodný spíše pro výzkumné organizace.



Obr.25 *Schématické znázornění možnosti zásahu operátora do nastavování parametrů tisku [11]*

Po nastavení součásti na platformu a nastavení parametrů tisku se připravený tisk uloží ve formátu .jz (popř .job) a odešle se do stroje.

Krok 5: Příprava stroje

Příprava stroje má na významný podíl na celkové kvalitě tisku. Stroj by měl být před tiskem řádně vyčištěn (hlavní čištění se provádí po vytištění a vyjmutí součásti ze stroje), v zásobníku musí být připraveno dostatečné množství prášku, který musí být řádně upěchován, aby byl v průběhu tisku nanášen rovnoměrně a v součásti nevznikaly nežádoucí póry. Před spuštěním tisku musí být práškem vyplněny kapsy kolem platformy, na vyrovnané platformě nanesena první vrstva prášku pro spečení a komora naplněna ochrannou atmosférou.

Krok 6: Tisk

Tato hlavní fáze je již zcela automatizovaná a nepotřebuje přítomnost operátora. Operátor však může v průběhu tisku do procesu částečně zasahovat nastavením množství nanášeného prášku, zastavením tisku, zrušením tisku některé za součástí, např. v případě, že se její tisk jeví jako problematický a mohl by poškodit další součásti na platformě. V případě kolize se stroj automaticky zastaví.

Krok 7: Vyjmutí součásti + postprocesing

Po dokončení procesu spékání jsou součásti očištěny od prášku, který je obklopuje, a platforma s tiskem je vyjmuta ze stroje. Prášek, který zůstal ve stroji – v zásobníku použitého prášku, v drážkách a v okolí vytištěných součástí, je vrácen přesíváním zpět do zásobníku. Stroj je pak důkladně vyčištěn vysavačem. Pro práci s práškem platí určité bezpečnostní zásady, neboť prášky a jejich kondenzáty mohou být vznětlivé nebo výbušné.

Po očištění součástí na platformě se postupuje dle velikosti a funkce dílu. V případě velkých součástí se neprodleně po tisku provádí tepelné zpracování pro snížení pnutí, u malých součástí je tato operace na zvážení podle její funkce. Dále dojde k odstranění podpor a odstranění zbylého prášku z případných vnitřních dutin, je-li to možné. Ve většině případů následuje pískování součásti. Vyrobené díly je možné tepelně zpracovat pro zvýšení tvrdosti, leštit, případně obrábět.

2.3 Omezující parametry 3D tisku.

Obecně platí následující rovnice:

Kvalita prášku + stroj + model + operátor = kvalita tisku

Všechny složky na levé straně rovnice ovlivňují kvalitu tisku. Kovový prášek hraje v aditivní výrobě velmi důležitou roli. Jeho kvalita má významný vliv na mechanické vlastnosti vytištěné součásti. Kvalitu před otevřením barelu s práškem deklaruje výrobce, avšak poté je již věcí provozovatele zařízení, jak bude s materiálem nakládat a udržovat ho v požadované kvalitě. Samozřejmostí by mělo být jeho přesívání a důkladné čištění stroje, a to obzvláště pečlivě, jsou-li prášky na stroji střídány.

Dalším ovlivňujícím faktorem je stroj. Tento faktor zpravidla nelze ovlivňovat, přestože má nesporný vliv na výsledek tisku. Nicméně provoz stroje a údržba jeho jednotlivých částí, především filtrů, má rovněž významný vliv na výsledek procesu tisku.

Jak již bylo zmíněno, model je prvním faktorem v průběhu přípravy tisku, který ovlivňuje kvalitu součásti, a to především z hlediska drsnosti a rozměrové přesnosti. Tím se rozumí nejen kvalita .stl modelu, ale i model z hlediska technologičnosti konstrukce. Pokud je předem dané, že bude součást vyráběna aditivním způsobem, je vhodné při jejím návrhu myslet na technologii výroby – drobnými úpravami lze zefektivnit výrobu a výrazným způsobem ovlivnit kvalitu dílu. Způsoby, jak součást „upravit na míru“ pro tuto technologii, budou zmíněny dále.

Pokud jsou první tři vstupy provedeny dle podmínek stanovených výrobcem, představuje operátor hlavní faktor ovlivňující výslednou kvalitu tisku. Je k dispozici celá řada doporučení, jak postupovat při přípravě tiskové úlohy, ale každý výrobek je specifický a možností nastavení jednotlivých parametrů výrobního procesu je mnoho. Výsledek tisku v tomto případě nejvíce ovlivňují:

- orientace součásti

- podpůrné struktury
- tloušťka vrstvy
- parametry tisku

To má dopad na:

- kvalitu povrchu
- pnutí
- pórovitost
- smrštění

Dále bude věnována pozornost vstupním parametrům ovlivnitelným operátorem a jejich vlivu na výsledek tisku.

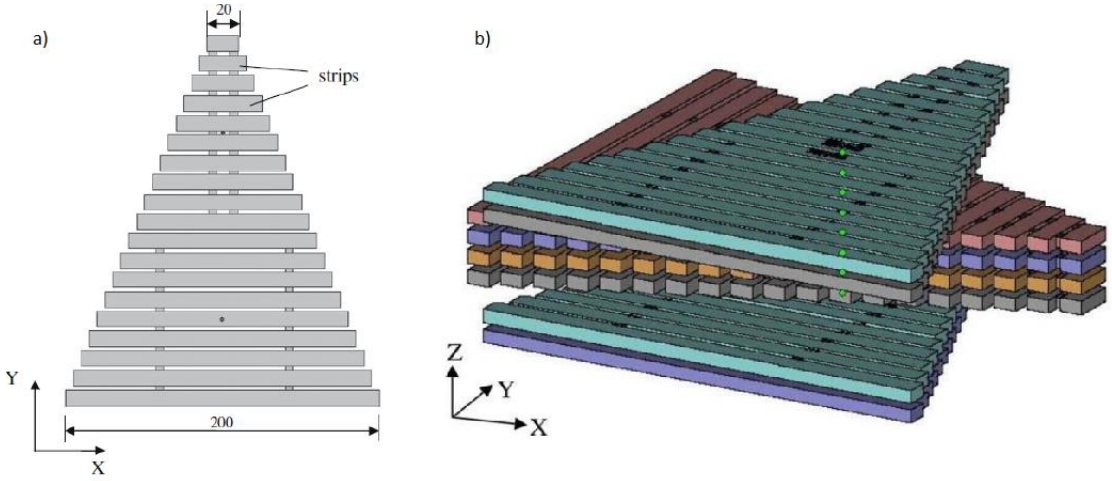
2.3.1 Orientace součásti

Orientace součásti má významný vliv na výrobní čas, kvalitu povrchu, nutnost použití podpůrných struktur, množství prášku nezbytného pro tisk a smrštění součásti. Musí být provedena především s ohledem na funkci součásti.

Problematikou orientace součásti se zabývá celá řada studií. Literatura [12] poukazuje na důležitost přesnosti .stl modelu, jeho „sliceování“ (rozřezání) do formátu .cli a volbu orientace součásti a shrnuje poznatky různých výzkumníků v této oblasti. Příkladem mohou být autoři Allen a Dutta [13], kteří vyvinuli metodu automatického výpočtu návrhu podpor na základě výsledku algoritmus o nejlepší orientaci součásti, nebo Frank a Fadel [14], kteří navrhli expertní nástroj, který bere v úvahu různé parametry ovlivňující výrobu prototypu a doporučuje nejlepší směr tisku součásti na základě vstupních informací od uživatele, ale i na základě rozhodnutí v rámci implementovaného expertního systému. Pham a kolektiv [15] vyvinuli nástroj pro podporu rozhodování, který napomáhá uživateli stanovit vhodnou orientaci součásti. Autoři pracují s řadou faktorů, jako doba stavby, náklady na výrobu, problematické rysy součásti (díry, osy, kritické plochy atd.), převislé konce, objem podpor atd. K jednotlivým kritériím se přidělí bodové ohodnocení, na jehož základě je vybrána nejvhodnější orientace v pracovní komoře. Masood a Rattanawong [16] vyvinuli algoritmus pro výpočet velikosti objemové chyby způsobené řezáním CAD modelu v závislosti na jeho orientaci.

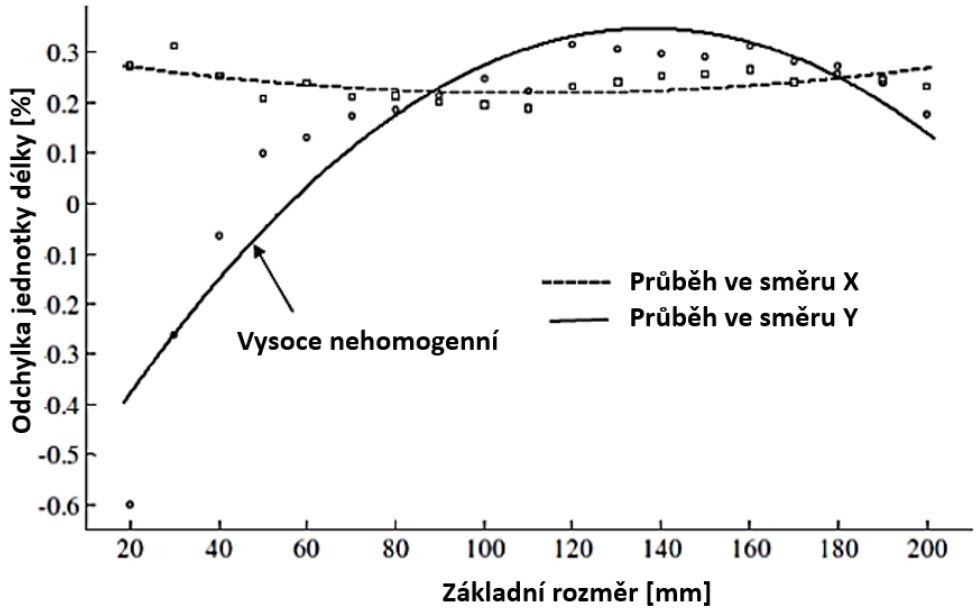
Autoři, výše uvedených zdrojů uvádí, že dokáží predikovat nejvhodnější orientaci součásti, ale neposkytují metodický návod, jak jejich metodu aplikovat, a proto nemohou být využívány jinde než na pracovištích, kde vznikly.

Vliv orientace součásti a směru tisku na smršťování součásti popisuje také literatura [17]. Pro experiment byly navrženy vzorky s různou jmenovitou délkou (od 20 do 200 mm v přírůstcích po 10 mm viz Obr. 26 a. Vzorky byly orientovány jak ve směru X, tak ve směru Y viz Obr. 26 b, to je důležité vzhledem k anizotropní povaze smrštění.



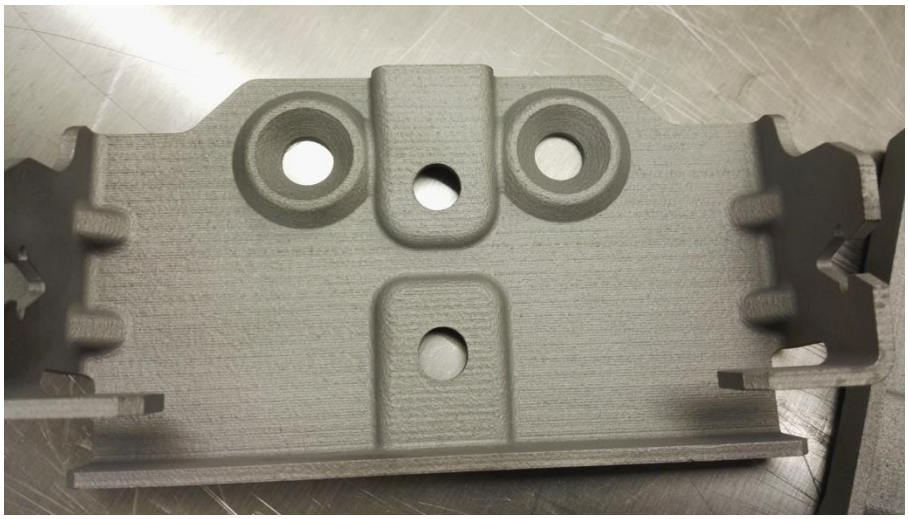
Obr.26 *(a) vzorek; (b) orientace součásti [17]*

Odchylku na jednotku délky ukazuje Obr. 27. Smrštění ve směru osy X se pohybuje v rozmezí od 0,2 % do 0,3 % v závislosti na délce, smrštění ve směru osy Y se pohybuje mezi 0,4 % až 0,35 %. Pro vzorky tištěné podél směru Y je zaznamenán rapidní nárůst mezi 20 a 120 mm. Od této hodnoty se postupně velikost smrštění zmenšuje. Větší smrštění ve směru osy Y může být způsobeno teplotním gradientem. Teplotní gradient v komoře je dán kolísáním teploty v průběhu procesu a následným rozdílným ochlazením během tisku různých délek (delší pruh = delší časový interval → vliv na velikost smrštění předchozího pruhu) [17].



Obr.27 *Vliv orientace vzorku na velikost smrštění [17]*

Orientací tisku se dá významně ovlivnit kvalita povrchu součásti, resp. jeho drsnost a rozměrová přesnost. Ze zkušenosti lze říci, že nejnižší drsnosti povrchu a zároveň nejvyšší rozměrové přesnosti je možné dosáhnout při orientaci požadované plochy kolmo na platformu. Velmi často je však orientace součásti nastavována nikoliv s prioritou na kvalitu povrchu, ale jako kombinace kvalitativních a ekonomických požadavků zákazníka. Následující obrázek ukazuje vytištěnou součást na stavěcí platformě v pohledu shora. Viditelnou vyšší drsnost součásti ovlivnil schodišťový efekt vzniklý v důsledku orientace součásti, při níž byla dána priorita na cenu bez ohledu na kvalitu. Z toho důvodu byl díl napolohován tak, aby jeho výška ve směru Z byla co nejnižší a čas tisku se zkrátil na minimum.



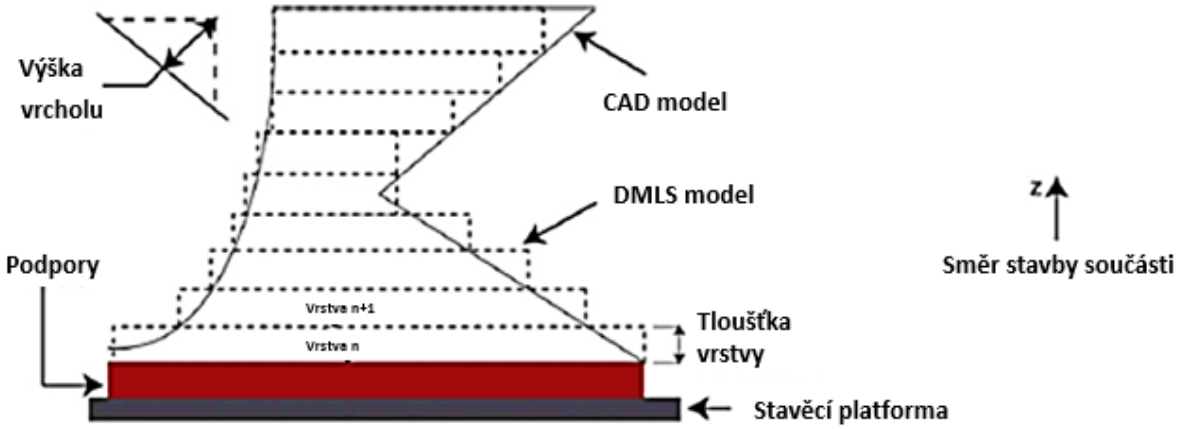
Obr.28 *Součást se zhoršenou drsností – viditelný schodišťový efekt*

2.3.2 Tloušťka vrstvy

Pro každý tištěný materiál jsou nastaveny tloušťky vrstvy, jež lze zvolit při použití přednastavených defaultních parametrů. Variabilita tohoto parametru je omezena výrobcem v závislosti na mnoha aspektech. Jedním z nejdůležitějších aspektů jsou mechanické vlastnosti, které by měly být ve shodě s vlastnostmi konvenčně vyráběných dílů.

Tloušťka vrstvy ovlivňuje výrobní čas, kvalitu povrchu a s tím související schodišťový efekt, smrštění součásti a rozměrovou přesnost. Z principu aditivní výroby vycházejícího ze spékání jednotlivých vrstev není možno zajistit dokonale souvislou tvarovou plochu. To se výrazně projevuje např. u válcových těles s vodorovnou osou tzv. schodišťovým efektem, viz Obr. 29, který lze eliminovat snížením tloušťky vrstvy, ale nelze jej zcela odstranit.

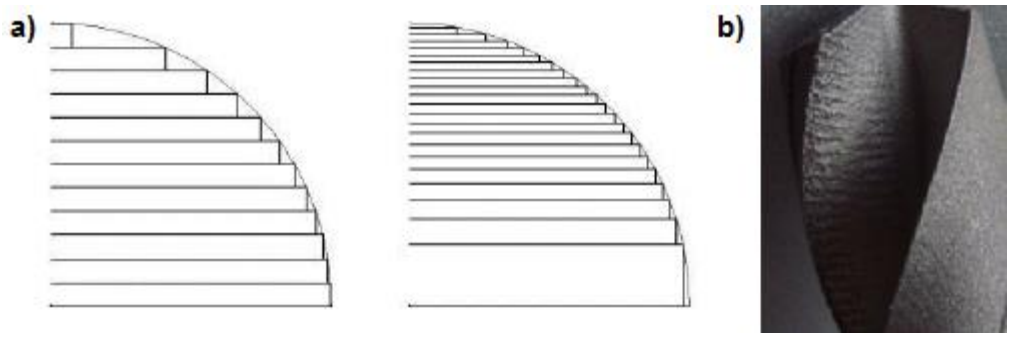
Jak je vidět na následujícím obrázku, je schodišťový efekt závislý na směru stoupání či klesání problematické plochy. V důsledku toho dochází ke změně tvaru a rozměru součásti ve vztahu k jmenovitému rozměru.



Obr.29 *Vliv směru klesání (stoupání) problematické plochy na výsledný tvar a rozměry součásti [17]*

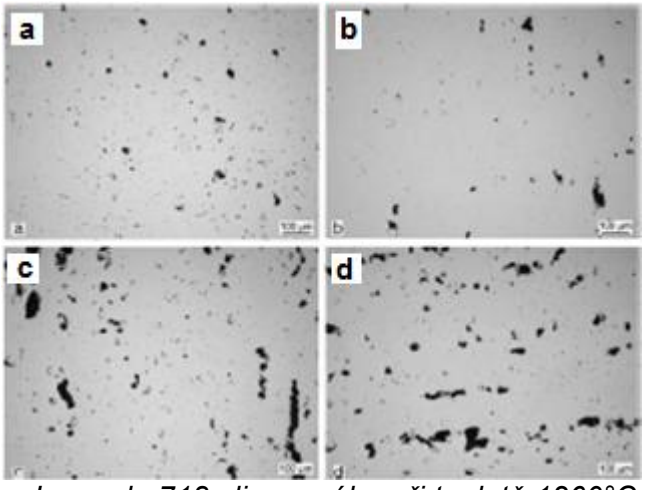
Výzkumníci Hur a Lee [19] vyvinuli algoritmus pro výpočet schodišťového efektu a určení optimální tloušťky vrstvy na základě vyčíslení procesní chyby podle objemu materiálu, který má být odstraněn, případně přidán. Vlevo na Obr. 30 a je vidět konstantní tloušťka

vrstvy a z toho vyplývající objem materiálu, který chybí do jmenovitého rozměru součásti. Úpravou jednotlivých tlouštěk vrstvy s ohledem na finální tvar by došlo k eliminaci problému schodišťového efektu, viz Obr. 30 a vpravo. Myšlenka těchto výzkumníků je z pohledu kvalitativních parametrů povrchu bezesporu velmi zajímavá, ale zatím bohužel nerealizovatelná, protože v současné době není možné libovolně měnit tloušťku vrstvy v průběhu procesu. Je však pravda, že nejnovější trendy v oblasti aditivních technologií vedou k rozdělování tištěné součásti na několik oblastí, jež je možné tisknout různými parametry tisku.



Obr.30 *a) Vliv tloušťky vrstvy na povrch součásti [18]; b) schodišťový efekt na reálné součásti*

Vliv tloušťky vrstvy a teplot spékání na pórovitost tištěného materiálu je podrobně řešen v literatuře [4]. Obr. 31 ukazuje příčný výbrus Inconelu 718 spékaného při teplotě 1260 °C s různými tloušťkami vrstev (100, 125, 150 a 200 µm). Póry jsou patrné ve všech vzorcích, ale jejich podíl je výrazně vyšší u vyšších tlouštěk vrstvy.

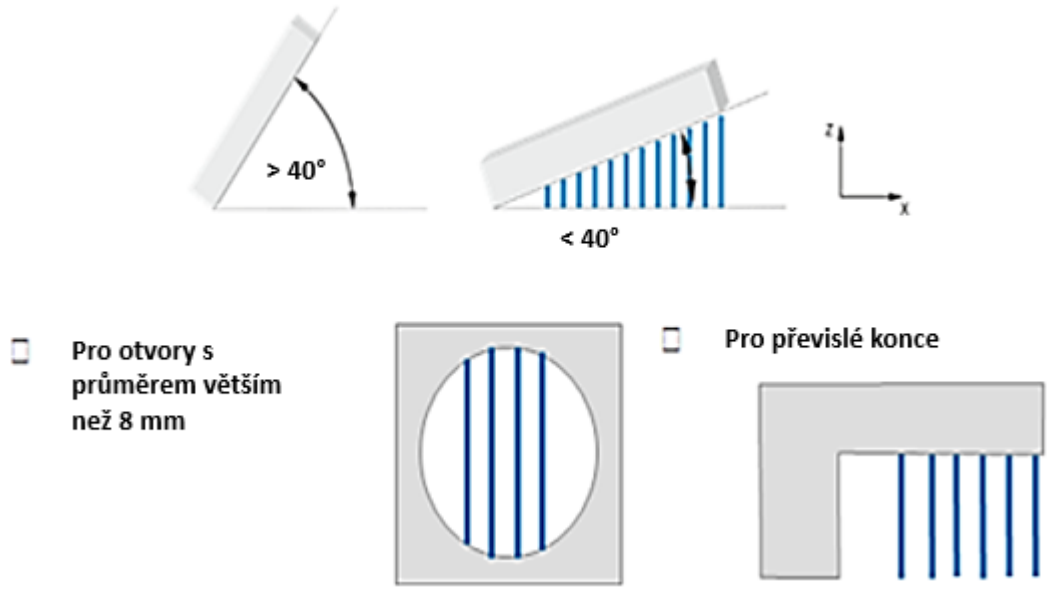


Obr.31 *Příčný výbrus Inconelu 718 slinovaného při teplotě 1260°C a tl. vrstev – a)100µm; b)125µm; c)150µm; d)200µm*

2.3.3 Podpůrné struktury

Návrh podpor je závislý především na funkci a orientaci součásti a na zkušenosti operátora. Obecně je dáno několik pravidel určujících, kdy je nutné použít podpory a kdy lze tisknout bez podpor. S tím je spjatý i samotný návrh součásti, který by měl tato pravidla akceptovat, a tím omezit nutnost stavby podpěrných struktur, zkrátit čas tisku a především čas postprocesingu, viz praktická část této práce.

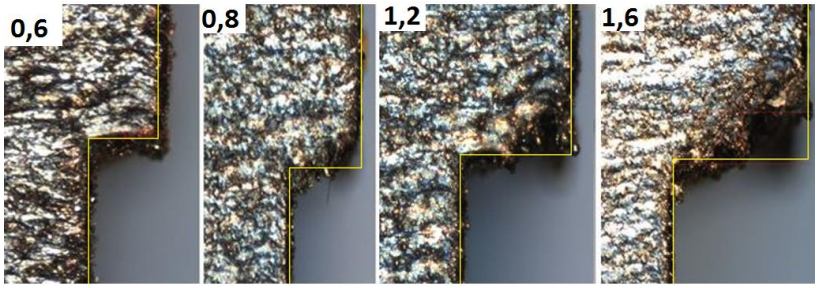
Obecně se podpůrné struktury nemusí navrhovat u převislých konců s převisem menším než 0,3–0,5 mm, u stěn svírajících s platformou úhel větší než 40–45° a u otvorů s horizontální osou do průměru 6–8mm, viz Obr. 32[11].



Obr.32 *Příklady nutnosti použití podpůrných struktur [11]*

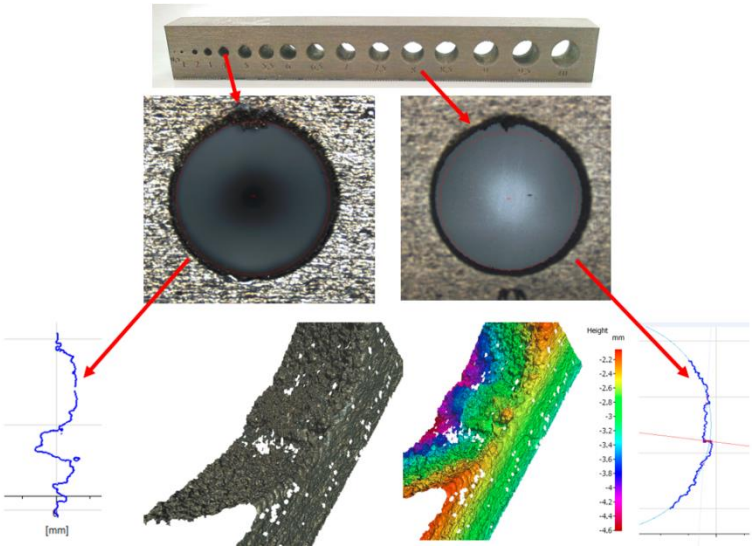
Tato doporučení byla ověřována v praktických experimentech. Výsledky experimentů jsou podrobně popsány v [77], [78].

Pro ověření tisknutelnosti větších převisů bez podpor byly vytištěny vzorky s převisy od 0,6 mm do 1,6 mm s krokem po 0,2 mm. Výsledky těchto experimentů ukazují, že převisy větší, než doporučuje výrobce pro tisk bez podpor, je sice možné vytisknout, ale jejich kvalita s rostoucí velikostí klesá [77].



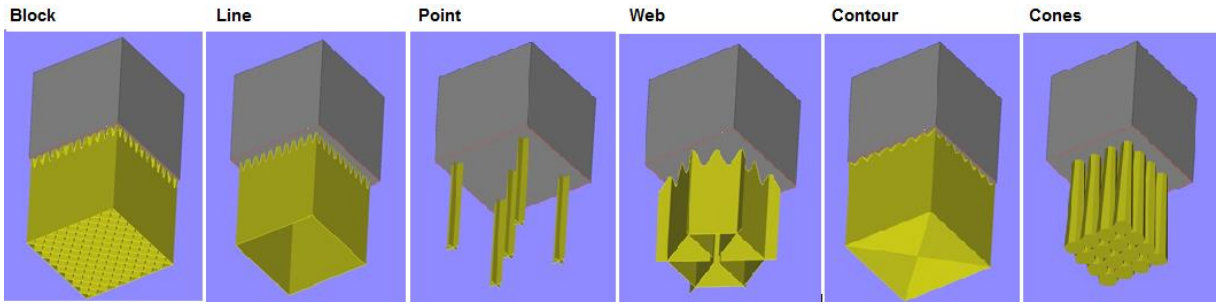
Obr.33 *Detail vytištěných převisů [77]*

Při experimentu tisknutelnosti otvorů s vodorovnou osou bez použití podpor byly vytištěny díry od 0,5 mm do 10 mm. Cca od velikosti 4 mm se začala projevovat viditelná ztráta kruhovitosti, viz Obr. 34. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že je bez použití podpěrných struktur možné vytisknout díry větší než 8 mm, ale pokud je kladen důraz na kvalitu povrchu díry, kruhovitost a rozměrovou přesnost, je vhodné použít podpory již cca od průměru díry 4 mm.



Obr.34 *Otvory zhotovené 3D tiskem bez použití podpůrných struktur [78]*

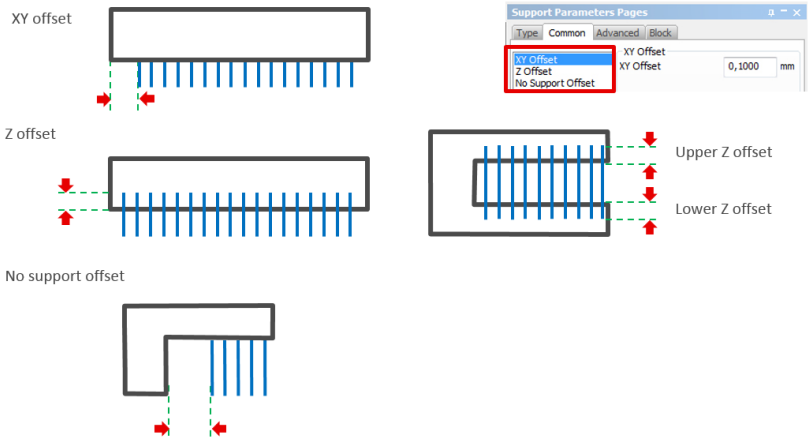
Existuje řada typů podpůrných struktur. Jejich použití a parametry nastavení jsou závislé na funkci, velikosti a materiálu součásti. Následující obrázky ukazují hlavní představitele [79]:



Obr.35 *Základní typy podpor [24]*

Zjednodušeně lze nastavení podpor rozdělit jako [79]:

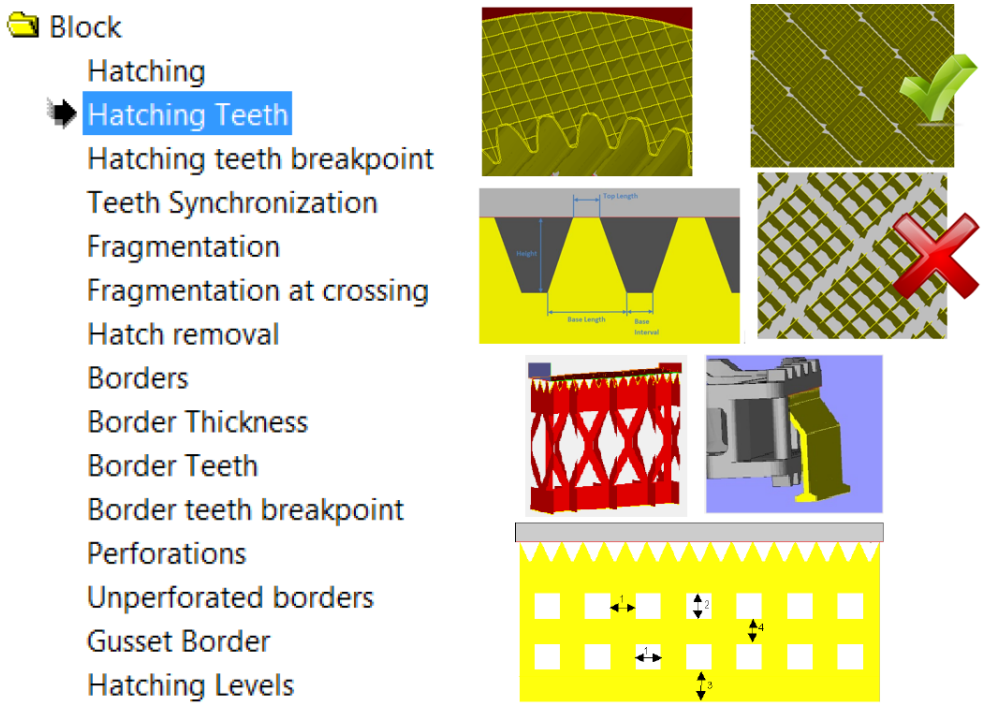
1) obecné – je nastavováno pro všechny typy. Patří sem např.:
   XY offset – definuje vzdálenost mezi hranou součásti a začátkem podpor
   Z offset – definuje minimální a maximální „prorůstání“ podpor do dílu
   Vertikal wall offset – určuje vzdálenost mezi vertikální stěnou dílu a podporami
   a mnohé další (No support offset, Lowest line, Local minima, Broaden support, Reinforcement line, Teeth at platform, Filter segments, solid Border, ….)



Obr.36 *Ukázka obecných parametrů nastavení podpor [11]*

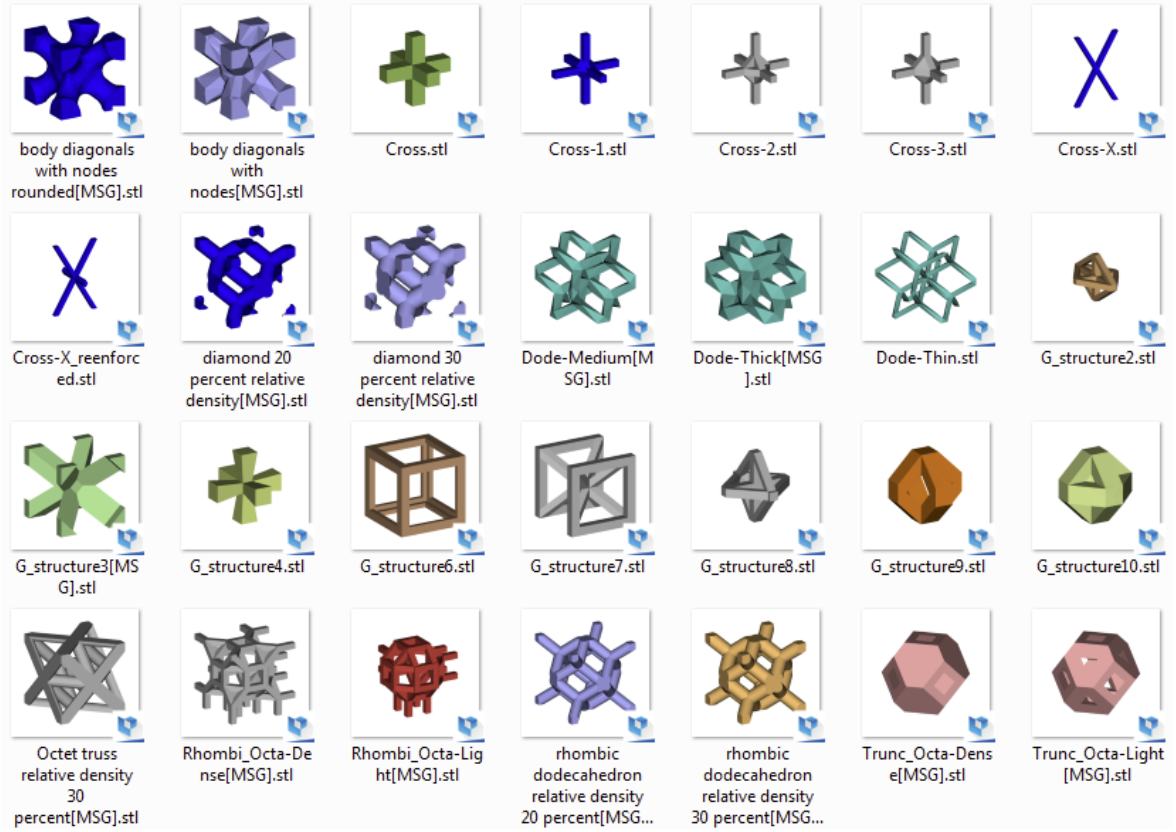
2) speciální pro daný typ – konkrétní nastavení jednotlivých typů podpor. Možnosti ovlivnění nastavení jsou závislé především na zkušenostech operátora.

Nejběžněji používaným typem jsou podpory typu Block.



Obr.37 *Nástin možností ovlivnění podpor typu Block [11], [79]*

Existují i pokročilé typy podpor, které jsou vhodné spíše pro speciální aplikace, v nichž plní v dílu konkrétní úlohu, např. nahrazují plnoobjemový materiál s cílem snížení hmotnosti dílů při spolehlivém zabezpečení funkce součásti, a jsou tedy součástí finálního výrobku. Některé pokročilé typy podpor jsou ukázány v následujícím obrázku.



Obr.38 *Pokročilé typy podpor [80]*

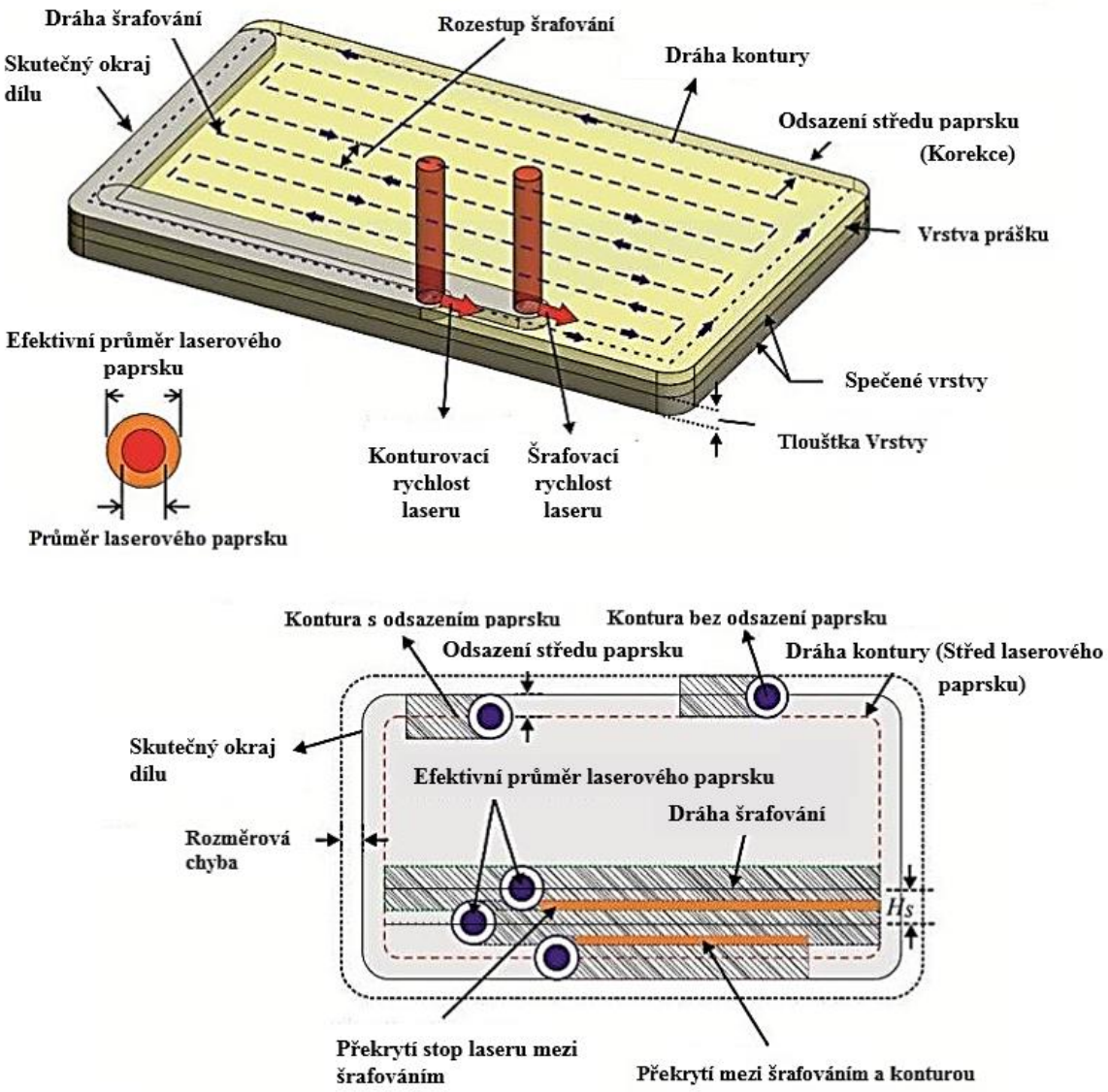
2.3.4 Parametry tisku

Jak již bylo zmíněno, při nastavování parametrů pro tisk je možné použít buď výrobcem nastavené parametry, nebo vlastní parametry pomocí Parameter Editors. Parametrů, které lze v otevřeném programování ovlivnit, je celá řada. Obecně lze říci, že výsledek tisku závisí nejvíce na výkonu laseru, rychlosti scanování, strategii tisku, překrývání sousedních drah laseru. Na výhody a nevýhody otevřeného programování je nutné pohlížet z několika pohledů. Co je výhodou pro určitou skupinu materiálů, může být pro ostatní nevýhodou a naopak.

Otevřené programování otevírá nové možnosti ve studiu procesů tisku a procesních parametrů. Pro konkrétní aplikaci je možné najít parametry, které mohou být v mnoha ohledech vhodnější než parametry přednastavené. Vývojové týmy všech výrobců zařízení pracují na jejich optimalizaci ve snaze odstranit, nebo alespoň eliminovat slabá místa tisku. Každý rok přicházejí v rámci celosvětových veletrhů a workshopů s inovacemi v této oblasti a posouvají technologii 3D tisku na vyšší úroveň.

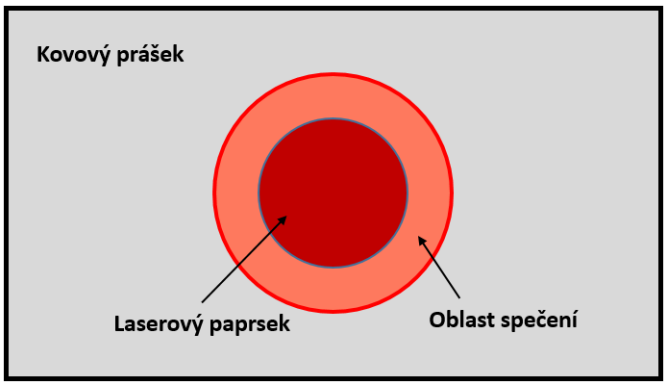
Pro smysluplné ovlivňování procesu tak, aby výsledek inovace posouval danou oblast dopředu, je nezbytné nejprve porozumět procesu tisku samotnému. Tento úkol musí být úkolem týmu lidí, nikoliv jednotlivce, z různých oblastí s neodmyslitelnou podporou zařízení a vybavení, které daný výzkum umožní.

Následující obrázek naznačuje některé proměnné, které mohou být voleny operátorem. Je zřejmé, že během jednoho procesu se tyto proměnné mění v závislosti na aktuálním spékaném místě.



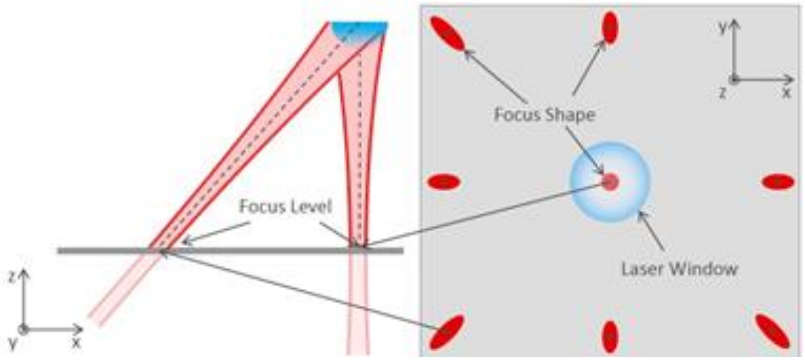
Obr.39 *Parametry ovlivňující proces tisku [25]*

Mezi konstantní veličiny nastavení patří průměr laserového paprsku, který se pohybuje kolem 70–80 µm, to však neodpovídá nejmenší tisknutelné tloušťce. Ta závisí především na intenzitě a scanovací rychlosti laseru, který ovlivňuje oblast spečení. Obvykle se tato oblast u přednastavených parametrů pohybuje kolem 120–180µm v závislosti na použitém materiálu [24].



Obr.40 *Laserový paprsek a oblast ovlivnění [24]*

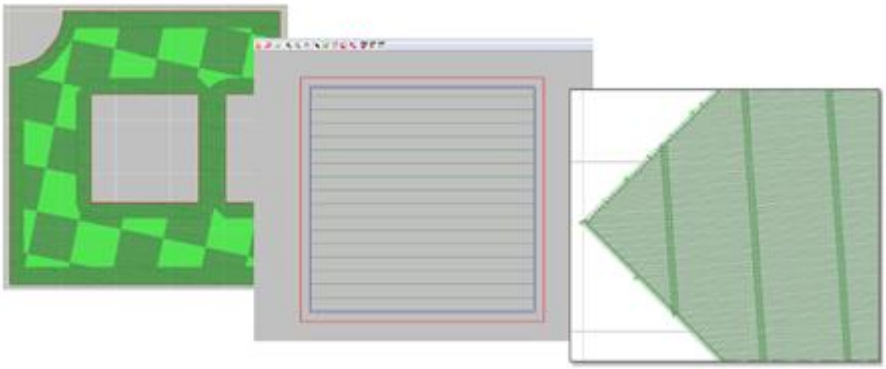
Obr. 40 ukazuje ideální případ, tím je myšleno, probíhá-li spékání na středu platformy. Pokud paprsek spéká v jiné části platformy, dopadá na plochu v průřezu elipsy nikoliv kruhu, viz Obr. 41. Tím dochází ke změně velikost oblasti spečení a především je tak v závislosti na poloze tištěného dílu na platformě ovlivněna přesnost tisku. Následující obrázek je pouze schématický, poměry rozměrů neodpovídají skutečnosti.



Obr.41 *Schématická ukázka vlivu pozice spékané součásti na platformě na velikost spékané oblasti [24]*

S laserem, konkrétně s výkonem laseru a s rychlostí scanování je mimo jiné úzce spjata i pórovitost spečeného materiálu. Obecně roste procento pórovitosti materiálu s narůstající rychlostí scanování a se snižujícím se výkonem laseru.

Určitým způsobem lze ovlivnit i dráhy laseru (strategii tisku) a pořadí spékání součástí v rámci jedné vrstvy. Nelze však ovlivnit pořadí jednotlivých drah. Na Obr. 42 jsou ukázány nejčastěji používané strategie, které lze při tisku zvolit. V rámci tisku jedné součásti jsou defaultně použity různé parametry v závislosti na poloze tištěné oblasti a na aktuální dráze laseru.



Obr.42 *Ukázka možností volby strategie tisku [24]*

2.3.5 Pnutí

Vnitřní pnutí v součásti je nežádoucím jevem, který lze eliminovat, ale nikdy ne zcela odstranit. V přípravné fázi tisku lze zmírnit dopad pnutí vhodným nastavením podpěrných struktur, strategií tisku a množstvím tištěných součástí v pracovní komoře (více součástí – delší doba pro chladnutí mezi jednotlivými přejezdy). Po tisku lze ještě snížit vnitřní pnutí tepelným zpracováním součásti, ideálně ihned po ukončení procesu spékání, včetně podpor a platformy, aby se minimalizovaly případné deformace. Významný vliv na velikost vnitřního pnutí má velikost součásti a materiál, z nějž je součást tištěna. Velké díly (větší než cca 80 mm) jsou k pnutí více náchylné, neboť je obtížnější zajistit rychlý odvod tepla ze součásti. Potřeba tepelného zpracování menších dílů je závislá na jejich funkci. Příklad vnitřního pnutí, které vyústilo k vytvoření trhlin na tenkostěnné součásti (tloušťka stěny 2 mm) ještě

v průběhu tisku, je uveden na Obr. 43. Důvodem je nedostatečné množství podpor, které by spolehlivě fixovaly díl k platformě a zároveň sloužily pro odvod tepla.

Obr.43 *Ukázka trhlin na součásti způsobených vnitřním pnutím*

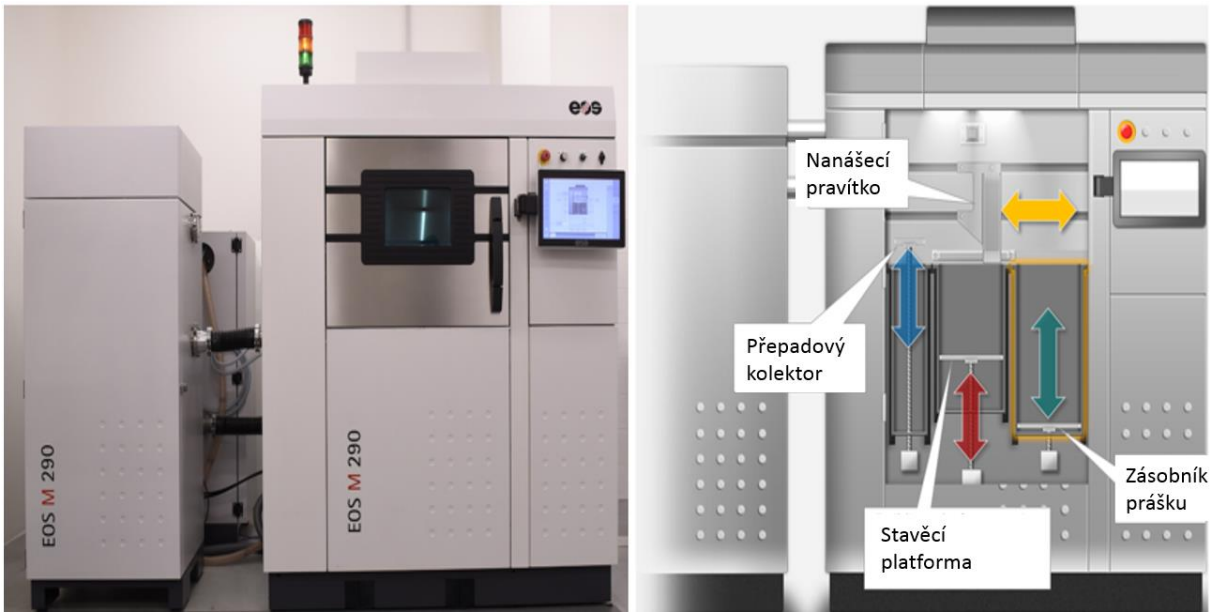
Příprava tisku je vždy kompromisem mezi minimalizací podpůrných konstrukcí a dostatečným ukotvením součásti. V případě, že pnutí v součásti, způsobené střídáním prudkého ohřevu a chladnutí dílu, je větší, než jsou schopné podpůrné struktury přenést, dochází obvykle vlivem deformace ke zvednutí dílu nad rovinu naneseného prášku. To může v konečném důsledku způsobit zastavení pravítka, a tím i tiskové úlohy, viz Obr. 44.

Obr.44 *Zvednutí dílu způsobené vlivem pnutí*

3 Výzkum technologických vlastností 3D tisku

Tato stěžejní kapitola je zaměřena na vlastní výzkum v oblasti aditivních technologií a na naplnění vytyčených cílů práce. Praktická část práce mohla vzniknout díky možnosti využívání zařízení a vybavení laboratoří Regionálního technologického institutu při Fakultě strojní na Západočeské univerzitě v Plzni a díky spolupráci mezi jednotlivými laboratořemi, a to především Laboratoře experimentálního obrábění, Metalografické laboratoře, Mechanické zkušebny, Laboratoře experimentálního tváření a Laboratoře technologie obrábění.

Pro výrobu (tisk) všech dále zmiňovaných vzorků a součástí bylo použito zařízení EOS M290 od firmy EOS GmbH, viz Obr. 45. Velikost pracovního prostoru je 250 x 250 x 325 mm.



Obr.45 *Zařízení EOS M290 Laboratoře experimentálního obrábění*

Tato práce se prioritně zabývá tiskem z nástrojové martenziticky vytvrditelné oceli (Maraging Steel) s obchodním označením MS1, ekvivalentní s konvenčně vyráběnou nástrojovou ocelí W-Nr. 1.2709 (DIN X3NiCoMoTi18-9-5), která vyniká odolností proti deformaci, výbornou houževnatostí a rovnoměrným smršťováním 0,09 %. Používá se pro formy na lisování plastů, tlakové lití lehkých kovů, nástroje na lisování za studena atd. Udávané chemické složení tištěné i konvenčně vyráběné oceli (tvářené za tepla) je uvedeno v Tab. 3.

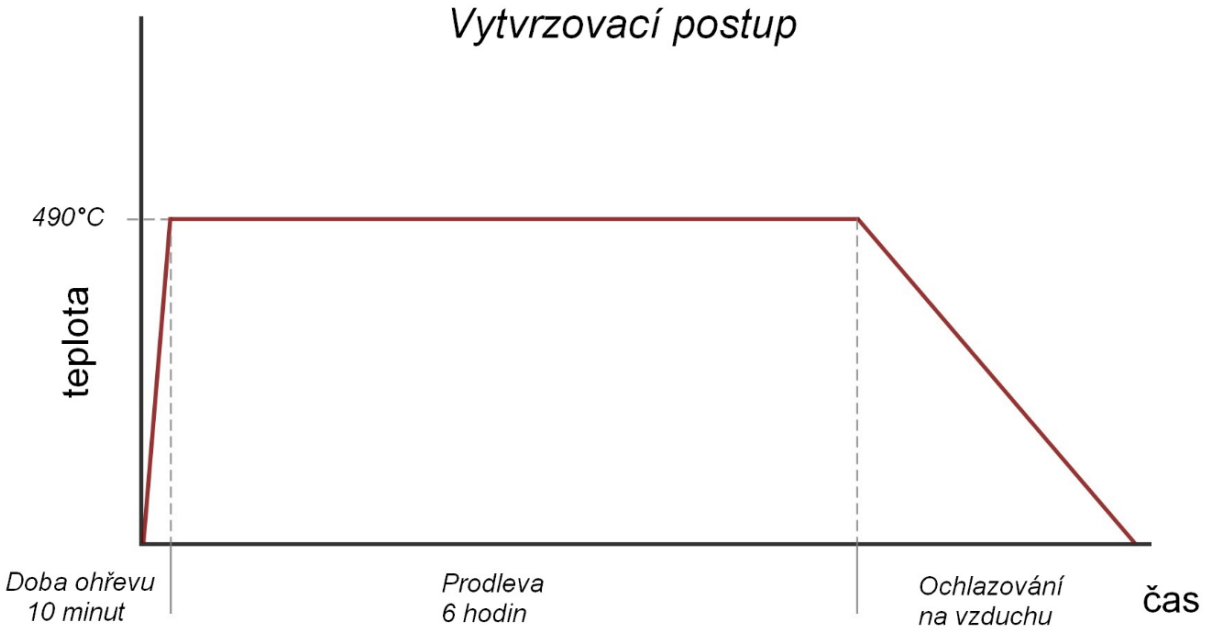
Pro nahrazování konvenčně vyráběných dílů díly aditivně vyráběnými je důležité nejprve ověřit, zda jsou mechanické a materiálové vlastnosti srovnatelné a zda tedy mohou být konvenčně vyráběné díly nahrazeny bez ohrožení spolehlivosti, bezpečnosti a funkce celé sestavy, do níž jsou zakomponovány.

Tab.3 Chemické složení tištěné a konvenčně vyráběné oceli W-Nr. 1.2709

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V,W	Co	Ti	Cu	Al	Fe
MS1	≤ 0,03	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,5	4,5 - 5,2	17,0 - 19,0		8,5 - 9,5	0,6 - 0,8	≤ 0,5	0,05 - 0,15	zbytek
Konv.	≤ 0,03	≤ 0,1	≤ 0,15	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,25	4,5 - 5,2	17,0 - 19,0	-	8,5 - 10	0,8 - 1,2	-	-	zbytek

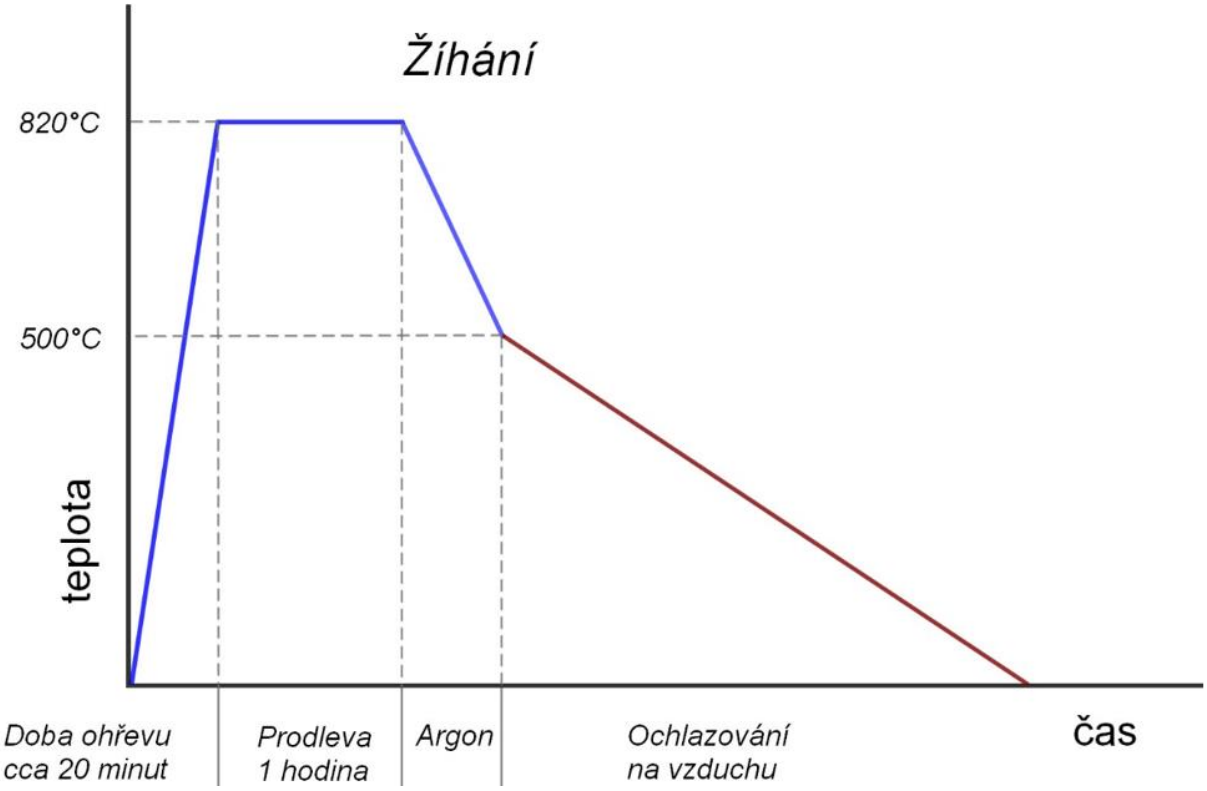
Za hlavní nedostatek aditivní technologie se považují anizotropní mechanické vlastnosti mezi směrem přírůstku vrstvy (Z) a směrem roviny stavěcí platformy (X a Y),

které vyplývají především z principu spékání po jednotlivých vrstvách. Díly jsou zatěžovány velkým teplotním gradientem při spékáním a chladnutím jednotlivých vrstev, to způsobuje v materiálu vznik pnutí [58]. Proto je vhodné u větších dílů, cca od 80 mm, provádět po tisku tepelné zpracování pro jeho eliminaci žíháním. Pro zvýšení tvrdosti a pevnosti dílů doporučuje výrobce zařadit proces vytvrzení na 52–56 HRC (viz Obr. 46), který spočívá v rychlém ohřevu na 490 °C, výdrži na této teplotě po dobu 6 hodin, a následném pozvolném ochlazování na vzduchu.



Obr.46 *Proces vytvrzení dle doporučení výrobce*

Výrobce běžně neudává žíhací proces, avšak po diskuzi na toto téma doporučil následující proces rozpouštěcího žíhání (viz Obr. 47), který má zachovat mechanické vlastnosti materiálu v tištěném stavu a zároveň snížit pnutí. Proces spočívá v ohřátí na teplotu 820 °C v ochranné atmosféře Ar, následuje výdrž na teplotě po dobu jedné hodiny a pak prudké ochlazení v Ar pod 500 °C. Poté následuje dochlazení na vzduchu.



Obr.47 *Rozpouštěcí žíhání dle doporučení výrobce*

Jak už bylo naznačeno, mechanické vlastnosti materiálu jsou závislé nejen na tepelném zpracování, ale i na orientaci součásti během tisku. Srovnání mechanických vlastností dle výrobce pro tištěný a konvenčně vyrobený materiál (po rozpouštěcím žíhání) 1.2709 je uvedeno v Tab. 4 (podrobněji viz Příloha 1a 2).

Tab.4 Mechanické vlastnosti oceli 1.2709

	Ocel tvářená za tepla	Ocel spékaná (XY)	Ocel spékaná (Z)	Ocel spékaná po vytvrzení
Tvrdost [HRC]	35 - 40	33 - 37		50 - 56
Mez kluzu [MPa]	950	1050 ± 100	870 ± 100	1990 ± 100
Pevnost [MPa]	930 - 1130	1200 ± 100	1100 ± 100	2050 ± 100
Prodloužení [%]	min. 12	13 ± 4	12 ± 4	4 ± 2
Modul pružnosti [GPa]	180	160 ± 25	150 ± 30	180 ± 20
Tepelná vodivost [W/mK]	21	15 ± 0.8		20 ± 1
Smrštění po vytvrzení [%]	0,09	-		0,08
Hustota [g/cm³]	7,85	8.0 - 8.1		

3.1 Vstupní materiál – prášky

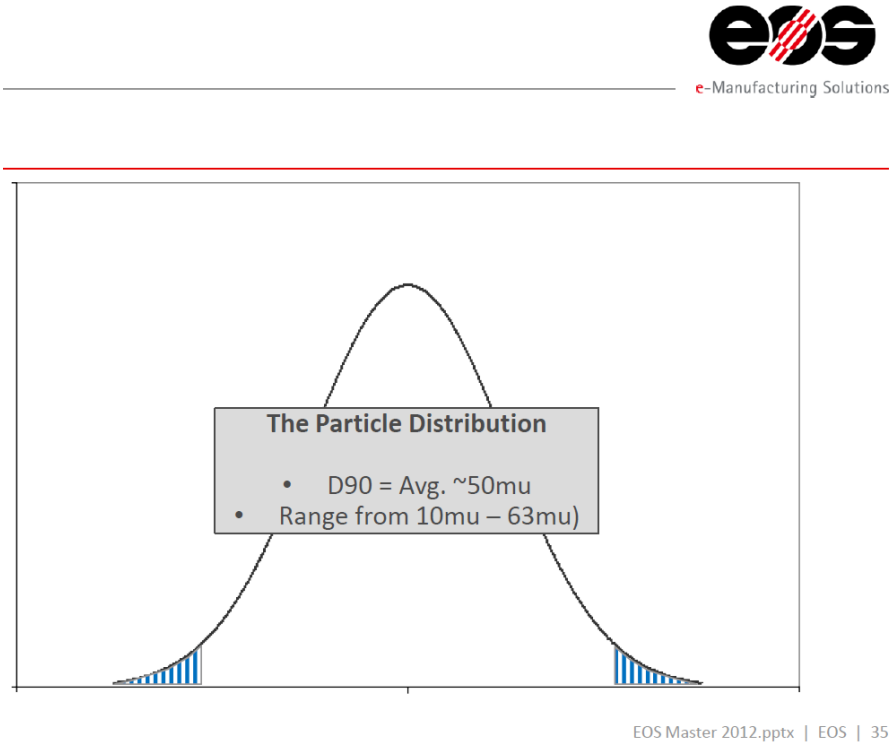
Na začátku procesu technologie aditivní výroby stojí prášky jednotlivých materiálů, jejichž kvalita je považována za zásadní pro kvalitu finálního výrobku. Informace o této problematice nejsou dohledatelné, a proto je velmi důležité provést výzkum v oblasti vstupních materiálů z hlediska jejich kvality, která zahrnuje např. velikost a tvar zrna prášku a homogenitu rozložení velikosti jednotlivých zrn v průběhu tisku.

Předmětem výzkumné části této práce je popsat prášky pro výrobu martenziticky vytvrditelné oceli s obchodním označením MS1, konvenčně známé pod označením Wr.N. 1.2709 (DIN X3NiCoMoTi18-9-5), a na základě tohoto výzkumu vytvořit metodiku, podle které bude možné hodnotit ostatní prášky určené pro aditivní technologie.

Prášky oceli MS1 jsou dodávány v 10 kg uzavřených plombovaných barelech. Obecně platí, že při veškeré manipulaci s volným kovovým práškem (manipulaci při otevřené pracovní komoře, vyndávání nebo ustavování stavěcí platformy, odstraňování konstrukčních dílů) se doporučuje nosit předepsané ochranné antistatické pomůcky, neboť některé druhy prášků, popř. jejich kondenzáty, mohou být v kombinaci se vzduchem samovznětlivé nebo mohou vést k tvorbě výbušné atmosféry. Obecně je tento materiál označován výrobcem jako zdraví škodlivý, protože obsahuje těžké kovy [56].

Velikost a tvar jednotlivých částic prášku je dán jeho výrobou, viz kapitola 2.1.1.6. Výrobce při školení udává, že distribuční rozdělení velikosti prášku je dle Gausse, přičemž 90 % prášku by mělo mít velikost cca 50 µm, viz Obr. 48, a zbývajících 10 % by mělo obsahovat prášek o velikosti 10–50 µm a 50–63 µm. Částice menší než 10 µm s sebou nesou vyšší zdravotní riziko, a to především z důvodu jejich snadného vdechnutí, které usnadňuje jejich nízká hmotnost.

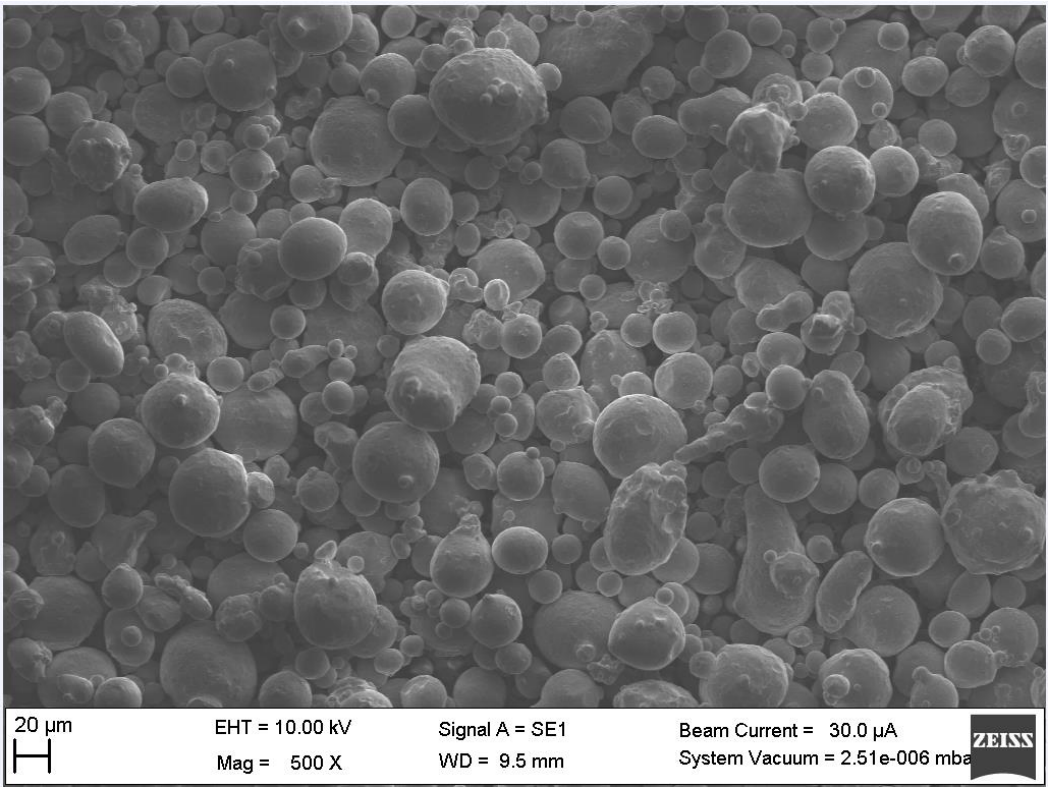
Výrobce preferuje sférický tvar částic kvůli jeho dobré zabíhavosti (tekutosti), ale zároveň udává, že ani tvarově nepravidelné částice nemusí snižovat kvalitu finálního výrobku [57]. Výrobce zařízení garantuje záruční servis zařízení a deklaruje vlastnosti vytištěného kusu pouze při spékání jím dodávaného prášku.



Obr.48 *Informace o rozložení velikosti prášků ze školicích podkladů výrobce [81]*

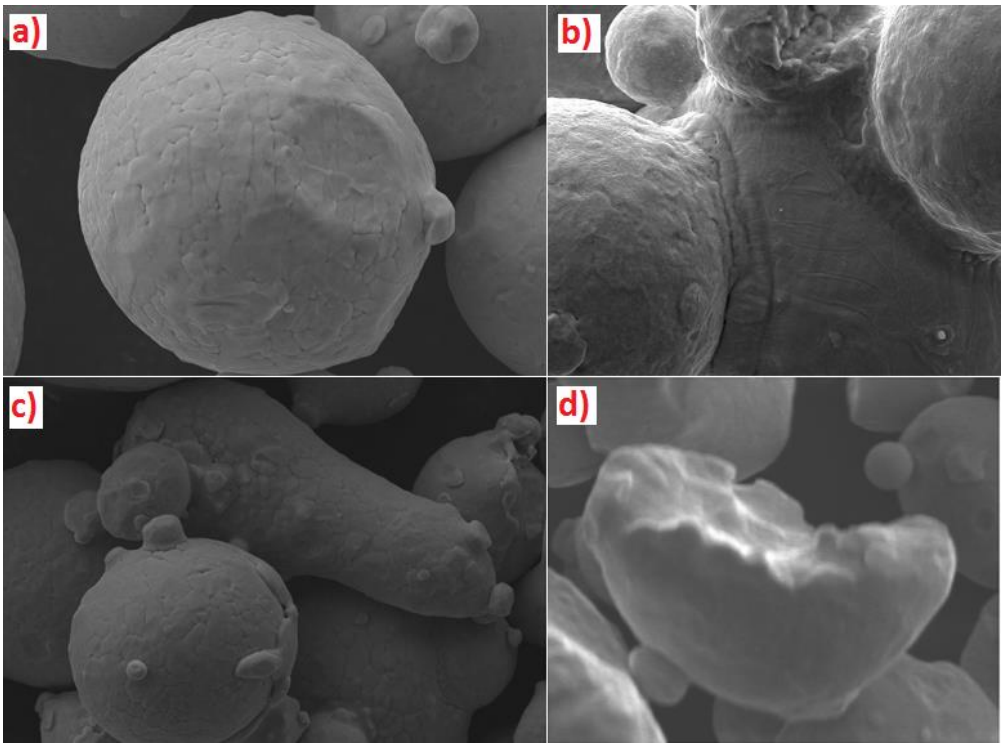
3.1.1 Hodnocení tvaru a struktury prášku MS1

Na základě informací o velikosti a rozložení prášku byla provedena analýza prášku pro výrobu martenziticky vytvrditelné oceli – Maraging Steel MS1.



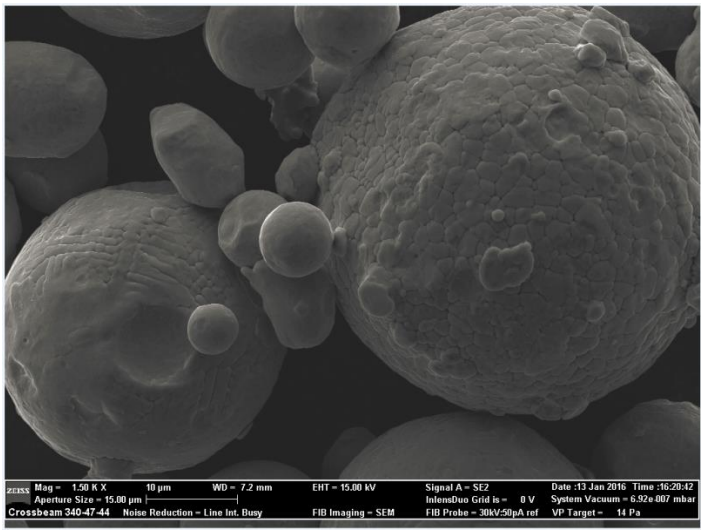
Obr.49 *Scan prášku oceli MS1*

V první fázi byl hodnocen tvar a velikost jednotlivých částic. Z Obr. 49 je patrné, že většina zrn má kulový tvar, popř. jsou k sobě kulové částice „přilepeny“. To lze pozorovat jak u podobně velkých částic, tak i u částic různé velikosti (malé zrnko je spojeno s mnohonásobně větším). Příčinou je pravděpodobně to, že se během výrobního procesu nestihly před ztuhnutím rozdělit (tato teorie je potvrzena dále). Tento jev může mít různé podoby od dvou k sobě „přilepených“ kulových částic, přes protáhlý tvar zrna až po několik do sebe prorůstajících částic. Další zrna specifická svým nepravidelným tvarem, která je možné v novém prášku najít, nevznikla pravděpodobně v průběhu výrobního procesu, ale až při další manipulaci. Jejich nepravidelný tvar je dán odlupováním vrstev souvisejících se strukturou jednotlivých zrn (je popsáno dále), nebo vzájemným kontaktem zrn, při němž se mechanicky odlomila část původně kulovitého zrna. Jednotlivé tvary zrn jsou detailněji ukázány na následujícím obrázku.



Obr.50 *Ukázka tvarů zrn z hlediska tvaru vyskytující se v dodaném prášku MS1; a) kulový tvar, propojení větší a menší částice, b) několik vzájemně prorostlých částic, c) v popředí odlupující se vrstva, v pozadí protáhlý tvar zrna, d) nepravidelný tvar zrna*

Při větším zvětšení je možné pozorovat na povrchu zrnek unikátní šupinkovou strukturu „sloní kůže“, viz Obr. 51. Zde se nabízí otázka příčiny vzniku této struktury. Pro vysvětlení tohoto jevu byl proveden metalografický výbrus zrn, na základě kterého došlo k objasnění této otázky.

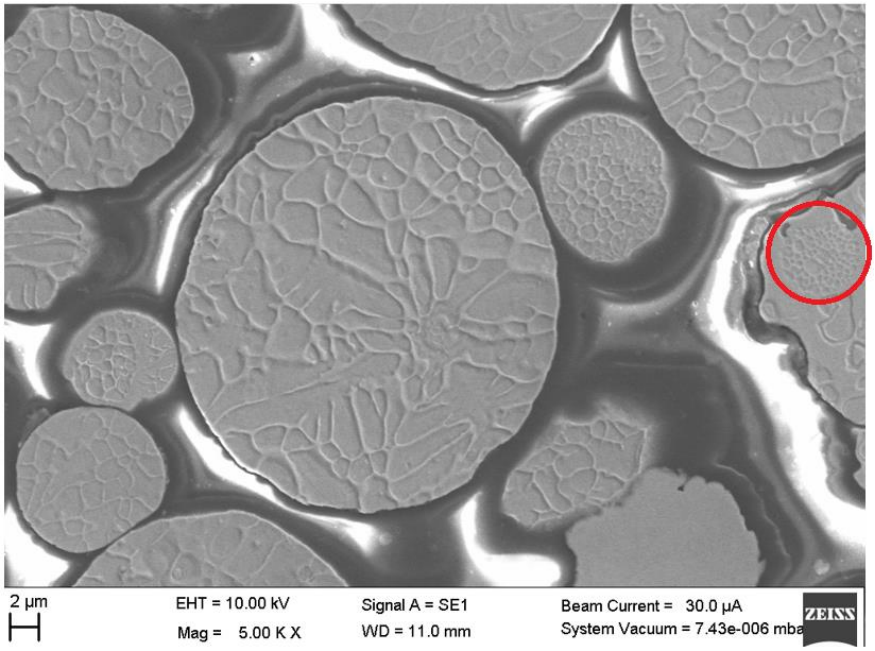


Obr.51 *Detailní pohled na zrníčka prášku MS1*

Tato analýza je v čase jejího vzniku naprosto jedinečná a unikátní. Naleptaná zrna mají buněčnou/dendritickou mikrostrukturu tvořenou měkkým tuhým roztokem, viz Obr. 52. Dendrity jsou obecně výsledkem krystalizace s negativním teplotním gradientem a svědčí i o heterogenitě chemického složení, přičemž primární osy dendritů rostou vždy ve směru teplotního gradientu (proti směru odvodu tepla) [60], [61]. Zmíněné stromečkovité útvary tedy vznikají během procesu výroby, při němž dochází k roztavení kovové slitiny, která je pak vysokou rychlostí plynu rozprašována na jemné kapičky, jež po ztuhnutí tvoří jednotlivá zrna

prášků. Přes typickou nehomogenitu těchto útvarů mají zrna prášků poměrně stabilní chemické složení. V menších zrnech se zdá být nepatrně větší množství Ni a Co. A na hranicích buněk/dendritů mírně zvýšené obsahy Mo a Ti v porovnání se středem buněk.

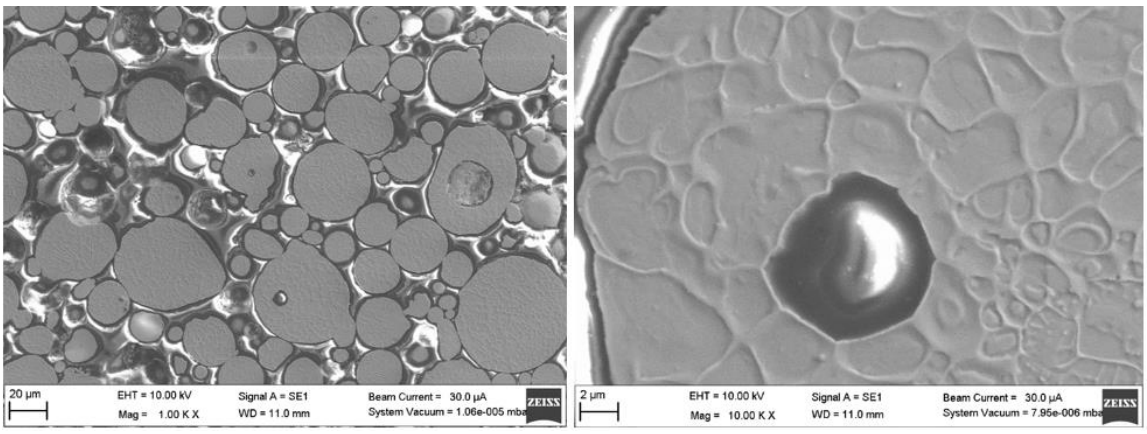
Tento metalografický výbrus dává odpověď na otázku vzniku „sloní kůže“ na povrchu jednotlivých zrn prášku. Dendrity prorůstají na povrch a tvoří zmiňované šupinky. Z Obr. 52 je patrný nepravidelný růst těchto útvarů, který vyplývá z principu výroby technologií Gas atomization. Není ani výjimkou, že se uvnitř nějakého zrna prášku nachází jiné zrno – ozn. v obrázku červeně.



Obr.52 *Metalografie zrn prášku MS1*

Některá zrna obsahovala vměstky s vysokým podílem Fe a Ti vzniklé pravděpodobně během výrobního procesu, viz následující obrázek, které se náhodně vyskytovaly i ve struktuře spečeného dílu ve formě oxidů.

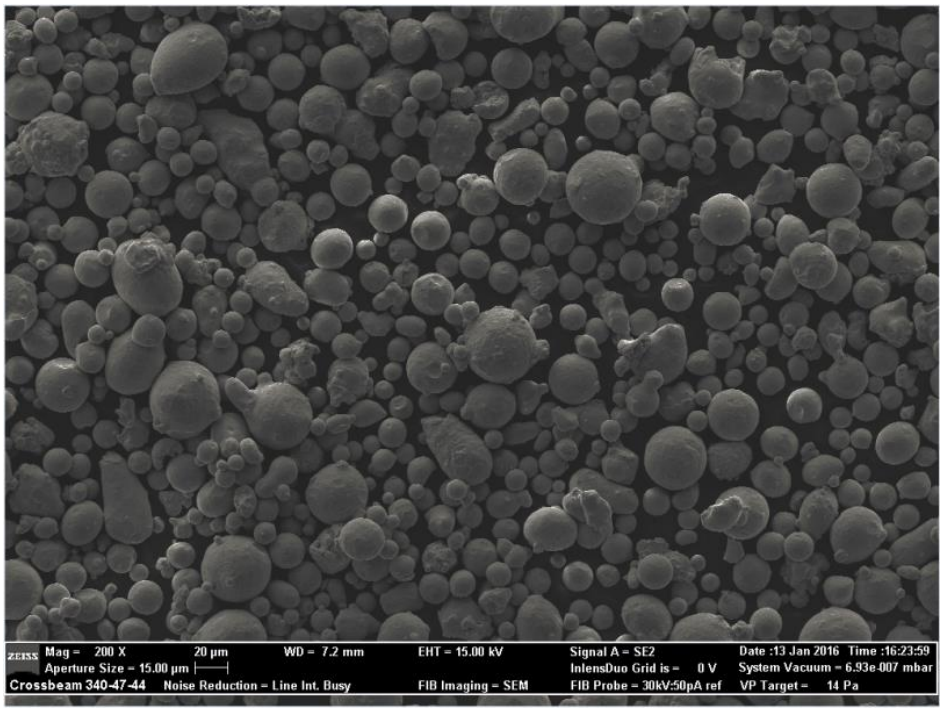
Z Obr. 53, resp. z některých oddělených dendritických struktur v rámci jednoho útvaru, je patrné, že některé částice vznikaly jako dvě samostatné, ale před ztuhnutím se od sebe nestihly oddělit, čímž se potvrzuje výše uvedená teorie vzniku „přilepených“ kulových částic.



Obr.53 *SEM dendritické struktury zrna prášku s vměstkem vysokého podílu Fe a Ti (bez Co)*

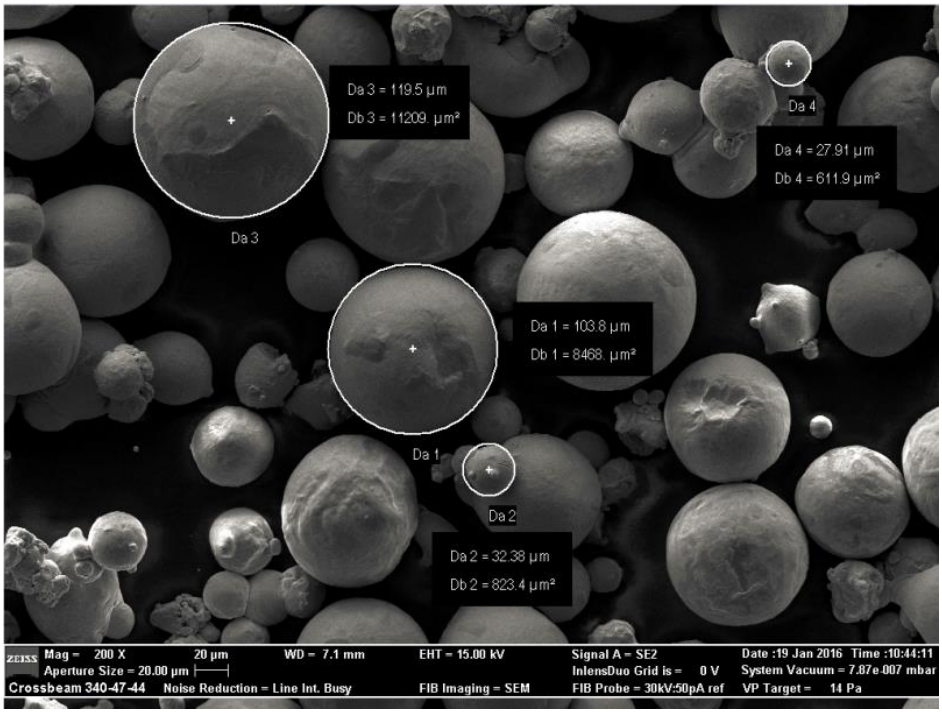
Co se týče velikosti jednotlivých zrnek prášku, dá se ze vzorkového měření na Obr. 44 a Obr. 54 predikovat, že průměrná hodnota velikosti recyklovaného i nového prášku je menší než 30 μm a že obsahem jsou i částečky menší než 10 μm. **Prášek tedy není v souladu s údaji, které deklaruje výrobce**. Tato skutečnost byla ověřena na vzorcích z různých výrobních dávek. Na první pohled není vidět rozdíl mezi novým a přesetým (recyklovaným) práškem.

Pro ověření kvality prášku byla provedena analýza nového a recyklovaného prášku (přeseto na sítě o velikosti oka 80 μm) – viz následující obrázky. Na první pohled není vidět rozdíl mezi novým a přesetým (recyklovaným) práškem.



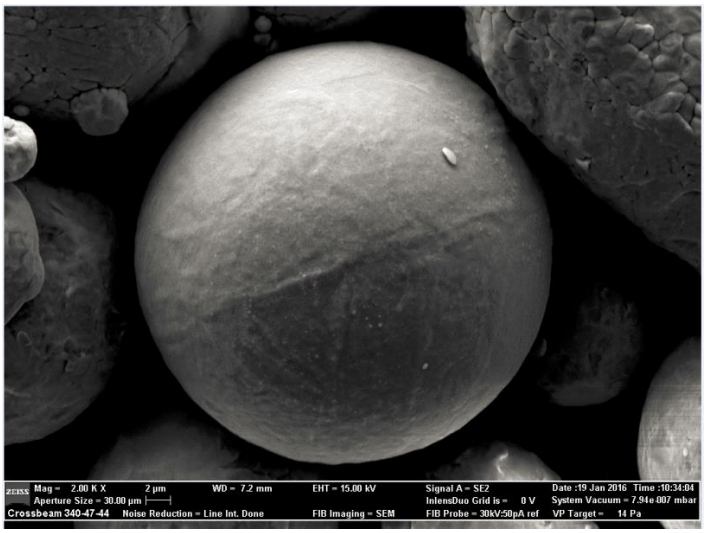
Obr.54 *Recyklovaný prášek MS1*

Dá se ovšem pozorovat významný rozdíl mezi práškem, který nepropadl sítem o velikosti ok 80 μm a práškem recyklovaným. Obr. 54 a 55 mají stejné zvětšení, z čehož je velmi dobře patrný rozdíl velikostí. Částice, které zůstanou na sítu a které se v původním prášku nevyskytovaly, mají kulovitý tvar a průměr výrazně větší než v počátečním stavu. Je zřejmé, že se vytvořily až v průběhu spékání. Tyto částice rovněž nenesou známky tzv. „sloní kůže“ a jejich povrch je poměrně hladký.



Obr.55 *Zbylý prášek MS1 na sítě*

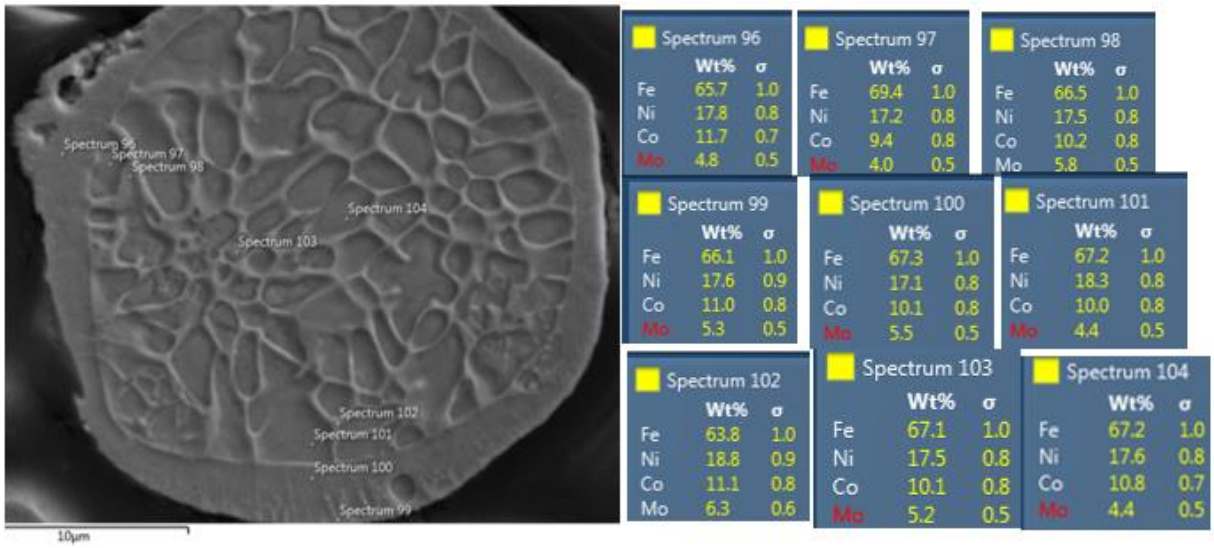
Zrnka bez struktury sloní kůže byla při detailní analýze nalezena i v přesetém (recyklovaném) prášku. To s velkou pravděpodobností svědčí o tom, že se při procesu spékání nově vytvořila i zrna menších velikostí, která propadla okem síta a budou spolu s recyklovaným práškem použita při dalším tisku. Otázkou ovšem je, jaké je jejich chemické složení a co tato zrna způsobí ve struktuře po tisku.



Obr.56 *Zrnko prášku bez dendritické struktury sloní kůže (okolní zrna mají zmíněnou dendritickou strukturu)*

Procento těchto hladkých částic je v recyklovaném prášku velmi malé (je velmi obtížné takovou částici najít), proto bylo náročné provést metalografický výbrus, v němž by byla tato částice zahrnuta. Obr. 57 ukazuje výbrus této částice, včetně chemického složení. Opět je zde zodpovězena otázka povrchu částice. Hladký povrch částice vzniklé v průběhu procesu tisku je dán tím, že dendrit nedoroste až k povrchu, který tvoří obálku této struktury. Chemické složení zrna je však poměrně stabilní a odpovídá zrnům nového prášku, viz výše, a

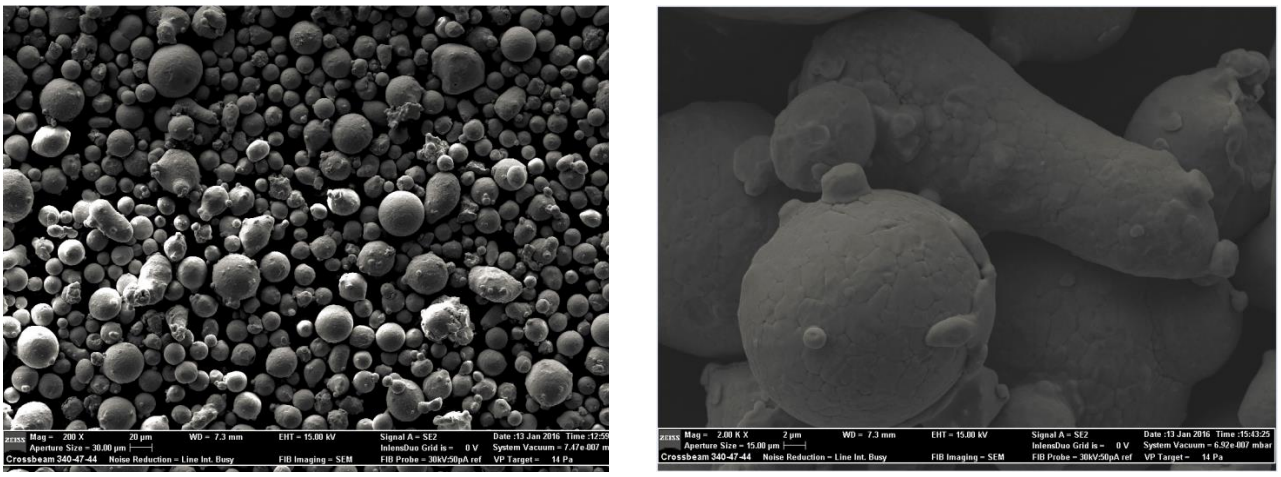
to včetně povrchové slupky. Těmto zrnům bude věnována pozornost dále při hodnocení struktury spečeného prášku.



Obr.57 *Metalografický výbrus zrna s hladkou povrchovou vrstvou*

Na výbrusech jednotlivých zrn byla změřena mikrotvrdost HV 0,01. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí 327–357 HV 0,01.

Pro doplnění informací byla provedena analýza prášku martenzitické oceli používaného jiným výrobcem zařízení pro 3D tisk, než je firma EOS. Z následujících obrázků je patrné, že jsou zrna z hlediska tvaru, chemického složení i struktury vnějšího pláště velmi podobná. Je tedy otázkou, zda jsou prášky od různých výrobců opravdu jedinečné a nezaměnitelné. Tuto skutečnost bohužel není v současné době možné ověřit prakticky, např. prostřednictvím mechanických zkoušek na vzorcích spečených konkurenčním práškem na zařízení RTI z důvodu jeho záručních podmínek. Proto bude ověřování probíhat na zařízení EOS M290 používaném ve výrobní firmě. Z časových důvodů nebudou získané výsledky součástí této práce.



Obr.58 *Prášek od jiného výrobce zařízení*

3.1.2 Hodnocení velikosti prášku MS1

Nejen kvalita prášku, ale také velikost jednotlivých zrn má významný vliv na výsledné vlastnosti tištěného materiálu, proto je důležité ověřit, zda je velikost zrn v zásobníku distribuována rovnoměrně. V rámci tohoto zkoumání bylo ověřováno, jak jsou prášky rozděleny dle velikosti (hmotnosti) a zda nemůže vlivem případné nerovnoměrnosti docházet k nestejným podmínkám tisku, a tedy i nehomogenity materiálu ve směru výstavby Z. Ověřování proběhlo na vzorcích:

1) z transportního barelu
2) ze zásobníku prášku ve stroji

Nabízí se dvě hypotézy, jak by mohlo rozložení vypadat:

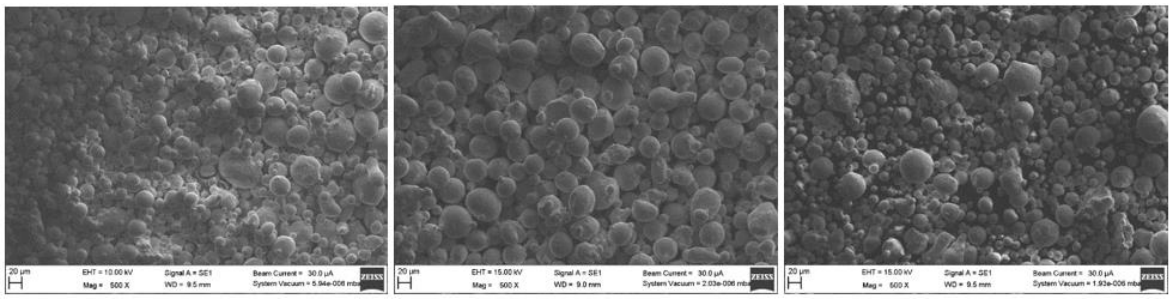
- Hypotéza 1: Větší zrnka prášku budou vlivem své hmotnosti propadávat hlouběji, zatímco lehčí, menší částice budou zůstávat blíže k povrchu.
- Hypotéza 2: Menší zrnka prášku budou propadávat prostory mezi většími částicemi a budou tak vyplňovat dutiny mezi jednotlivými většími kuličkami prášku.

3.1.2.1 Hodnocení rozložení velikosti zrn prášku v transportním barelu

Barel sloužící k přepravě prášků je vystaven při transportu četným vibracím, které by mohly způsobovat nerovnoměrné rozložení velikosti v této přepravní nádobě, viz Obr. 59. Pro ověření této hypotézy byly odebrány vzorky z povrchu – označeno jako hladina 1 (10kg prášku MS1 vyplní max. 1/2 barelu), cca z poloviny – označeno jako hladina 2 a ze dna barelu – označeno jako hladina 3, které byly podrobeny analýze velikosti částic.

Obr.59 *Transportní barel s označením hladin odběru*

Následující obrázky a tabulky ukazují výsledky tohoto srovnání. Z Obr. 60 jsou patrné drobné rozdíly ve velikosti zrn. Průměrná velikost zrn pro jednotlivé vzorky se pohybovala v rozmezí 15–24 mikrometrů. Ve všech případech byla velikost zrn v rámci jednoho vzorku nerovnoměrná, největší zrna měřila kolem 50 μm, nejmenší sotva několik mikrometrů.



Obr.60 *Vlevo – hladina 1; uprostřed – hladina 2; vpravo – hladina 3*

Naměřené hodnoty mikrotvrdosti se pohybovaly v rozmezí cca 300–326 HV 0,05. To lze považovat za běžný rozptyl hodnot tvrdosti. Přibližně stejnou mikrotvrdost vykazuje i materiál po vytištění i po rozpouštěcím žíhání.

Tab.5 Souhrn výsledků mikrotvrdosti a průměrných velikostí zrn

Vzorek	Průměrná tvrdost HV 0.05	Průměrná velikost zrna [µm]
Vzorek 1	314	20
Vzorek 2	318	24
Vzorek 3	307	15

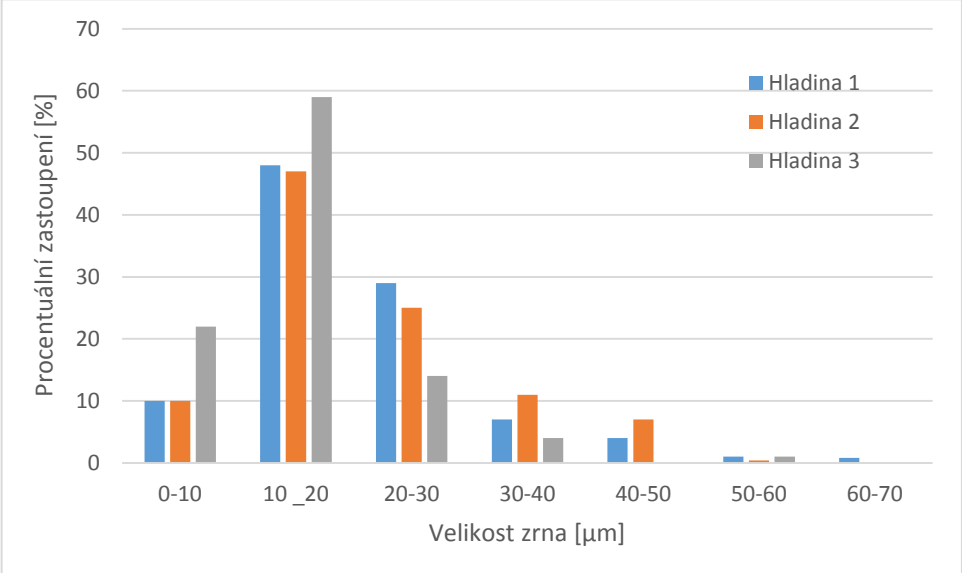
Výsledky tohoto srovnání neměly z důvodu velkého rozptylu velikosti částic uspokojivou vypovídací hodnotu, proto byly prášky dále analyzovány z hlediska četnosti jejich výskytu. Z každé hladiny bylo měřeno cca 250 zrn. Počet měřených zrn je ze statistického pohledu vyhovující. **Výsledky** tohoto měření, viz Obr. 61, **nepotvrzují tvrzení výrobce, že rozložení velikosti zrn odpovídá rozložení dle Gausse. Dále rovněž rozporují tvrzení, že 90 % velikosti tvoří částice o velikosti přibližně 50 µm. Významným zjištěním je i fakt, že prášek obsahuje zrna do 10 µm.** Toto zjištění posouvá riziko práce s těmito materiály na jinou úroveň. Takto malé částečky jsou velmi lehké a při práci s nimi, i přes veškeré dodržení zásad bezpečnosti práce, dochází k jejich víření, např. při pěchování v zásobníku nebo při vysávání. Tím se dostávají do prostoru mimo výrobní zařízení, kde při běžném provozu nelze zaručit z důvodu jejich hmotnosti usazení na podlaze a i po důkladném vysátí pracoviště, mohou poletovat v místnosti a riziko jejich vdechnutí po sundání ochranných pomůcek je poměrně vysoké. Navíc pro tuto velikost částic již nepostačuje kategorie doporučených filtrů jemnosti P3, jež je výrobcem doporučena z hlediska BOZP. Zůstává tedy otázkou, do které kategorie práce dle § 43 zákona č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví tato pracoviště zařadit. Ve vyhlášce č. 432/2003 Sb. jsou stanovena kritéria, faktory a limity pro zařazování prací do jedné ze čtyř kategorií, ale tato rizika zde přímo popsána nejsou.

Tab.6 Rozložení velikosti zrn v transportním barelu

	Hladina 1	Hladina 2	Hladina 3
Rozptyl velikostí [µm]	%	%	%
0-10	10	10	22
10-20	48	47	59
20-30	29	25	14
30-40	7	11	4
40-50	4	7	0
50-60	1	0,4	1

60-70	1	0	0

Výsledky tohoto experimentu ukazují, že rozložení částic v barelu není homogenní, viz Tab. 6. Lze říci, že se na dně transportního barelu nachází větší počet menších částic, než v ostatních hladinách a naopak se zde téměř nevyskytují částice o velikosti nad 40 µm. Je proto otázkou, jaké je rozložení velikosti zrn v zásobníku prášku, v němž dochází k mechanickému pěchování vstupního materiálu, popř. jaký vliv má tato zjištěná skutečnost na výsledné vlastnosti tisku ať už z pohledu struktury, nebo mechanických vlastností.



Obr.61 *Rozložení velikosti zrn v transportním barelu*

Největší podíl tvoří částice o velikosti 10–20 µm, od tohoto „vrcholu“ procentuální zastoupení velikosti klesá. Při proložení bodů v grafu od nejmenších částic do tohoto „vrcholu“ je výsledkem rostoucí exponenciální křivka a proložením křivky od „vrcholu“ směrem k větším částicím lze dostat klesající exponenciálu. Pro matematické popsání tohoto rozložení je proto třeba hledat fci, která má v první části kladnou a v druhé části zápornou exponenciální fci. Tuto podmínku splňuje Weibullovo rozdělení, jež je definováno následujícími rovnicemi, ze kterých je patrné, že první část je umocněná kladně, tedy exponenciálně roste, a druhá část má naopak zápornou mocninu, tedy exponenciálně klesá. Tvar a pozice vrcholu závisí na tom, kdy a jak rychle převáží záporná mocnina kladnou, tedy na parametrech této tříparametrické rovnice.

$$f(x) = \frac{b}{a}\left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x-c}{a}\right)^{b}}$$

kde:

a = parametr měřítka

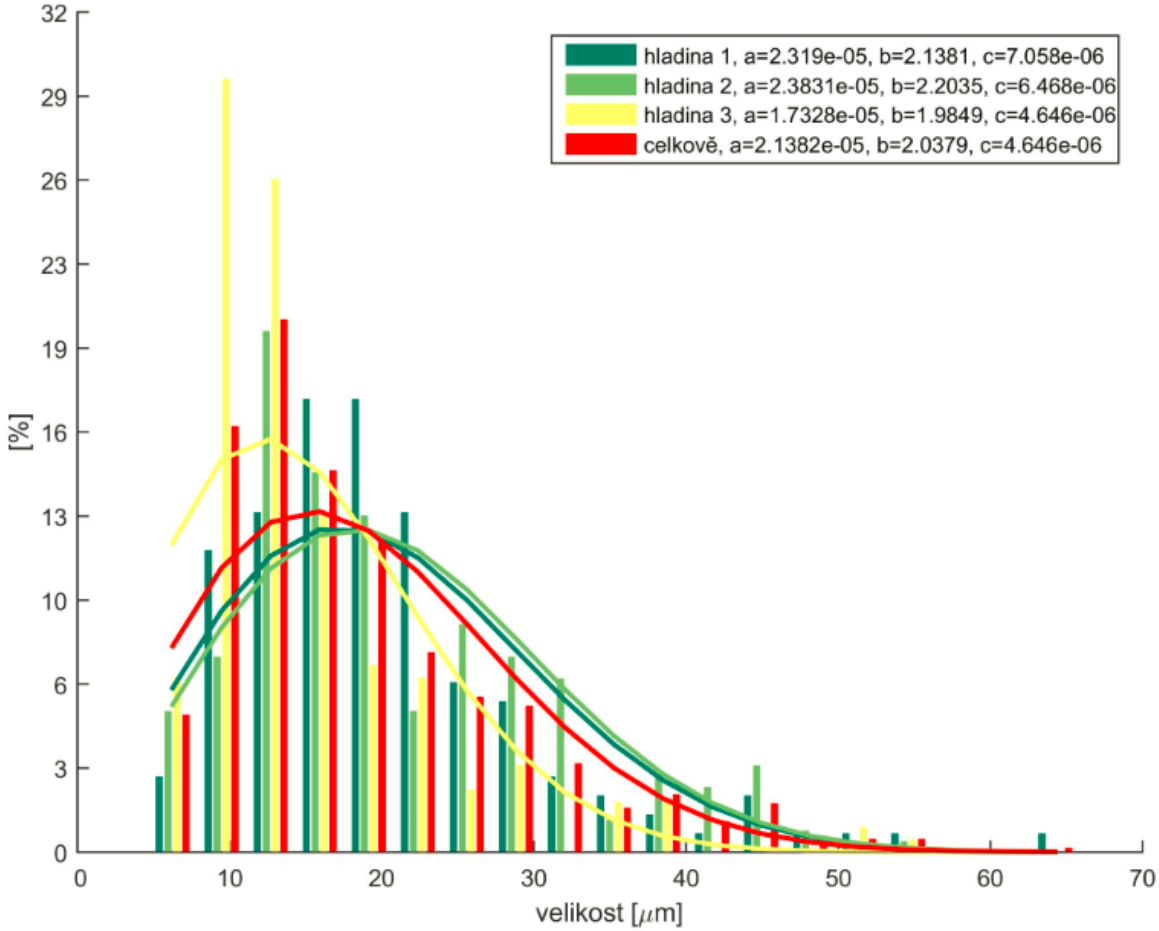
b = parametr tvaru (strmosti)

c = parametr posunutí

Pro nalezení parametrů a zobrazení této funkce byl využit SW Matlab. Pro vykreslení lze využít i uživatelsky jednodušší SW Excel řady MS Office, nalezení parametrů však tento SW neumožňuje.

Program (viz Příloha 3), vytvořený v pomocí SW Matlab, dle naměřených „surových" dat, najde parametry Weibullovy distribuční funkce pro jednotlivé hladiny odběru a pro průměrné hodnoty z celého sledovaného objemu a průběh této funkce vykreslí do grafu. Jednotlivé parametry jsou vypočteny s 95% koincidenčním intervalem spolehlivosti.

Nalezené parametry „a, b, c" jsou pak vyexportovány do grafu, viz Obr. 62 a do SW Excel, v němž je možné s nimi dále pracovat. Výsledné křivky hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení, včetně nalezených parametrů jsou zobrazeny v následujícím obrázku.



Obr.62 *Distribuční funkce Weibullova rozdělení pro jednotlivé hladiny a pro jejich průměr vygenerované programovacím jazykem SW Matlab*

Pro názorné zobrazení byla naměřená data rozdělena na 19 částí, z nichž byly vytvořeny histogramy (viz sloupce v grafu) znázorňující hustotu pravděpodobnosti zastoupení velikosti zrn. Červené sloupce jsou průměrem pro všechna data v daném intervalu, tzn. rozložení velikosti v rámci celého barelu.

Z tvaru těchto křivek je patrné nerovnoměrné rozvrstvení velikosti zrn v barelu. Především na dně nádoby je výrazně jiné rozložení velikosti. Vyskytuje se zde majoritní podíl (cca 59 %) zrn o velikosti kolem 15 μm, v hladině odběru 1 a 2 je zastoupení této velikosti přibližně 47 %. Naopak částic o velikosti kolem 35 μm obsahuje hladina 3 cca 4 %, zatímco výše zvolené hladiny přibližně 10 %. Křivky hladiny 1 a 2 jsou poměrně srovnané.

Z výše uvedených výsledků je možné v tomto případě potvrdit vyřčenou Hypotézu 2, podle níž lze očekávat, že menší zrna prášku budou propadávat prostory mezi většími částicemi a budou tak vyplňovat dutiny mezi jednotlivými většími kuličkami prášku.

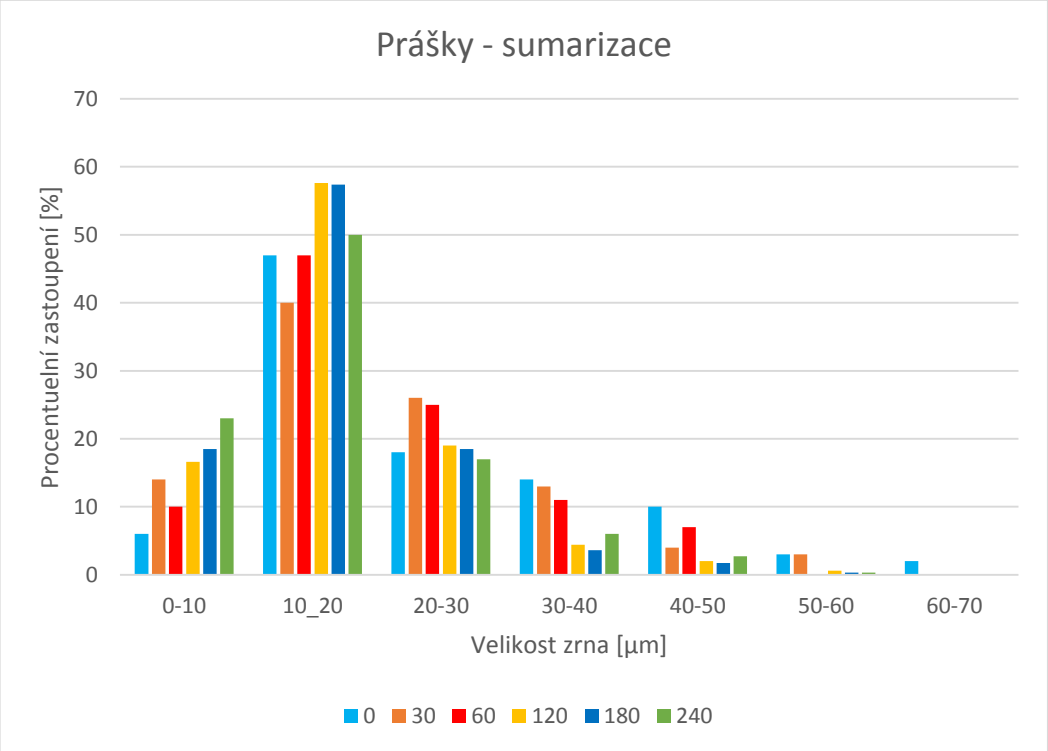
Pro zpřesnění a potvrzení výsledků budou dlouhodobě sledovány a vyhodnocovány jednotlivé výrobní várky prášků. Z výsledků bude v rámci dalšího výzkumu prášků vytvořena statistika, jejímž úkolem bude objektivně potvrdit výsledky tohoto výzkumu.

3.1.2.2 Hodnocení rozložení velikosti zrn prášku v zásobníku

Zásobník prášku v zařízení je dalším a zároveň posledním místem, kde lze ovlivnit rozložení velikosti prášku před vlastním nanesením na stavěcí platformu, tj. před samotným procesem laserového spékání. Prášek je zde pravidelně pěchován špachtlí, aby došlo k jeho zhutnění a byla tak co nejlépe zabezpečena po spečení struktura bez pórů. Rozložení v zásobníku a posléze na platformě je opačné. Částice, které jsou na povrchu v zásobníku, se na platformu nanáší jako první a slouží pro tisk podpor, popř. částí, které se většinou odřezávají, ale existují i aplikace, při nichž je výhodnější z různých důvodů finální výrobek stavět přímo na platformu, která je pak rozřezána a odstraněna.

Cílem experimentu hodnocení rozložení velikosti zrn prášku v zásobníku naplněném 240 mm upěchovaného prášku je ověřit, zda je rozložení velikosti rovnoměrné. Pokud by tomu tak nebylo, je pravděpodobné, že by se to mohlo projevit ve struktuře a mechanických vlastnostech tisku. Pro analýzu velikosti prášků byl proveden sběr vzorků z povrchu a v hloubkách 30, 60, 120, 180, 240 mm.

Výsledky z hlediska rozložení potvrzují výsledky předchozího experimentu a **vyvrací informace od výrobce, že je prášek velikostně rozdělen dle Gausse s většinovým podílem částic o velikosti 50 µm.** Velké procento zde opět tvoří prášky o velikosti do 10 µm.



Obr.63 *Rozložení velikosti zrn v transportním barelu*

Tento test rovněž podporuje hypotézu 2, že menší zrnka propadávají dutinami mezi většími, zaplňují tak dutiny a tvoří kompaktnější hmotu, viz Tab.7. S přibývající hloubkou ubývá procentuální podíl větších zrn, a to až do velikosti mezi 20–30 μm. Na dně zásobníku lze pozorovat drobnou odlišnost z hlediska zařazení velikosti. To je pravděpodobně způsobeno tím, že vyšší vrstvy se postupně obměňují přisypáváním nového prášku nebo jeho recyklací, kdežto dno zásobníku zůstává do kompletního vyčištění stroje (např. z důvodu změny materiálu prášku) stejné, neboť jak již bylo zmíněno, pro kontinuální proces musí být v zásobníku 3x větší výška prášku než je finální výška spečeného dílu.

Tab.7 Rozložení velikosti prášku v zásobníku

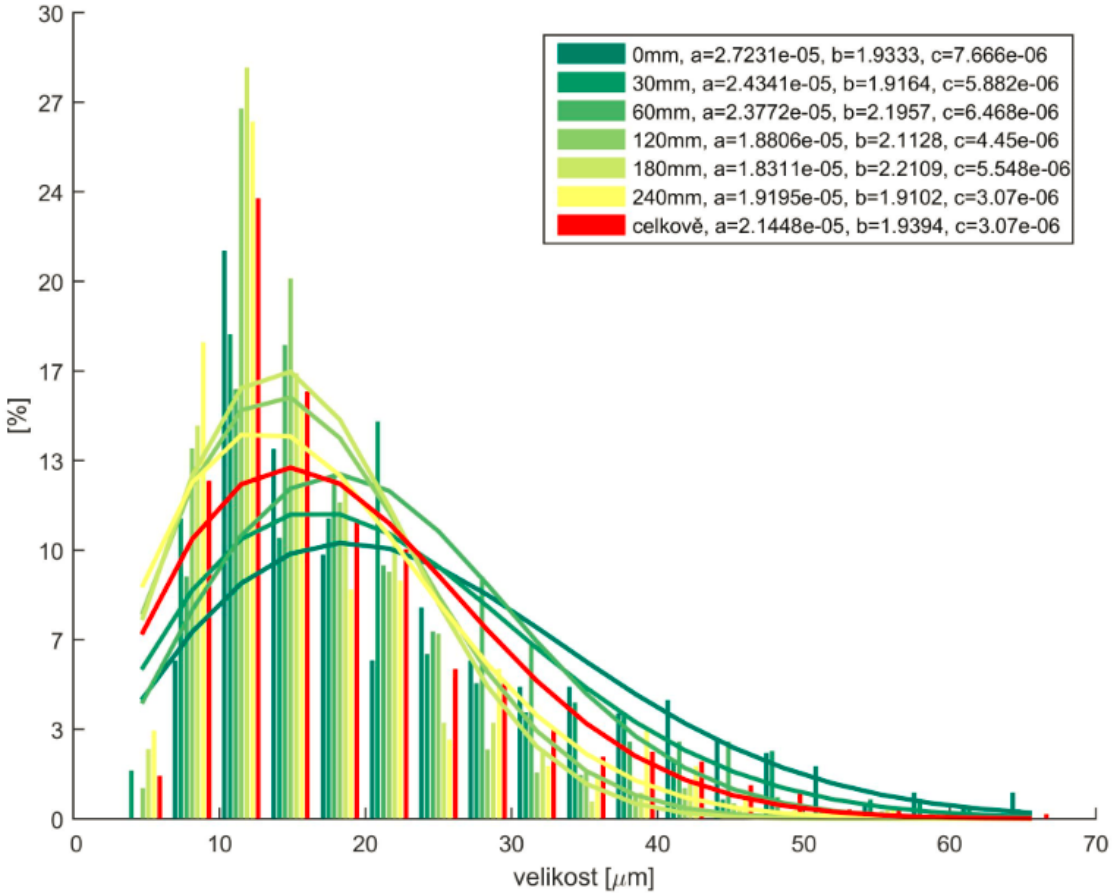
	Hloubka odběru [mm]					
	0	30	60	120	180	240
Rozptyl velikostí [μm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0–10	6	14	10	16.6	18.5	23
10–20	47	40	47	57.6	57.4	50
20–30	18	26	25	19	18.5	17
30–40	14	13	11	4.4	3.6	6
40–50	10	4	7	2	1.7	2.7
50–60	3	3	0,4	0.6	0.3	0.3
60–70	2	0	0	0	0	0

Nejvyšší díly pro tisk jsou z hlediska hospodárnosti práce s práškem umisťovány do části platformy blízko k zásobníku a po spečení menších dílů je možné snížit množství nanášeného prášku, čímž na jednu stranu dojde k úspoře prášku, ale na druhou stranu nedochází k jeho obměně v celém objemu zásobníku.

Pomocí programu Prášky byly vypočteny parametry „a, b, c“ pro jednotlivé hloubky odběru a průměr. Z distribučních křivek hustoty pravděpodobnosti na Obr. 64 je vidět, že s rostoucí hloubkou zastoupení větších velikostí klesá (křivka se „zužuje“). Od hloubky odběru cca 60 mm se postupně částice nad 45 μm přestávají objevovat.

Z grafu je vidět, že rovnoměrnější zastoupení částic jednotlivých velikostí je v povrchových vrstvách zásobníku. Tento prášek se však z velké části spotřebovává na stavbu podpůrných konstrukcí, které jsou od finálního výrobku v rámci postprocesingu odstraněny. Pro představu - naplnění zásobníku 60 mm prášku představuje při 100 % zaplňování platformy práškem (dosing factor = 100 %) výšku tisku 46 mm. Při každém tisku je však snaha na stavěcí platformu umístit maximální počet dílů z důvodu snižování nákladů na jeden díl, z toho plyne nutnost zvýšit nastavení Dosing factoru (množství nanášeného prášku), tedy reálná výška tisku se snižuje.

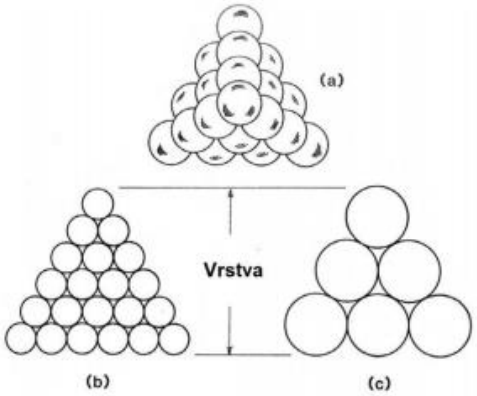
Specifické rozložení má pak samotné dno zásobníku. To je dáno výše zmíněným důvodem, že v této části nedochází k pravidelné obměně prášku.



Obr.64 *Distribuční funkce Weibullova rozdělení pro jednotlivé hladiny a pro jejich průměr vygenerované programovacím jazykem SW Matlab*

3.1.2.3 Sumarizace výsledků hodnocení rozložení velikosti prášku

Výše uvedené experimenty vyvrací tvrzení výrobce zařízení, že distribuční rozložení velikosti je dle Gausse a že 90% podíl tvoří částice o velikosti 50 µm. V obou případech se potvrdila Hypotéza 2 - menší zrnka prášku propadávají prostory mezi většími částicemi, vyplňují tak dutiny a vytváří kompaktní hmotu s minimem pórů. To v konečné fázi ovlivňuje proces tisku. Autoři zdroje [62] podporují myšlenku nerovnoměrného rozdělení velikosti právě z důvodu vyplnění dutin a zkompaktnění materiálu, ale bohužel neřeší velikost ani materiál prášku konkrétně.



Obr.65 *Idealizovaná velikost zrnitosti prášku – a) prášek ze dvou hrubostí zrn; b) menší hrubost zrn, c) větší hrubost zrn [3,62]*

Je otázkou, zda navzdory tomu, že prášek neodpovídá deklarovaným hodnotám, splňuje podmínky výroby kvalitní, nepórovité struktury s mechanickými vlastnostmi, které uvádí výrobce a které by měly být srovnatelné s konvenčně vyráběnou ocelí 1.2709. Tato skutečnost bude dále ověřována.

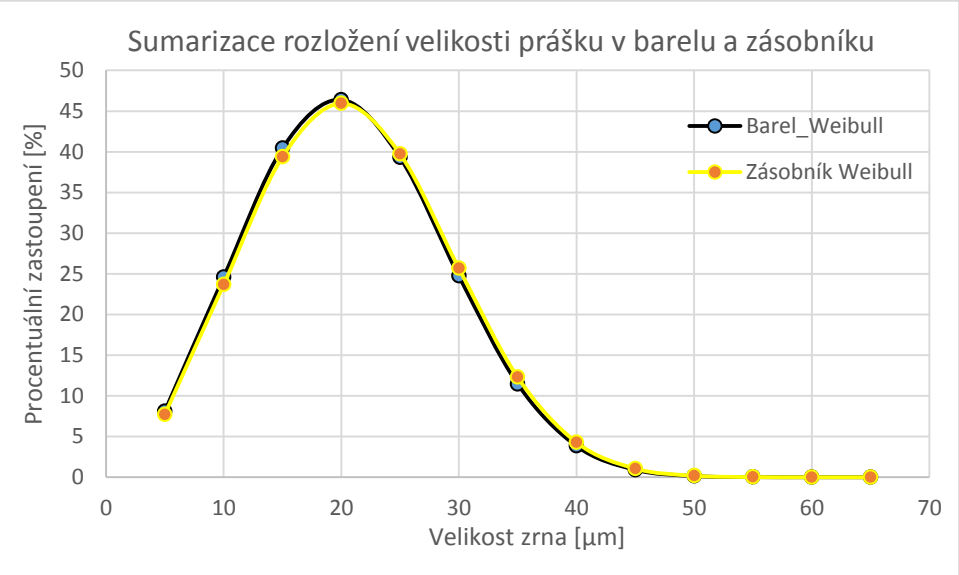
Dalším závěrem je, že **prášky obsahují kolem 15 % celkového podílu zrn o velikosti do 10 µm**. To je patrné z následující tabulky, která sumárně hodnotí procentuální zastoupení průměrných velikostí v zásobníku a v transportním barelu. Podíly jednotlivých velikostí jsou téměř totožné a to i přes to, že v zásobníku jsou prášky z různých dodávek, zatímco v barelu je prášek nový. Z tohoto minimálního rozdílu je zřejmá přesnost vytvořené hodnoticí metody.

Přibližně 70 % sledovaného objemu tvoří prášky o velikosti 10–30 µm, cca 12 % tvoří prášky o velikosti 30–50 µm a zbývající cca 2 % obsahují prášky o velikosti 50–70 µm.

Tab.8 Rozloženi velikosti prášku sumárně v barelu a v zásobníku

Rozptyl velikostí [µm]	Barel celkově [%]	Zásobník celkově [%]
0–10	14,0	14.7
10–20	51,3	50.5
20–30	22,7	20.6
30–40	7,3	8.7
40–50	3,7	3.9
50–60	0,8	1.3
60–70	0,3	0.3

Následující graf znázorňuje rozložení pomocí Weibullovy distribuční funkce celkově pro zásobník a pro transportní barel. Z těchto překrývajících se křivek je rovněž patrná velká přesnost hodnoticí metody.



Obr.66 *Weibullova distribuční funkce celkově pro zásobník a pro transportní barel*

3.1.3 Interní metodika hodnocení distribučního rozložení velikosti prášku

Pro hodnocení distribučního rozložení velikosti zrn prášku ve sledovaném objemu byla na základě potřeby monitorování strukturních změn a mechanických vlastností (viz dále) stanovena metodika, vyplývající z výzkumu hodnocení rozložení velikosti prášků martenziticky vytvrditelné oceli MS1 v transportním barelu a v zásobníku prášku.

3.1.3.1 Odběr vzorků

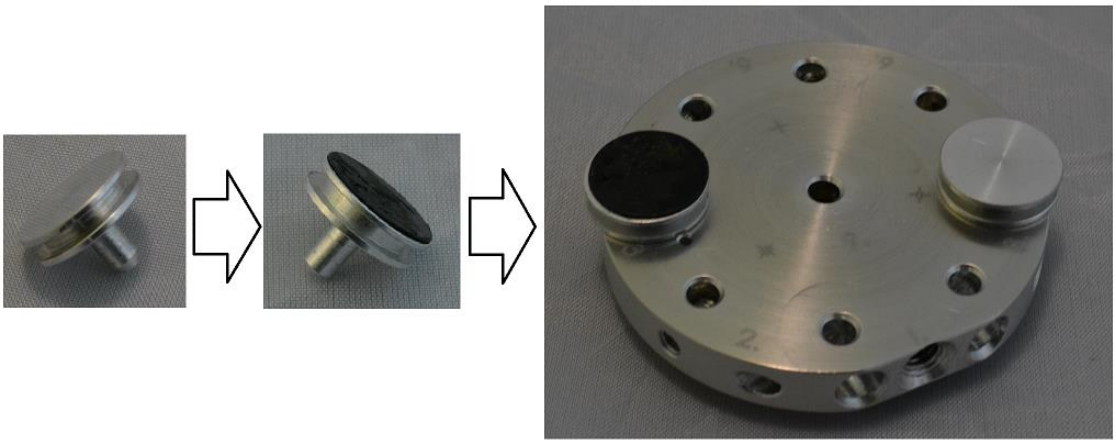
Pro věrohodné hodnocení rozložení velikosti v rámci celého sledovaného objemu je nutné provést odběr v několika výškových hladinách, přičemž je nutné počítat s tím, že odběr vzorku ze dna bude mírně vybočovat z trendu vývoje. Odběr je nutné provádět v souladu s pokyny o manipulaci s práškem dle manuálu výrobce.

Při odebírání vzorků nesmí být prášek z vyšších hladin „odhrabáván“, ale prášek, který je nad aktuálně odebíranou hladinou, musí být přemisťován do nádob k tomu určených. Pokud by nebylo toto pravidlo dodrženo, mohlo by dojít k víření prášku, to je vzhledem k zásadám při práci s práškem zakázáno, a zároveň by docházelo k přemisťování prášku v rámci jednotlivých hladin a výsledky měření by tak byly zkresleny.

Z povrchu aktuální hladiny lopatkou určenou k práci s prášky je nutné odebrat vzorek v takovém množství, které zabezpečí spolehlivé měření i jeho případné opakování (cca jedna čajová lžička). Po předepsaném odběru vzorků musí dojít k jeho nezaměnitelnému a trvalému označení. Odebrané vzorky je nutné chránit před vlhkostí.

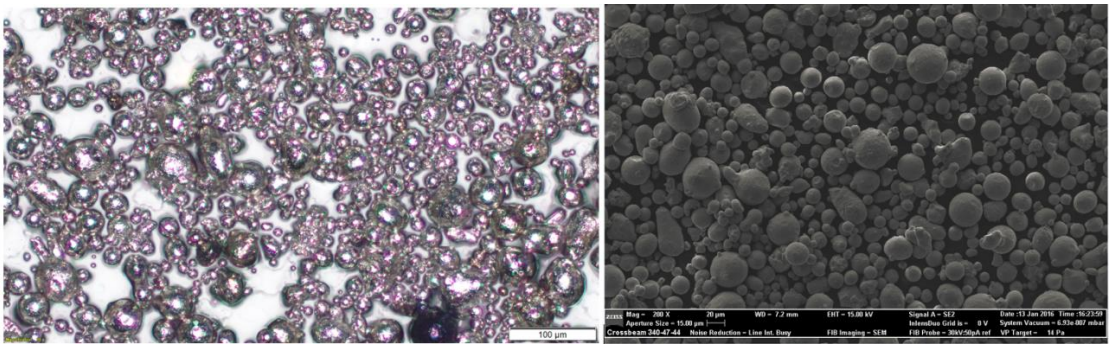
3.1.3.2 Příprava, scanování a měření vzorků

Pomocí speciálního přípravku se malé množství prášku rozsype na speciální stub o průměru 12 mm, viz Obr. 67, na němž je nalepena oboustranná elektricky vodivá lepicí páska. Pomocí této pásky dojde k uchycení částic prášku, které jsou ještě mírně vtlačeny do pásky, aby nedošlo k jejich rozptýlení v komoře mikroskopu a nedocházelo k zanášení filtrů. Z toho důvodu je nutné ještě před samotným vložením provést ofouknutí speciálním přípravkem! Tím je zajištěno odstranění částic, které nejsou dostatečně připevněny. Poté je stub se vzorkem upevněn do stolu mikroskopu.



Obr.67 *Stub → stub polepený oboustrannou lepicí páskou → stub vložený do stolku mikroskopu*

Pro věrohodné a objektivní hodnocení velikosti prášků je nutné použít elektronový řádkovací mikroskop, popř. zařízení, které má dostatečnou hloubku ostrosti při dostatečném rozlišení pro zachycení částic všech velikostí v jednom obraze. Světelný mikroskop není pro spolehlivé měření vhodný, právě z důvodu nedostatečné hloubky ostrosti. Bylo provedeno srovnávací měření, ale bohužel touto metodou nebyly zachyceny nejmenší částice, a tím došlo ke zkreslení výsledků.

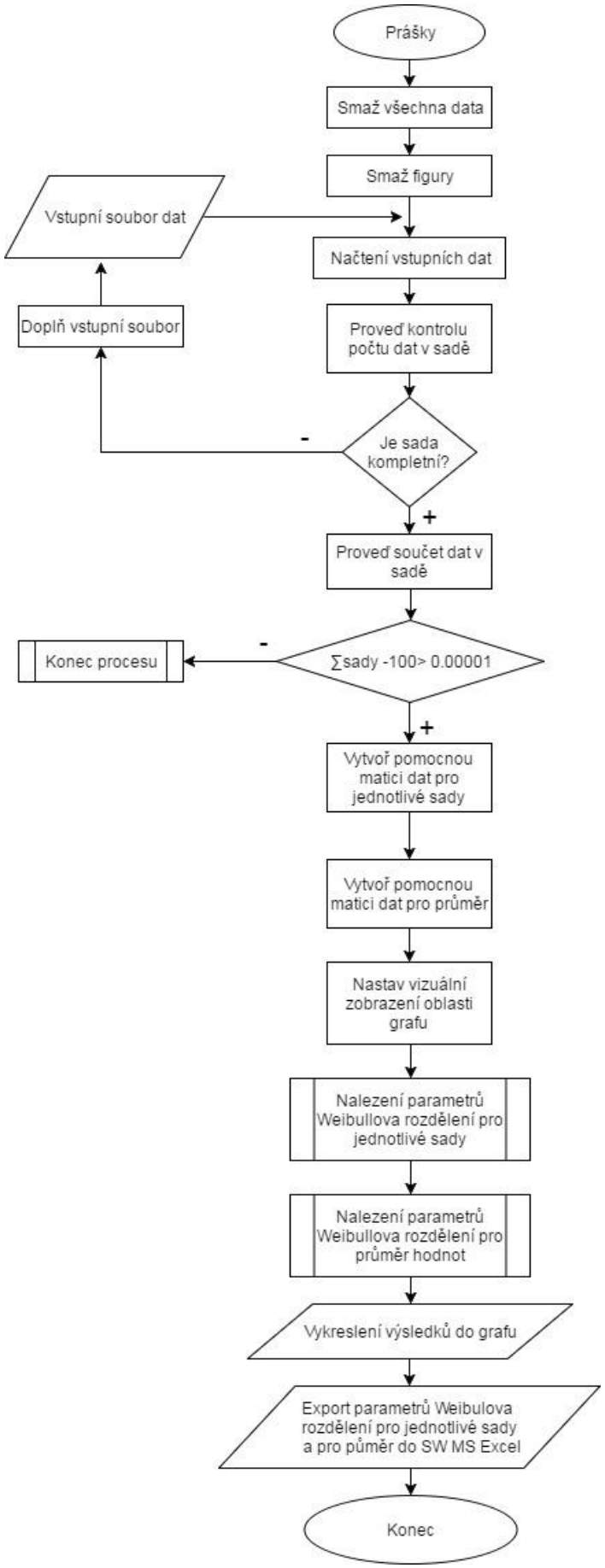


Obr.68 *Vlevo – snímek ze světelného mikroskopu, vpravo – snímek z elektronového řádkovacího mikroskopu*

Pro další hodnocení jsou provedeny scany částic při zvětšení 500x až 1000x, které jsou uloženy s měřítky do formátu .jpg. Hodnotit velikosti lze v jakémkoliv SW pro obrazové analýzy, ve kterém musí v první fázi dojít k nakalibrování měřítka. V další fázi dochází za použití speciálního programu Metalografické laboratoře – Zrno k odměřování velikostí jednotlivých částic. V průběhu odměřování jsou zaznamenávány souřadnice dvojice snímaných bodů, které jsou automaticky exportovány do MS Excel, kde jsou vzájemně odečteny, a absolutní hodnota tohoto součtu je pak velikost měřené vzdálenosti, tedy průměru zrna. Minimální počet měřených částic je 250, tj. ze statistického hlediska dostatečně vypovídající. Naměřené hodnoty jsou řazeny dle velikosti a následně je z nich vyhodnocen počet částic ve zvoleném intervalu, tzn., jsou připravena data pro vytvoření histogramů četnosti výskytu. Tento proces je proveden pro každou jednotlivou hladinu odběru, tzn., že v případě hodnocení rozložení zrn v zásobníku bylo proměřeno minimálně 1500 zrn a to je statisticky dostatečně vypovídající hodnota.

3.1.3.3 Hodnocení distribučního rozložení

Hodnoty velikostí zrn pro jednotlivé hladiny odběru se zaznamenávají do SW Excel. Tyto soubory jsou vstupem pro program Prášky, jehož jednotlivé kroky jsou shrnuty v následujícím vývojovém diagramu.


Prášky
Smaž všechna data
Smaž figury
Vstupní soubor dat
Načtení vstupních dat
Doplň vstupní soubor
Proveď kontrolu počtu dat v sadě
Je sada kompletní?
-
+
Proveď součet dat v sadě
Konec procesu
-
∑sady -100> 0.00001
+
Vytvoř pomocnou matici dat pro jednotlivé sady
Vytvoř pomocnou matici dat pro průměr
Nastav vizuální zobrazení oblasti grafu
Nalezení parametrů Weibullova rozdělení pro jednotlivé sady
Nalezení parametrů Weibullova rozdělení pro průměr hodnot
Vykreslení výsledků do grafu
Export parametrů Weibulova rozdělení pro jednotlivé sady a pro půměr do SW MS Excel
Konec

3.1.3.4 Práce s výsledky měření

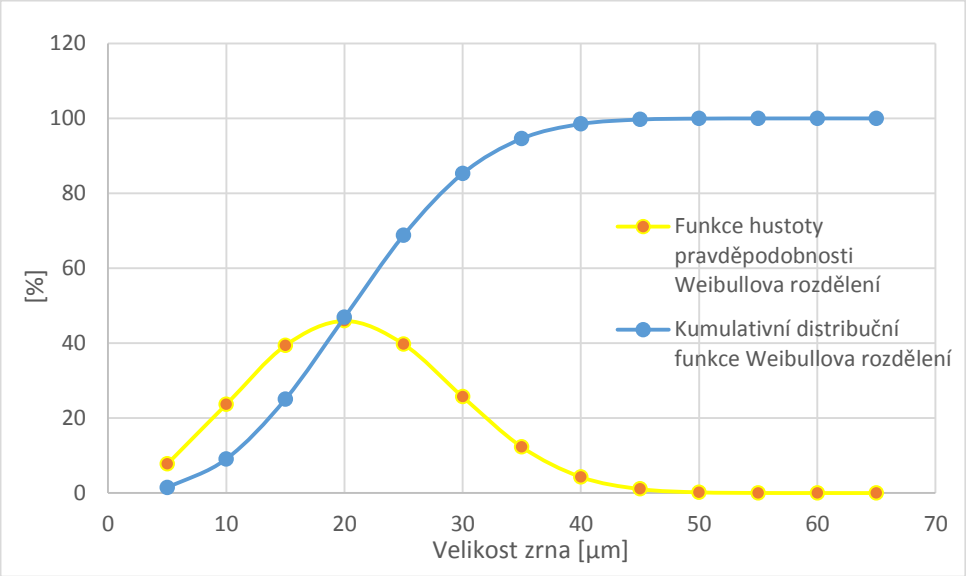
Parametry Weibulovy distribuční funkce pro jednotlivé hladiny a celkový průměr zkoumaného objemu jsou za pomoci tohoto stěžejního programu vyexportovány do MS Excel, v němž je možné s nimi dále pracovat. Pomocí vzorce statistické funkce WEIBULL.DIST

=WEIBULL.DIST(X;parametr a;parametr b;NEPRAVDA, popř.PRAVDA)

lze zadáním vyexportovaných parametrů vytvořit při zadání do vzorce:

PRAVDA - Kumulativní distribuční funkci Weibullova rozdělení za výše uvedených podmínek (X, a, b)

NEPRAVDA - Funkci hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení za výše uvedených podmínek (X, a, b)



Obr.69 *Příklad zobrazení kumulativní distribuční funkce (PRAVDA) a funkce hustoty pravděpodobnosti (NEPRAVDA) Weibullova rozdělení*

Výsledkem měření je tedy křivka hustoty pravděpodobnosti distribuční funkce, ze které lze jednoduše zjistit procentuální zastoupení velikostí jednotlivých částic. To je stěžejním vstupem pro další analýzy vytištěného dílu. Bez této znalosti nemůže být prováděno objektivní zkoumání procesu tisku a jeho parametrů.

3.1.3.5 Použití interní metodiky

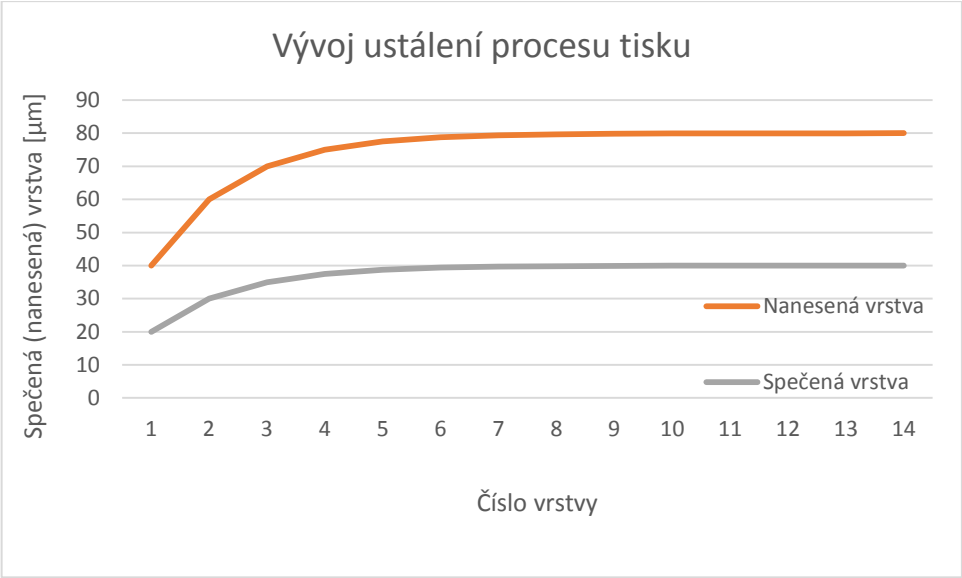
Tato metodika smí být použita pro hodnocení rozložení velikosti částic v určeném objemu jen **pro prášky, v nichž většinový podíl tvoří kulovité částice, popř. spojené kulovité částice**, tzn. pro prášky vyráběné metodou gas atomization, VIM gas atomization, rotating electrode proces a plasma atomization. Tato metodika nesmí být použita za účelem získání věrohodných výsledků při hodnocení prášků, v nichž převládají nepravidelné tvary částic, jako např. u výrobní metody HDH (The hydride-dehydride method).

3.1.4 Proces spékání jednotlivých vrstev prášku

Materiál MS1 lze na zařízení EOS M290 tisknout při tloušťce nanášené vrstvy 20µm, 40µm a 50µm. Jak bylo uvedeno výše, velikost prášků se pohybuje od několika mikrometrů do cca 70 µm. Co se tedy děje při spékání vrstvy, která je menší než velikost některých nanášených částic? Vysvětlení ukazuje následující obrázek a tabulka. Ukázkový příklad bude popsán na procesu s tloušťkou vrstvy 40 µm. V první vrstvě je naneseno 40 µm prášku. Velmi často není platforma potažena monolitní vrstvou, ale je v ní drobná „rýha“ (stopa), to nastává v případě, kdy se mezi platformou a nanášecím pravítkem vyskytne zrno o velikosti větší, než je tloušťka vrstvy, tj. hodnota, o kterou sjede platforma v záporném směru osy Z. Po přednastaveném dvojitém spečení první vrstvy (dle doporučení výrobce z důvodu kvalitního propojení dílu s platformou) je v tomto případě výška spečené vrstvy 20 µm. Při druhé vrstvě poklesne stavěcí platforma o předepsaných 40 µm, tím pádem musí dojít k nanesení vrstvy prášku o tl. 60µm, tato vrstva se speče na 30 µm (celková spečená výška = 50 µm). Tímto způsobem dochází k postupnému přírůstku nanášeného prášku (tl. spečené vrstvy) až do ustálení na cca 80 µm (40 µm), respektive lze říci, s ohledem na přesnost nastavení nanášecího pravítka 5µm, že cca od 7. vrstvy dojde ke stabilizaci procesu nanášení a spékání konstantní tloušťky vrstvy. To vysvětluje, proč může prášek obsahovat zrna větší než je tl. spékané vrstvy. Výsledná výška tisku je o tl. jedné vrstvy menší, než je velikost poklesu stavěcí platformy. Tento poznatek však nemá při použití podpůrných struktur vliv na skutečnou výšku vyrobené součásti, neboť dojde pouze k tomu, že se stavěný díl posune o cca o tl. jedné vrstvy směrem k platformě. Tato skutečnost je však nevýznamná vzhledem k tomu, že díly jsou z platformy oddělovány ve většině případů pilovým pásem a musí být tedy nastaven dostatečný přídavek výšky podpor.

Tab.9 Vývoj ustálení procesu tisku

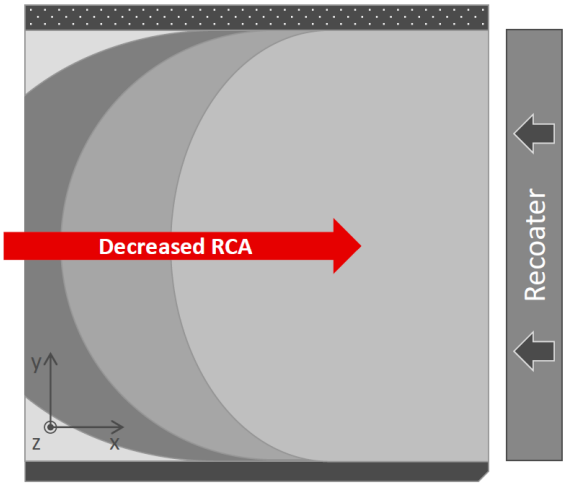
Vrstva č.	Sjetí platformy [µm]	Nanesená vrstva prášku [µm]	Spečená vrstva n [µm]	Spečená výška [µm]
0	0	0	0	0
1	40	40	20	20
2	80	60	30	50
3	120	70	35	85
4	160	75	37,5	122,5
5	200	77,5	38,75	161,25
6	240	78,75	39,375	200,625
7	280	79,375	39,6875	240,3125
8	320	79,6875	39,84375	280,15625
9	360	79,84375	39,921875	320,078125
10	400	79,921875	39,9609375	360,0390625
11	440	79,9609375	39,98046875	400,0195313
12	480	79,98046875	39,99023438	440,0097656
13	520	79,99023437	39,99511719	480,0048828
14	560	79,99511718	39,99755859	520,0024414



Obr.70 *Vývoj ustálení procesu tisku při spékání MS1 defaultními parametry MS1_040_110_performanceM291*

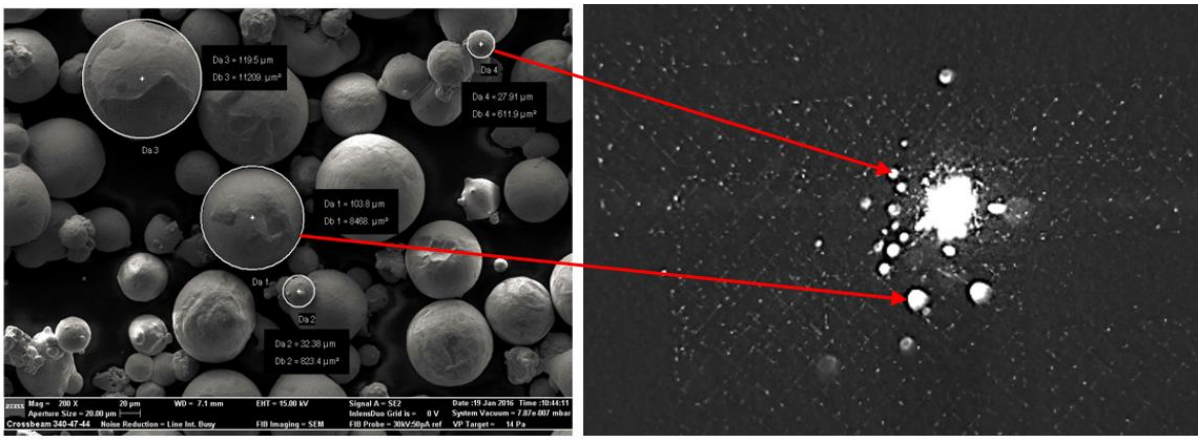
Z výše popsaného procesu a z rozdílné půdorysné velikosti stavěcí platformy (255 x 255 mm) a zásobníku prášku (250 x 200 mm) je zřejmé, že zásobník prášku musí při spečení jedné vrstvy vyjet o přírůstek větší než je tl. vrstvy, resp. přírůstek sjetí platformy. Z těchto skutečností vyplývá doporučení výrobce, že výška spěchovaného prášku v zásobníku musí být pro zajištění kontinuálního procesu rovna minimálně trojnásobku maximální výšky součásti.

Již bylo naznačeno, že množství prášku nanášeného na platformu lze ovlivňovat v závislosti na poloze součástí a na jejich výšce. Je-li to možné, umisťují se nejvyšší tištěné součásti z dané výrobní várky do prostoru k zásobníku prášku, neboť lze po spečení nižších součástí zredukovat množství nanášeného prášku, viz Obr. 71, pomocí funkce Dosing Factor nastavované přímo ve stroji s ohledem na aktuální situaci procesu (velikost spékané plochy).



Obr.71 *Ukázka nastavení funkce Dosing factor*

Proces spékání jednotlivých vrstev prášku MS1 byl zaznamenáván vysokorychlostní kamerou. Výsledky tohoto sledování potvrzují, že během tisku dochází ke vzniku částic kulového tvaru různých velikostí, viz Obr. 72, které byly popsány v kapitole 3.1.1 Hodnocení tvaru a struktury prášku MS1 jako částice vznikající v průběhu tisku bez šupinkové povrchové struktury „sloní kůže“.



Obr.72 *Kulovité částice vznikající při procesu spékání – vlevo – scan ze SEM; vpravo - zachyceno vysokorychlostní kamerou*

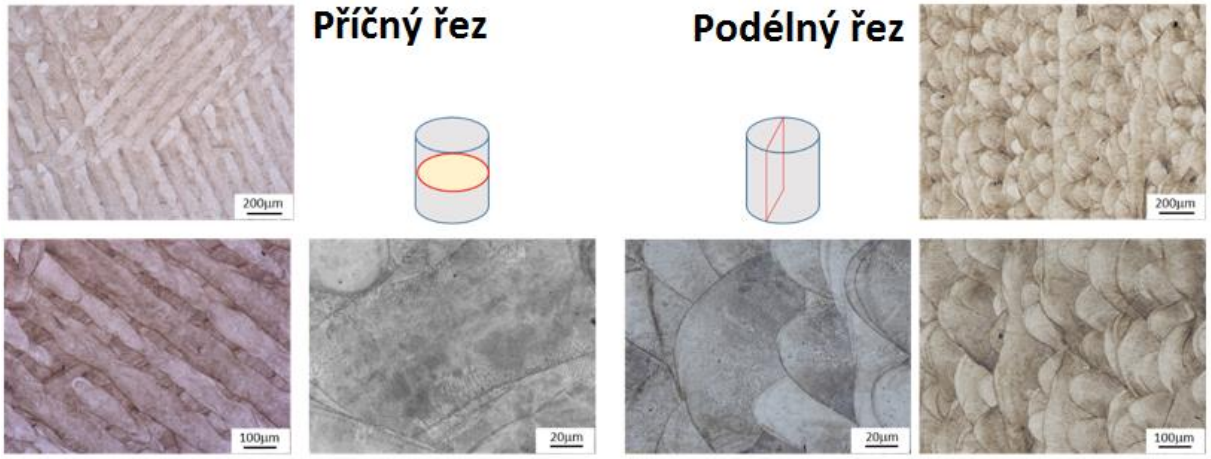
Je tedy otázkou, jak se tyto částice, které při recyklaci prášku propadnou sítem, chovají při dalších procesech tisku. Tato skutečnost byla dále ověřována – viz další kapitoly.

3.1.5 Struktura a mikrostruktura materiálu po tisku

Výsledkem procesu tisku je zcela jedinečná struktura, která je důsledkem vysoké rychlosti ohřevu a následného ochlazení, to může vést k několika neobvyklým efektům:

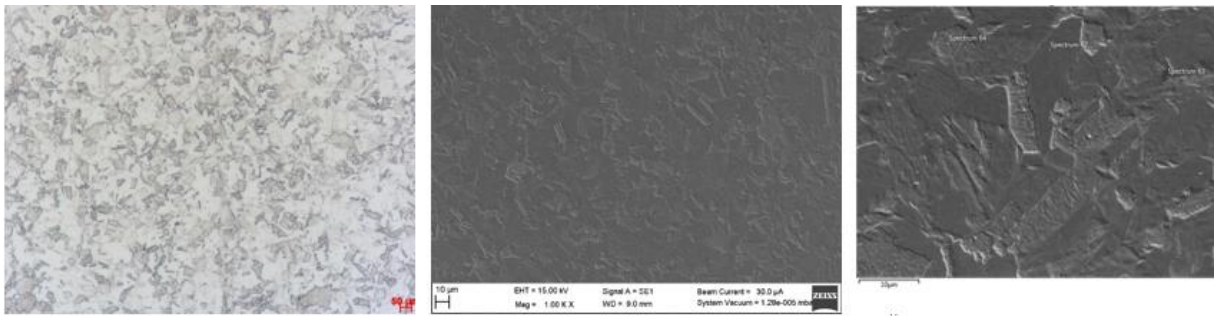
- potlačení difuzně kontrolovaných transformací pevných fází
- tvorba přesycených roztoků a nerovnovážných fází
- tvorba velmi jemné mikrostruktury s malými elementárními segregacemi
- tvorba velmi jemných částic sekundární fáze, jako jsou vměstky a karbidy

Při spékání martenzitické oceli W-Nr. 1.2709 (DIN X3NiCoMoTi 18-9-5) obchodně označované jako MS1 vzniká velmi jemná struktura rozdílná v podélném a příčném řezu, viz Obr. 73 pořízený ze světelného mikroskopu. Příčný řez ukazuje stopy laseru o šířce cca 100 µm. Průřez této stopy je vidět v podélném řezu, kde zakřivené plochy odpovídají spečené oblasti jedné vrstvy. Mikrotvrdost tištěného vzorku měřená v příčném řezu je homogenní v celém vzorku a dosahuje průměrné hodnoty 365 HV 0,1.



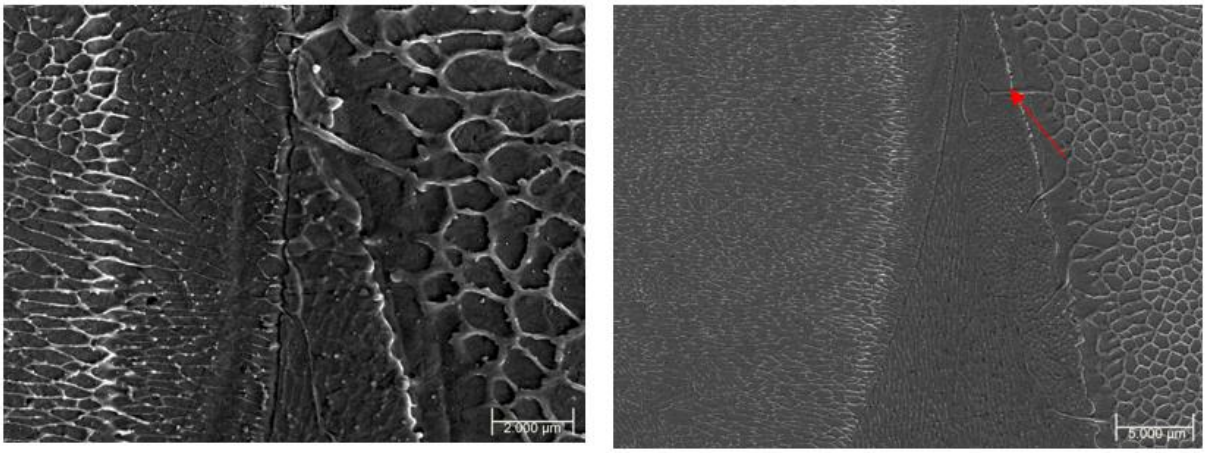
Obr.73 *Porovnání mikrostruktury tištěné martenzitické oceli v příčném a podélném směru [63]*

Mikrostruktury po 3D tisku jsou zcela odlišné od mikrostruktur konvenčně vyráběného materiálu, viz Obr. 74.



Obr.74 *Feriticko-perlitická struktura vzorku 3*

Problematice mikrostruktury aditivně vyráběných nástrojových ocelí se věnuje jen velmi málo výzkumných publikací. Analýza provedená na elektronovém řádkovacím mikroskopu (SEM) ukázala, že se v mikrostruktuře po tisku neobjevují stopy bainitu, perlitu ani martenzitických lamel. Mikrostruktura se skládala z buněk tuhého roztoku s poměrně stabilním chemickým složením a z buněčných hranic, viz Obr. 75.



Obr.75 *Vlevo – velmi jemné bílé částice uvnitř buněk a na jejich rozhraní; vpravo – Šipka ukazuje na růst buněčné hraniční fáze do sousedního prostoru [63].*

Předpokládá se, že tato jemná buněčná struktura je příčinou vysoké pevnosti a tvrdosti této oceli [68]. Buněčná morfologie tuhnutí se ve vysokopevných ocelích po konvenčním tepelném zpracování běžně nevyskytuje. Fáze umístěná v buněčné hranici má poněkud odlišné chemické složení než matrice. Vzhledem ke kontaminaci povrchu vzorku uhlíkem při přípravě metalografických vzorků není možné kontrolovat rozložení uhlíku v různých částech mikrostruktury přímo na povrchu vzorku. Chemické složení matrice a buněčné hranice bylo měřeno v několika oblastech na obou průřezech. Výsledné průměrné chemické složení matrice je cca 68 % Fe, 15 % Ni, 10 % Co, 4,5 % Mo. Fáze na rozhraní buněk byla bohatší na Ni (okolo 21 %) a Mo (5 %). V několika oblastech příčného řezu byly pozorovány malé sférické částice s chemickým složením mírně odlišným od hranic matrice a buněk, které měly vyšší procento kobaltu a titanu 58 % Fe, 18,5 % Ni,13 % Co, 6 % Mo, 1,6 % Ti. Větší částice byly nalezeny pouze uvnitř buněk, zatímco velmi jemné disperze těchto částic byly umístěny podél hranic buněk, jakož i uvnitř rovnoměrně axiálních buněk (Obr. 75 vlevo). Mapování prvků v několika buňkách neodhalilo chemickou segregaci žádných slitin, všechny prvky byly v materiálu rovnoměrně rozloženy. Tvar a velikost buněk se v různých oblastech liší. Obvykle jsou tyto oblasti odděleny ostrým přechodem.

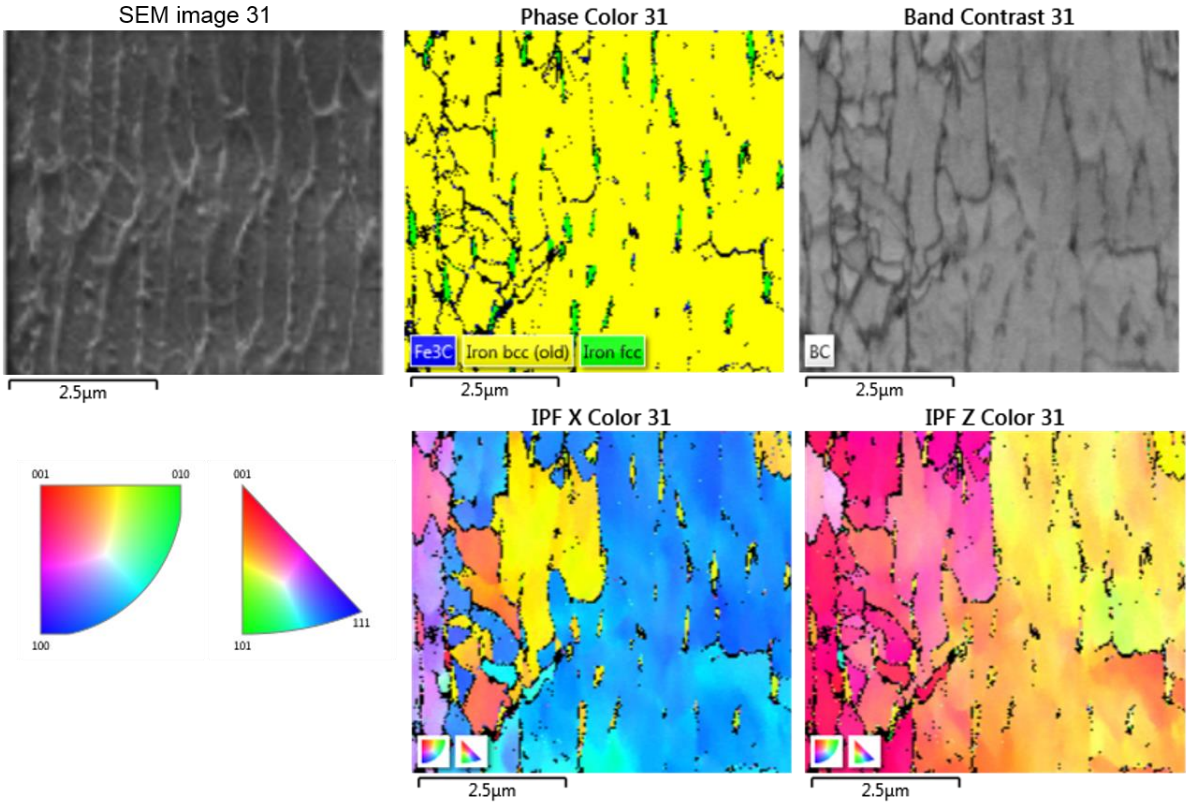
Rovnoosé buňky měly různé velikosti a vždy vytvářely větší oblasti buněk se stejnou geometrií, které byly viditelně oddělené od jiných oblastí s různou velikostí a morfologií. Bylo pozorováno, že hraniční fáze na několika místech prorůstaly do sousedních oblastí (Obr. 75 vlevo). Podobné jevy byly nalezeny v jiných studiích práškových vysokopevných ocelí s martenzitickou mikrostrukturou. Tato skutečnost naznačuje, že kompozice gradientu neinterferuje s vývojem martenzitu bloků a rostoucí martenzit proto není přerušen buněčnými hranicemi [66, 67].

Na elektronovém mikroskopu byly ojediněle pozorovány defekty ve formě pórů o velikosti 1–3 μm a zřídka i malé nespečené částice, viz Obr.76 **Celkově struktura vykazuje velmi nízkou pórovitost cca 1,5 %. Výrobce udává pórovitost materiálu jen 0,03 %.**

Výjimečně se ve struktuře vyskytla nespečená částice prášku. S velkou pravděpodobností se jednalo o menší částici vzniklou v procesu tisku, která při přesívání prášku propadla do zásobníku. V další kapitole bude sledováno, zda mohou mít tyto „nečistoty“ vliv na mechanické vlastnosti tištěného dílu.

Obr.76 *Nespečená částice [69]*

Analýzou EBSD bylo zjištěno, že matrice oceli tvoří feritická BCC mřížka bez stopy martenzitických lamel nebo jehlic. V prostoru buněčných hranic byla detekována dvě procenta FCC austenitu spolu s menším množstvím cementitu ve formě izolovaných bodů, viz Obr. 77. I když byl austenit detekován pouze v některých částech buněčných hranic, dá se předpokládat, že je skutečný podíl austenitu v této oblasti větší. Kempen a spol. [64] uvádí asi 6 % austenitu naměřených pomocí rentgenové difrakční analýzy fáze v aditivně vyrobené součásti z oceli 1.2709. V této konkrétní práci [64] však X-ray difrakce neposkytla žádné informace o distribuci zbytkového austenitu.



Obr.77 *EBSD - elektrolyticky leštěný povrch*

Celkově lze sumarizovat, že po 3D tisku vzniká zcela jedinečná buněčná mikrostruktura poměrně stabilního chemického složení s nízkou pórovitostí. EBSD analýza potvrdila ve struktuře podíl zbytkového austenitu, ale obsažené množství bylo menší, než se očekávalo, proto byl pro zpřesnění podíl zbytkového austenitu dále ověřován RTG difrakcí provedenou v NTC ZČU v Plzni. O výsledcích bude pojednáno v další kapitole.

3.2 Výzkum mechanických vlastností aditivně vyráběné oceli Wr. N 1.2709 a jejich porovnání s konvenčně vyráběnou

Aditivní technologie je principiálně zcela odlišná od běžně používaných konvenčních metod. Jak je patrné z předcházející podkapitoly, způsob výroby oceli 1.2709 se odráží v rozdílných strukturách, a to by se mohlo v konečném důsledku projevit i na mechanických vlastnostech. Cílem této podkapitoly je:

1) ověřit výrobcem udávané hodnoty mechanických vlastností při statické zkoušce tahem
2) zjistit, zda jsou hodnoty mechanických vlastností konstantní pro různé velikosti zkušebních těles
3) porovnat zjištěné mechanické vlastnosti tištěné oceli s vlastnostmi konvenčně vyráběného materiálu
4) rozšířit oblast 3D tisku o nové poznatky na základě výsledků provedených zkoušek

3.2.1 Zjišťování mechanických vlastností tištěné oceli ze statické zkoušky tahem

Výrobce zařízení pro 3D tisk udává pro vytištěný a vytvrzený materiál hodnoty meze pevnosti, meze kluzu, tažnosti a modulu pružnosti (v závislosti na směru tisku) získané ze statické zkoušky tahem dle ISO 6892-1:2009 pro vzorky o průměru zkušební části 5 mm vytištěné na zařízení EOS M280 a M290, viz Tab. 4. Tyto deklarované hodnoty jsou srovnatelné s tabulkovými hodnotami pro konvenčně vyráběný materiál.

Ověřování mechanických vlastností udávaných výrobcem pro materiál MS1 a jejich srovnání s konvenčně vyráběným materiálem Wr.-N 1.2709 (X3NiCoMoTi18-9-5) bylo provedeno zkouškou tahem za pokojových teplot dle normy ČSN EN ISO 6892-1 na elektromechanickém zkušebním stroji ZWICK/ROELL Z250 (silová kapacita do 250 kN) konstantní rychlostí posuvu příčníku zkušebního stroje 0,00025 1/s v oblasti Hookeova zákona a do meze kluzu a rychlostí 0,006 1/s dále do lomu.

Zkušebními tělesy byly válcové zkušební tyče o průměru 10 a 4 mm a ploché zkušební vzorky o průřezu 1,5 x 1 mm, viz Příloha 4 vyrobené 3D tiskem – obchodní název použitého materiálu MS1 a konvenční výrobou (tvářením) – obchodní název použitého materiálu Vaco 180 od firmy Bohdan Bolzano s.r.o.

Chemické složení materiálů pro výrobu vzorků dle dodaných atestů je uvedeno v následující tabulce.

Tab.10 Skutečné chemické složení testovaných materiálů

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	Ti	Cu	Al
konvenční mat.	0,001	0,02	0,02	0,003	0,0009	8,72	-	4,9	17,65	0,84	-	-
3D tisk	0,01	0,02	0,06	<0,01	0,01	8,76	0,12	4,8	18,25	0,64	0,03	0,06

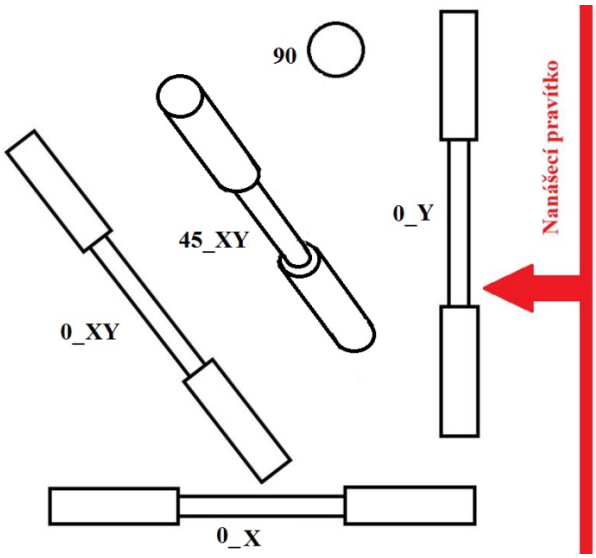
Testování probíhalo na vzorcích:

a) po rozpouštěcím žíhání – viz výše uvedený proces – kap. 3 str. 43 Obr. 47
b) po vytvrzení – viz výše uvedený proces – kap. 3 str. 43 Obr. 46
c) ve stavu po tisku – jen u vzorků o průměru zkušební části 4 mm a s obdélníkovým průřezem

Zkoušky proběhly ve třech etapách. V první fázi byly použity průměry klasických zkušebních tyčí 10 mm, čímž se zabezpečilo pokrytí případných nehomogenit materiálu. V další fázi byla navržena zkušební tělesa o průměru zkušební části 4 mm s cílem zjistit, zda budou zachovány mechanické vlastnosti zjištěné v předcházející fázi. Pro třetí etapu byly navrženy zkušební vzorky obdélníkového průřezu 1,5 x 1 mm s výraznou úsporou zkušebního materiálu jako představitelé tenkostěnných dílů, které jsou pro aditivní výrobu typické. Pokud by výsledné hodnoty vyšly pro všechny vzorky různých průřezů srovnatelně, bylo by možné používat tyto „mini“ vzorky pro další experimenty, a šetřit tak drahý výrobní materiál. Velikosti zkušebních vzorků vychází mimo jiné z možností a doporučení odborníků z Mechanické zkušebny a z Metalografické laboratoře Regionálního technologického institutu.

Prvotně byla vytvořena matice pro tisk vzorků vycházející z údajů od výrobce, viz Příloha 1, v níž jsou uvedeny některé mechanické vlastnosti oceli MS1 ve stavu po tisku a po vytvrzení provedeném dle výše uvedených postupů. Mechanické vlastnosti po tisku by měly být dle výrobce zachovány i po rozpouštěcím žíhání. Výrobce dále udává, že ve stavu po tisku jsou anizotropní vlastnosti mezi rovinou platformy, tedy X, Y, a směrem výstavby tisku, tedy Z – viz Tab 11. Následující obrázek vysvětluje značení vzorků s ohledem na orientaci tisku.

Vzorky byly tištěny v několika etapách v závislosti na průběhu experimentů. Díky tomu je možné posuzovat i vlivy některých dalších faktorů na mechanické vlastnosti, jako je např. použitý prášek a jeho „čistota“, viz dále.



Obr.78 *Schématické znázornění značení vzorků v závislosti na jejich orientaci*

3.2.2 Výsledky statické zkoušky tahem pro vzorky po rozpouštěcím žíhání a po tisku

Rozpouštěcí žíhání je standardním procesem zušlechtění martenzitické oceli Wr.-N 1.2709. V tomto stavu je běžně dodáván konvenční materiál. Tento proces je u větších tištěných dílů v podstatě nezbytný z důvodu eliminace napětí koncentrovaného v materiálu, které vede k deformaci dílů.

3.2.2.1 Fáze 1 – Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 10 mm [86]

V první fázi byl proveden tisk vzorků o průměru zkušební části 10 mm (dále označovány jako D10) nejprve s válcovou upínací hlavou. Po prvních testech, během nichž nebylo možné na tomto vzorku z důvodu nedostatečného místa pro umístění průtahoměrů

spolehlivě naměřit modul pružnosti a tažnost, byly na upínacích částech zbývajících vzorků dodělány závity M16.

Testování proběhlo na 11 žíhaných vzorcích D10 – 2 vzorky z konvenčně vyráběné oceli, 2 vzorky tištěné ve směru X, 2 vzorky tištěné ve směru Y, 2 vzorky tištěné ve směru XY a 3 vzorky tištěné ve směru Z. Výsledky zkoušek jsou shrnuty v Tab. 11. Hodnoty, které nejsou v souladu s tabulkovými hodnotami, jsou označeny červeně. První tři řádky tabulky obsahují předepsané mechanické vlastnosti pro tištěný materiál MS1 po tisku a pro konvenční materiál 1.2709 (Vaco 180). Z těchto údajů jsou patrné jejich srovnatelné vlastnosti. Co se týče meze pevnosti Rm má tištěná ocel mírně vyšší tabulkové hodnoty oproti oceli tvářené. Mez kluzu $Rp_{0,2}$ a hodnota tažnosti A pro směr tisku v rovině XY je vyšší pro tištěný materiál, ve směru Z mohou být hodnoty nižší než u konvenční oceli. Modul pružnosti může být pro konvenční ocel vyšší. Tento materiál vykazuje poměrně malé rozdíly mezi mezí kluzu a pevnosti. Z toho plyne jeho použití pro mechanicky namáhané nástroje, pro které je nutno volit materiál s nejvyššími mezemi pevnosti a kluzu a které musí být současně houževnaté a málo citlivé na eventuálně vzniklé vruby, a to vše i za zvýšených teplot. Typické oblasti použití jsou například zápustky pro tváření za studena, jádra, šoupátka, rozdělovače, jakož i formy pro tlakové lití pro slitiny těžkých i lehkých neželezných kovů s nižšími teplotami tavení [85]. Vzorky 18 a 19 byly tištěny v jiné výrobní várce než ostatní vzorky, ale rovněž z recyklovaného prášku.

Tab.11 Výsledky zkoušky tahem pro žíhané vzorky D10 ve vztahu k tabulkovým hodnotám

Číslo vzorku	Ozn.	E [Gpa]	Rp0,2	Rm	A [%]
-	Výrobce_3D tisk – směr X,Y	160 ± 30	1050 ± 100	1200 ± 100	13 ± 4
-	Výrobce_3D tisk – směr Z	150 ± 30	870 ± 100	1100 ± 100	12 ± 4
-	Konveční 1.2709 dle tabulek	180	950	930 - 1130	min. 12
3	Konvenční_1	177	922	1030	11.5
5	Konvenční_2	177	901	1010	15.4
6	0_X_1	183	753	1100	12.4
7	0_X_2	173	751	1120	13.5
19	0_Y_1	174	782	1100	13.5
15	0_Y_2 (bez závitu)	57.4	721	1100	13.4
14	0_XY-1	174	746	1100	13.5
4	0_XY-2	175	729	1110	13.9
18	90_1	189	721	1110	15.5
20	90_2	156	779	1100	12,8
21	90_3	154	778	1090	12,5

Naměřené hodnoty modulu pružnosti odpovídají ve většině případů tabulkovým hodnotám. Při detailní analýze jednotlivých záznamů (smluvní napětí – poměrně prodloužení) v oblasti elastických deformací se ukázalo, že vyhodnocení modulu pružnosti metodou proložení regresní čáry v intervalu 100–200 MPa velmi dobře koresponduje s lineární částí diagramu a takto stanovený modul pružnosti v tahu E je pro technické účely plně využitelný [86]. Výrazně nižší hodnota pro vzorek 15 vyplývá ze skutečnosti, že jeho upínací válcová část byla upnuta pomocí čelistí, které svojí konstrukcí značně omezují prostor pro použití snímačů pro měření modulu pružnosti. Tuto hodnotu lze vzhledem k nespolehlivosti měření

vyloučit. Vzorek 18 dosáhl vyšší hodnoty než je výrobcem udávaný rozptyl. To mohlo být způsobeno vlivem jeho tisku v jiné várce, než v jaké byly vytištěny ostatní vzorky. Modul pružnosti pro oba konvenční vzorky byl nepatrně nižší, než udávají tabulky, ale srovnatelný s modulem pružnosti tištěných vzorků.

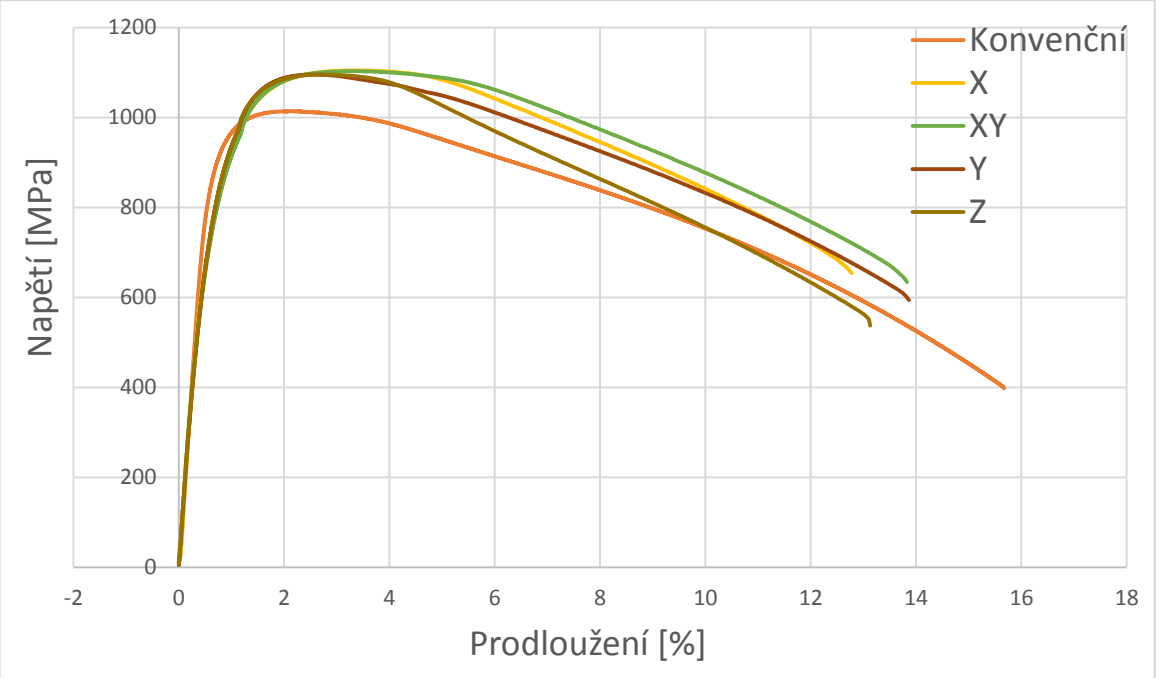
Tahová zkouška potvrdila výrobcem předepsané meze pevnosti, které byly ve všech směrech tisku téměř totožné, tj. 1090–1120 MPa. To znamená, že ve směru Z je tato hodnota blízko průměru, zatímco ve směrech X, Y je spíše na spodní dovolené hranici. Orientace vzorků nevykazovala v tomto případě vliv na sledovanou pevnost. Tvářené vzorky byly v tomto hodnocení v souladu s předepsanými hodnotami. V porovnání tištěných a konvenčních vzorků dosáhly tištěné vzorky dle očekávání vyšších hodnot.

Výsledky meze kluzu $Rp_{0,2}$ se u tištěných materiálů nacházely níže, než dovolují nejnižší požadované hodnoty (s výjimkou vzorků 20 a 21, jejichž hodnoty ležely na spodní dovolené hodnotě) a zároveň byly i výrazně nižší než hodnoty u konvenčního materiálu, které vykazovaly rovněž nižší než tabulkové hodnoty. **Tento nesoulad je v rozporu s tím, co uvádí výrobce.** Mechanická zkušebna RTI deklaruje objektivnost a věrohodnost měření této hodnoty.

Srovnání materiálu MS1 a Vaco 180 dle meze kluzu vypovídá o tom, že tvářený materiál je vlivem prokování kompaktnější než materiál tištěný, tzn., že konvenční materiál je více zpevněný než poddajnější tištěný materiál, v němž je vlivem menšího zhutnění větší počet lokálních iniciátorů porušení.

Při hodnocení tažnosti obou materiálů, byla překvapivě nejvyšší hodnota naměřena u vzorku 18 tištěného ve směru Z i přesto, že byla očekávaná jako nejnižší. Ostatní dva vzorky ve směru Z měly mírně nižší tažnost než většina vzorků tištěných ve směru X a Y. Nejnižší tažnost mělo zkušební těleso 3 vyrobené z konvenční oceli 1.2709. Je zajímavé, že oba tvářené vzorky měly naprosto totožný modul pružnosti, zatímco jejich tažnost se lišila o 4 %.

Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro D10 jsou zobrazeny na Obr. 79



Obr.79 *Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro žíhané D10*

Graf na Obr. 79 ukazuje, že **výsledky této fáze nepotvrzují výrobcem udávaný rozdíl vertikálního a horizontálního směru tisku** – křivky tištěných vzorků se do meze pevnosti překrývají. V souladu není ani hodnota meze kluzu, jejíž naměřené hodnoty jsou výrazně nižší, než udává výrobce pro zkoušku tahem u vzorku o průměru zkušební části 5 mm. Tento rozpor může být dán rozdílností průměrů zkušebních vzorků. To vypovídá o vlivu velikosti tištěného průřezu na výsledky mechanických vlastností. Dále může být rozpor způsoben tím, že výrobce udává mechanické vlastnosti pro vzorky po tisku bez tepelného zpracování, přestože uvádí, že při dodržení doporučeného postupu tepelného zpracování zůstanou hodnoty zachovány.

Ve srovnání tištěných a tvářených vzorků lze říci, že naměřené hodnoty pro modul pružnosti a pro tažnost jsou srovnatelné, mez pevnosti je vyšší cca o 100 MPa u tištěných vzorků a naopak vyšší mez kluzu vykazují cca o 150 MPa konvenčně vyráběné vzorky. To je znázorněno na výše uvedeném grafu.

3.2.2.2 Fáze 2 Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 4 mm

V této fázi byly otestovány vzorky o průměru zkušební části 4 mm (D4):

a) po rozpouštěcím žíhání – vyrobené konvenčně a 3D tiskem
b) po tisku

Upínací části byly opatřeny závity M8. Cílem bylo ověřit, zda výsledky zkoušek pro vzorky D4 odpovídají výsledkům fáze 1 a hodnotám udávaným výrobcem.

a) Zkouška tahem vzorků D4 po rozpouštěcím žíhání

Tab.12 Výsledky zkoušky tahem pro žíhané vzorky D4 ve vztahu k tabulkovým hodnotám

Číslo vzorku	Ozn.	E [Gpa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
-	Výrobce_3D tisk – směr X,Y	160 ± 30	1050 ± 100	1200 ± 100	13 ± 4
-	Výrobce_3D tisk – směr Z	150 ± 30	870 ± 100	1100 ± 100	12 ± 4
-	Konveční 1.2709 dle tabulek	180	950	930 - 1130	min. 12
34-4	Konvenční_1	146	823	1030	16.4
35-4	Konvenční_2	144	818	1030	16.6
6-4	0_X_1	165	829	1160	14.8
7-4	0_X_2	157	811	1140	16.4
10-4	0_Y_1	153	869	1150	13.7
11-4	0_Y_2	169	911	1180	11.4
13-4	45_X	135	915	1110	13.5
15-4	45_Y	151	836	1130	14.7
18-4	90_1	158	865	1120	15.2
19-4	90_2	149	893	1120	14.6

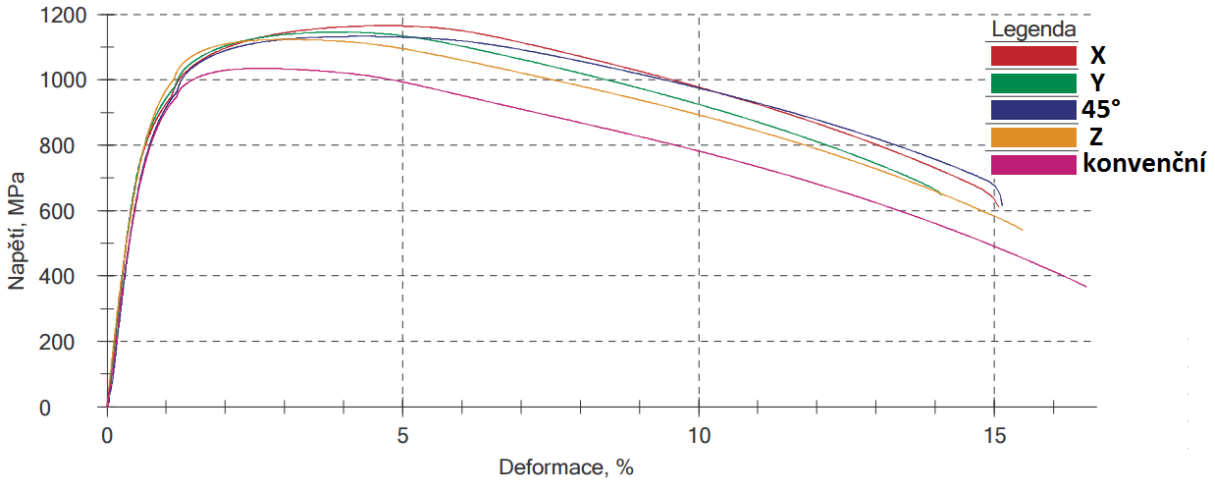
Výsledky tahových zkoušek vzorků D4, viz Tab. 12, nekopírovaly výsledky vzorků D10. Naměřené hodnoty modulu pružnosti byly pro konvenční i tištěné vzorky nižší než v předchozím měření (173–189 GPa). U tištěných vzorků se tyto hodnoty, bez ohledu na orientaci a způsob výroby, posunuly k středním hodnotám garantovaných výrobcem. U

konvenčních vzorků D4 byla hodnota cca o 18 % nižší než pro vzorky D10 a zároveň o 18 % než pro hodnoty, které jsou pro tvářený materiál udávány v tabulkách

Meze pevnosti zůstaly pro konvenční vzorky zachované. Pro tištěné vzorky mírně vzrostly a projevily se drobné rozdíly ve směrech tisku, viz graf na Obr. 80. Všechny hodnoty ležely v rozmezí, které deklaruje výrobce. Nepatrně nižší byly hodnoty u vzorků tištěných ve směru Z a pod úhlem 45° od platformy (1110–1130) než u vzorků tištěných ve směru X a Y (1140 – 1180). Je zde tedy možné pozorovat mírný vliv orientace, ale stejně tak to může představovat běžný rozptyl měření.

Výsledky meze kluzu byly v tomto experimentu srovnatelné pro tištěné i konvenční vzorky. Hodnoty měly nezávisle na směru tisku poměrně velký rozptyl od 811 do 915 MPa. Dle hodnot, které deklaruje výrobce, lze konstatovat, že vzorky tištěné ve směru Z byly v požadovaných mezích, ostatní hodnoty byly, stejně jako u zkoušek D10, nižší. Ve srovnání se vzorky D10 (721–782) však byly hodnoty meze kluzu výrazně vyšší. Příčina by teoreticky mohla být v tepelném zpracování vzorků, při němž u průměru D4 docházelo k tepelnému zpracování a především následnému ochlazování menšího objemu materiálu (vliv rychlosti), neboť vzorky nebyly vytištěny ve finálním tvaru vzorku pouze s přídavkem 0,5 mm na plochu. Tato teorie by byla přijatelná, pokud by se změna velikosti hodnot týkala pouze tištěných vzorků. Vzhledem k tomu, že byl tento jev zaznamenán i u konvenčních vzorků, které byly pro vzorky D4 i D10 vyráběny ze stejné tyče (průměr tyče 20 mm), přičemž výrobce konvenčního materiálu deklaruje stejné mechanické vlastnosti v celém průřezu, viz zdroj [85], je nutné hledat vysvětlení jinde. Mechanická zkušebna RTI potvrdila objektivnost a věrohodnost měření této hodnoty.

Hodnoty tažnosti vzorků D4 byly mírně vyšší ve srovnání se vzorky D10. Konvenčně vyrobené vzorky měly vyšší tažnost (v průměru o 2 %) než většina tištěných vzorků. Tažnost tištěných vzorků D4 nevykazovala závislost na orientaci.



Obr.80 *Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro žíhané D4*

Výsledky druhé fáze pro žíhané vzorky potvrdily výrobcem udávané rozdíly meze pevnosti v závislosti na směru tisku, avšak ne v takové míře, jak je udáváno. Pro ostatní měřené hodnoty nebyl vliv tisku pozorován, a je to tedy v rozporu s údaji od výrobce. Podobně jako u fáze 1 byly naměřené hodnoty meze kluzu nižší, než udává výrobce pro zkoušku tahem u vzorku o průměru zkušební části 5 mm, ale zároveň vyšší než pro vzorky D10. Hodnoty meze kluzu byly srovnatelné s hodnotami pro konvenčně vyráběné vzorky, které byly naopak pro průměr D4 nižší než v předchozí fázi. Při hodnocení výsledků je třeba vzít v úvahu skutečnost, že výrobcem udávané hodnoty jsou hodnoty naměřené po tisku (bez

TZ), a přestože výrobce říká, že po rozpouštěcím žíhání jsou mechanické vlastnosti stejné jako pro materiál přímo po tisku, lze očekávat drobné rozdíly hodnot.

b) Zkouška tahem vzorků D4 po tisku

Výsledky zkoušky tahem pro vzorky D4 vyrobené 3D tiskem bez dalšího tepelného zpracování sumarizuje Tab. 13. Všechny vzorky byly vytištěny v jednom tisku z nového prášku.

Tab.13 Výsledky zkoušky tahem tištěných vzorků D4 ve vztahu k tabulkovým hodnotám

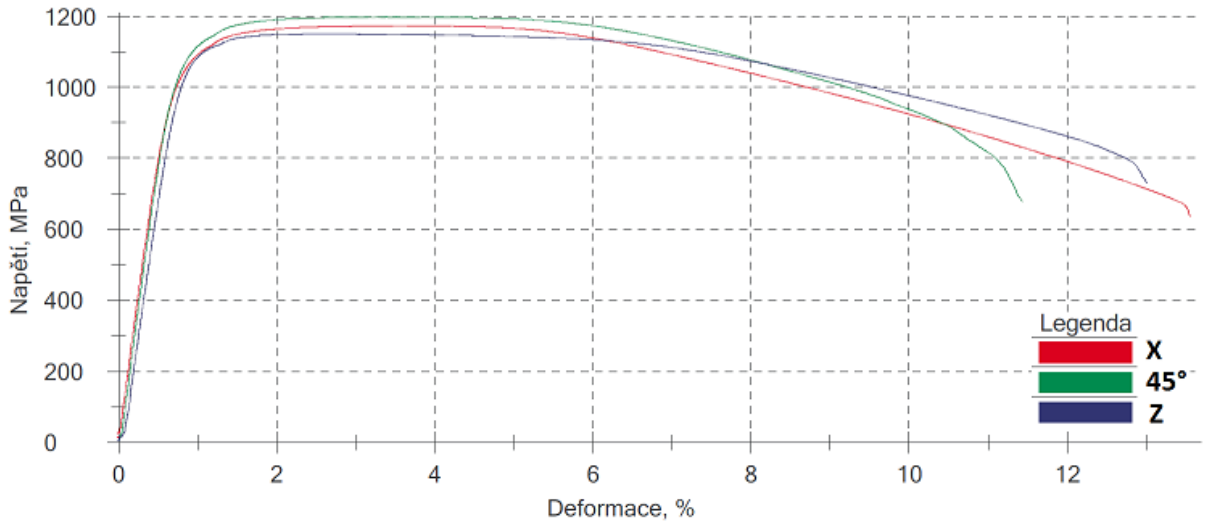
Číslo vzorku	Ozn.	E [Gpa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
-	Výrobce_3D tisk – směr X,Y	160 ± 30	1050 ± 100	1200 ± 100	13 ± 4
-	Výrobce_3D tisk – směr Z	150 ± 30	870 ± 100	1100 ± 100	12 ± 4
40-4	T_17_0_X	164	1050	1170	13,1
41-4	T_17_0_X	168	1040	1170	13,1
42-4	T_17_0_X	166	1040	1180	13,6
43-4	T_17_45_X	170	1080	1200	11
44-4	T_17_45_X	172	1080	1190	8,6
45-4	T_17_45_X	167	1080	1200	13,6
46-4	T_17_90	159	1050	1140	10,4
47-4	T_17_90	164	1080	1160	12,8
48-4	T_17_90	157	1070	1150	12,5

Souhrnně lze říci, že žádná z naměřených hodnot neležela pod minimální deklarovanou hodnotou. Modul pružnosti byl v přirozeném rozptylu hodnot srovnatelných s hodnotami materiálu po rozpouštěcím žíhání. Tažnost vzorků bez TZ byla mírně nižší a měla větší rozptyl. To bylo způsobeno prokluzem snímačů prodloužení po velmi hladkém povrchu obrobené části. V rámci budoucího výzkumu chování tištěného materiálu MS1 a jeho srovnávání s konvenčně vyráběným materiálem bude ověřována obrobitelnost a povrchové vlastnosti materiálu po různých úpravách.

Meze pevnosti tištěných vzorků bez TZ byly mírně vyšší než u žíhaných vzorků. Mírně vyšší hodnoty vykazovala zkušební tělesa ve směru tisku X oproti směru Z, ale nejvyšší mez pevnosti byla v tomto případě naměřena pro vzorky tištěné pod úhlem 45° a to až 1200 MPa. Výrobce neuvádí, jak by se měly chovat vzorky vytištěné pod úhlem.

Výsledky meze kluzu byly od předchozích zkoušek značně odlišné. Pohybovaly se v rozmezí 1040–1080 MPa. Nejvyšších hodnot dosahovaly opět vzorky tištěné pod úhlem a vzorky tištěné ve směru Z, a to o 100 MPa více je než výrobcem udávaná horní mez pro tuto hodnotu. Tento výsledek zároveň nekoresponduje s uváděným údajem, který říká, že mez kluzu u vzorku ve směru Z má dosahovat cca o 200 MPa nižších hodnot než ve směrech X a Y.

Výše zmíněné informace jsou dobře patrné z grafu na následujícím obrázku. Vyšší mechanické vlastnosti jsou s velkou pravděpodobností dány i skutečností, že byly tištěny z nového (nerecyklovaného) prášku.



Obr.81 *Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro D4 po tisku*

3.2.2.3 Fáze 3 – Zkouška tahem pro ploché vzorky o průřezu 1,5 x 1 mm

V této fázi byly otestovány vzorky:

a) po rozpouštěcím žíhání – vyrobené konvenčně a 3D tiskem

b) po tisku

Pro tato zkušební tělesa bylo v testovaném průřezu spečeno cca 25 vrstev naneseného prášku. Vzhledem ke struktuře tištěného materiálu nelze jednoznačně určit velikost zrna, která nejsou typická tak, jako je tomu u konvenčních materiálů. Dle odborníků z Metalografické laboratoře RTI by tato velikost vzorku měla být dostatečná pro zabezpečení homogenity průřezu.

a) Zkouška tahem vzorků o průřezu 1,5 x 1 mm po rozpouštěcím žíhání

Vzorky tištěné ve směru X byly vyrobeny v jiné várce než ve směru Y a Z. Výsledky vzorků sumarizuje následující tabulka. Popis výsledků je proveden dále společně s popisem výsledků vzorků po tisku (bez TZ).

Tab.14 Výsledky zkoušky tahem vzorků u průřezu 1,5 x 1 mm po rozpouštěcím žíhání

Č. vzorku	Ozn.	E [Gpa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
-	Výrobce_3D tisk – směr X,Y	160 ± 30	1050 ± 100	1200 ± 100	13 ± 4
-	Výrobce_3D tisk – směr Z	150 ± 30	870 ± 100	1100 ± 100	12 ± 4
-	Konveční 1.2709 dle tabulek	180	950	930 - 1130	min. 12
M1	MT_konvenční	-	840	970	14,6
M2	MT_konvenční	-	740	850	13,8
M3	MT_konvenční	-	730	970	13,7
M4	MT_0_X	-	640	990	11,5
M5	MT_0_X	-	870	1030	11,8
M6	MT_0_X	-	700	950	11,6
M7	MT_0_Y	-	800	920	10,4

M8	MT_0_Y	-	850	970	10,4
M9	MT_0_Y	-	750	960	11,5
M10	MT_90	-	840	1020	10,5
M11	MT_90	-	900	980	11,2
M12	MT_90	-	840	1000	10,7

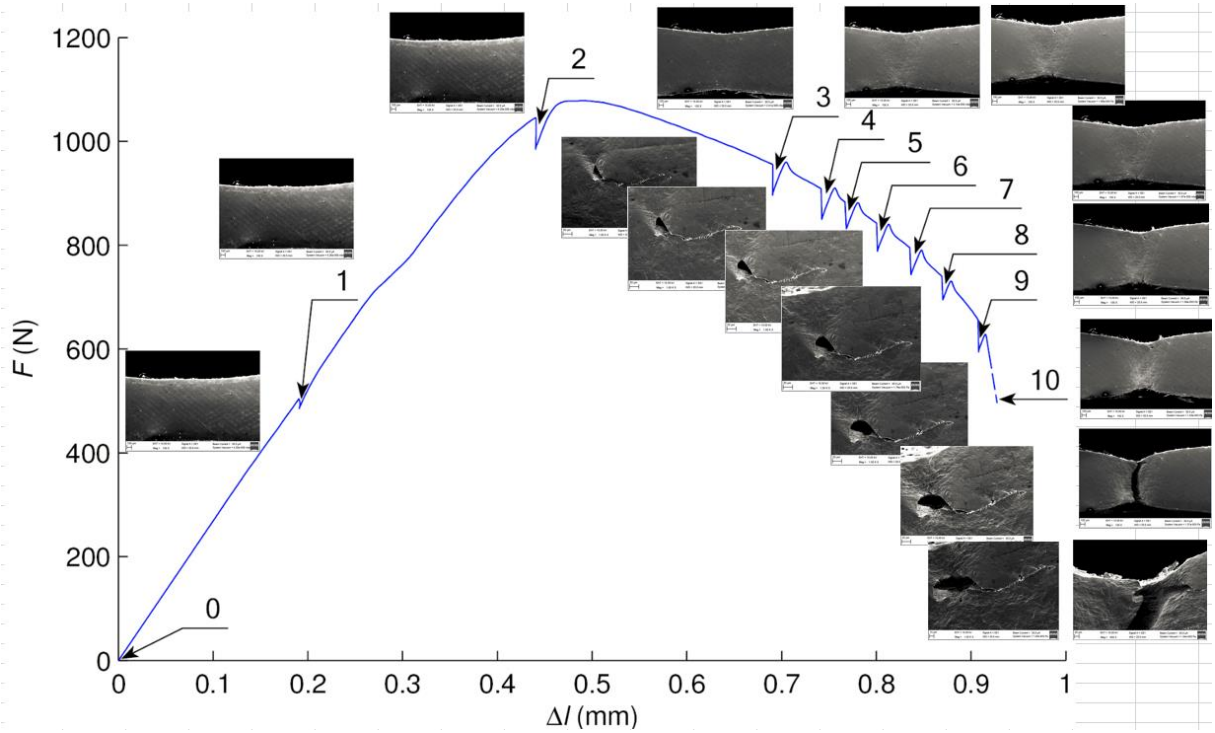
b) Zkouška tahem vzorků o průřezu 1,5 x 1 mm po tisku

Všechny vzorky byly vyrobeny v rámci jednoho tisku. Výsledky sumarizuje Tab.15.

Tab.15 Výsledky zkoušky tahem vzorků u průřezu 1,5 x 1 mm po tisku

Č. vzorku	Ozn.	E [Gpa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
-	Výrobce_3D tisk – směr X,Y	160 ± 30	1050 ± 100	1200 ± 100	13 ± 4
-	Výrobce_3D tisk – směr Z	150 ± 30	870 ± 100	1100 ± 100	12 ± 4
M13	MT_0_X	-	750	1064	11,7
M14	MT_0_X	-	950	1067	11,4
M15	MT_0_X	-	950	1080	13,4
M16	MT_0_Y	-	720	1111	13,2
M17	MT_0_Y	-	980	1066	11,8
M18	MT_0_Y	-	930	1085	12,3
M19	MT_90	-	950	984	9,1
M20	MT_90	-	950	1011	9,8
M21	MT_90	-	960	975	11

Výsledky třetí fáze ukázaly, že použité vzorky byly citlivější na defekty ve struktuře. To se projevilo rozptylem hodnot mezí kluzu, které jsou teoretickým počátkem vzniku plastických deformací. Při výskytu póru nebo defektu (nespečeného prášku), jež byly iniciátory vzniku trhliny vedoucí k lomu, došlo k poměrně rychlému porušení (viz následující obrázek). Velikost defektů a rychlosti šíření trhliny se projevily na naměřených hodnotách.



Obr.82 *Závislost síla – poměrné prodloužení včetně dokumentace vývoje plastické deformace*

Celkově lze říci, že meze pevnosti byly pro směry X a Y až na jednu výjimku naměřeny nižší, než jsou výrobcem dovolené meze, a u směru Z byly naměřeny na spodní hranici. Ani u tištěných ani u žíhaných vzorků se neprojevil vliv orientace. Celkově vyšší mechanické vlastnosti měly vzorky bez TZ. I přes vyšší rozptyl hodnot se meze pevnosti i meze kluzu pro vzorky po tisku i pro vzorky žíhané pohybují níže než pro vzorky fáze 2 – D4.

Konvenční vzorky vykazovaly mírně nižší meze pevnosti a meze kluzu než vzorky tištěné. Lze konstatovat, že naměřené hodnoty se pohybovaly v přirozeném rozptylu, který byl však větší než v prvních dvou fázích.

Z výsledků vyplývá, že při tisku tenkostěnných dílů nelze spolehlivě zabezpečit mechanické vlastnosti deklarované výrobcem pro tisk vzorku o průměru 5 mm a že významný vliv na tyto hodnoty má kvalita prášku.

3.2.2.4 Sumarizace výsledků zkoušky tahem pro vzorky po rozpouštěcím žíhání a po tisku

Výsledky provedených zkoušek přinesly zajímavé výsledky, které nebyly takto komplexně sumarizovány v žádném z prostudovaných zdrojů. Projevily se zde vlivy mnoha faktorů na sledované mechanické vlastnosti, jako je vliv velikosti vzorku, vliv kvality prášku, vliv tepelného zpracování, vliv směru tisku, a to nejvýznamněji pro hodnoty meze kluzu. Překvapivé je také zjištění o nesouladu mezi hodnotami udávanými výrobcem a hodnotami, jež byly skutečně naměřeny.

Konkrétně lze na základě provedených experimentů konstatovat, že **tištěné vzorky D4** srovnatelné s výrobcem použitými vzorky o průměru 5 mm, ze kterých vychází deklarované mechanické vlastnosti v různých směrech, **vykazovaly shodu s hodnotami, které udává výrobce, až na hodnoty meze kluzu, které se pohybovaly cca o 200 MPa výše, než je stanovená střední hodnota pro tento směr**. Nutno zmínit, že vzorky pro tento experiment byly tištěny z nového prášku. Výrobce udává pro tištěný materiál **rozdílné mechanické**

vlastnosti pro směry X a Y a pro směr Z, to **nebylo v rámci provedených experimentů potvrzeno.** U vzorků obdélníkového průřezu 1,5 x 1 mm byly rovněž hodnoty mezí pevnosti a kluzu srovnatelné bez závislosti na směru tisku. Ve většině případů ležely naměřené hodnoty níže, než udává výrobce, nebo na spodní hranici deklarovaných hodnot.

Výrobcem doporučené tepelné zpracování rozpouštěcím žíháním snižuje mechanické vlastnosti tištěné oceli, a to především meze kluzu pro směry X a Y. Naměřené hodnoty pro směr Z se pro D4 vejdou do daného rozmezí, ale pro D10 již nikoliv. Z toho plyne vliv velikosti vzorku na mechanické vlastnosti. **Vyšší hodnoty meze kluzu a pevnosti měly vzorky D4 než vzorky D10.** Mírný vliv orientace se projevil pouze pro hodnoty Rm u D4. **Ve srovnání s konvenčními vzorky dopadly D10 hůře a naopak D4 lépe.** U konvenčních vzorků se vliv velikosti průřezu projevil pouze u meze kluzu. V tomto případě byly naopak nižší hodnoty naměřeny pro D4. Meze pevnosti byly pro oba průměry totožné. Vzorky obdélníkového průřezu byly v tomto experimentu **ovlivněny především přítomností vměstků a pórů, které v závislosti na jejich velikosti byly příčinou rychlosti porušení.**

Výrobce zařízení doporučil TZ rozpouštěcím žíháním, které by dle jeho vyjádření nemělo mít vliv na mechanické vlastnosti. Z těchto výsledků však vyplývá, že provedené **rozpouštěcí žíhání snižuje mechanické vlastnosti, a to především meze kluzu**. To bylo potvrzeno při testování vzorků z několika výrobních várek.

Tato skutečnost významně ovlivňuje použití této technologie pro konkrétní aplikace, v nichž je potřeba deklarovat určité mechanické vlastnosti. Jak bylo zmíněno 3D tisk je ve velké míře využívám pro výrobu tenkostěnných dílů. Především pro toto použití je významný vliv čistoty vstupního materiálu pro konečné vlastnosti finálního tenkostěnného dílu. Nečistoty v recyklovaném prášku způsobují iniciaci trhlin a následně porušení dílu.

3.2.3 Výsledky statické zkoušky tahem pro vytvrzené vzorky

Testování opět proběhlo ve třech etapách na vytvrzených vzorcích D10, D4 a s obdélníkovým průřezem 1,5 x 1 mm. Cílem testování bylo ověřit výrobcem udávané hodnoty, zmapovat vliv změny průřezu vzorku a porovnat vlastnosti tištěného materiálu W-Nr. 1.2709 po vytvrzení s vytvrzeným konvenčně vyráběným materiálem.

3.2.3.1 Fáze 1 – Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 10 mm

Výsledky statické zkoušky tahem pro vytvrzené vzorky o průměru zkušební části 10 mm sumarizuje Tab 16. Vytvrzené vzorky mají oproti žíhaným vzorkům téměř dvojnásobnou pevnost (na úkor hodnot tažnosti). V této fázi bohužel nebylo provedeno porovnání s konvenčním materiálem. Vzorek 20 byl tištěn v jiné várce než ostatní vzorky z recyklovaného prášku.

Tab.16 Sumarizace výsledků zkoušky tahem vytvrzených vzorků D10

Číslo vzorku	Ozn.	E [GPa]	$Rp_{0,2}$ [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
-	Výrobce - min.		1862	1930	min. 2%
-	Výrobce - směr X, Y, Z	180 ± 20	1990 ± 100	2050 ± 100	4 ± 2
-	Konvenční 1.2709 dle tabulek		1910	1960	min. 6-7
9	0_X	184	1980	2040	4.7
13	0_X	186	1960	2030	4.3
10	0_X	189	1960	2020	5.3
8	0_X	184	1960	2020	5.7
12	45_X	189	1880	1960	1.6
11	45_X	184	1890	1970	1.9
1	90 – bez závitu	-	1920	1960	-
2	90	176	1900	1980	4
20	90	185	1900	1970	4.2

Modul pružnosti tištěných vzorků leží v malém rozmezí (vzorek 1 – byl vyroben bez závitu – nebyl naměřen modul pružnosti a tažnost). Tažnost se pohybovala v rozmezí 4–5,7 %, hodnoty pro vzorky vytištěné pod 45° lze z důvodu prokluzu snímačů vyloučit.

Meze pevnosti a kluzu, přestože výrobce **u vytvrzených vzorků** nerozlišuje směry tisku, byly u vzorků **D10 ovlivněny směrem tisku**. Vzorky tištěné ve směru X měly vyšší pevnost (2020–2040 MPa) než vzorky tištěné pod úhlem 45° a ve směru Z (1960–1980 MPa). To znamená hodnoty, které u vzorků ve směru X v tomto případě představovaly rozptyl hodnot meze kluzu. Mez kluzu pro vzorky tištěné pod úhlem a ve směru Z se pohybovala od 1880 do 1920 MPa. Z toho vyplývá, že při zatížení 1980 MPa (cca 152 kN) by se součást tištěná ve směru X začala viditelně plasticky deformovat, zatímco součást tištěná ve směru Z by již praskla. Teprve při zvýšení zatížení o cca 500 kg (5 kN – odečteno z grafu síla prodloužení) by praskla součást tištěná ve směru X.

Výsledky této fáze pro vytvrzené vzorky přinesly závěry lišící se od údajů výrobce, který nepředpokládá vliv orientace tisku na mechanické hodnoty u vytvrzených vzorků. Nutno podotknout, že výrobce udává hodnoty pro průměr zkušební části vzorku 5 mm.

3.2.3.2 Fáze 2 – Zkouška tahem pro vzorky o průměru zkušební části 4 mm

Podobně jako u žíhaných vzorků, tak i u vytvrzených vzorků byly rozdíly mezi hodnotami naměřenými pro D10 a D4. Výsledky tahových zkoušek pro D4 jsou uvedeny v následující tabulce. Vzorky 36-4 až 39-4 byly tištěny v jiné várce, ale rovněž z recyklovaného prášku.

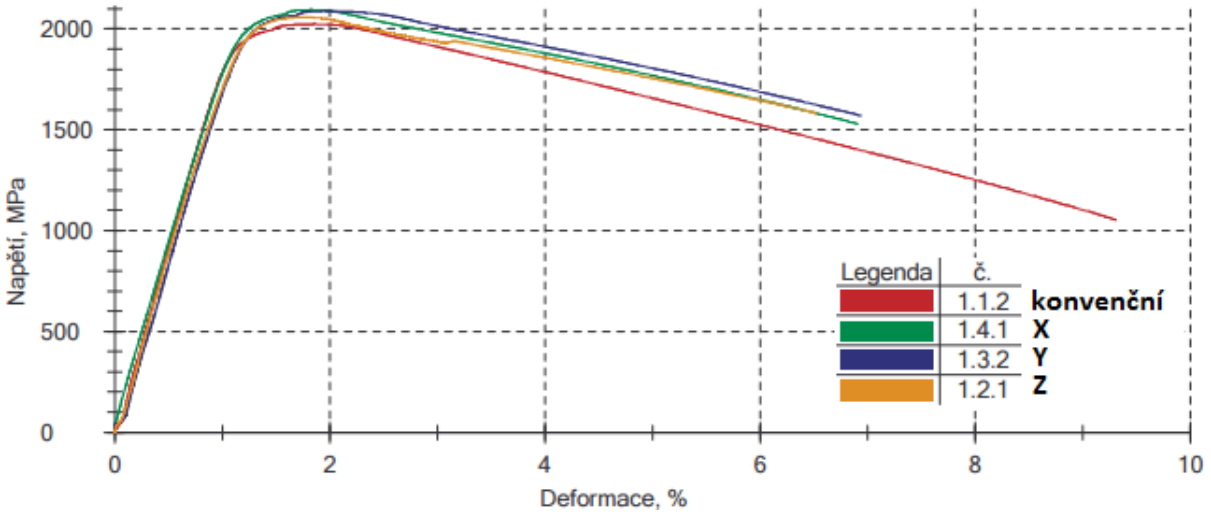
Tab.17 Sumarizace výsledků zkoušky tahem vytvrzených vzorků D4

Číslo vzorku	Ozn.	E [Gpa]	$Rp_{0,2}$ [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
	Výrobce - min.		1862	1930	min. 2%
	Výrobce - směr X, Y, Z	180 ± 20	1990 ± 100	2050 ± 100	4 ± 2
	Konvenční 1.2709 dle tabulek		1910	1960	min. 6-7
28-4	Konvenční	183	1950	2040	9.7
29-4	Konvenční	191	1960	2020	8.7
30-4	Konvenční	187	1930	2010	9.3
31-4	Konvenční	194	1940	2020	9.2
20-4	0_X	178	2030	2090	6.1
21-4	0_X	205	2000	2100	6.1
22-4	0_Y	196	1970	2070	4.9
23-4	0_Y	186	2010	2090	6.1
24-4	90	190	1980	2060	5.7
25-4	90	179	1990	2050	4.7
26-4	90	201	1990	2100	5.5
27-4	90	196	1950	2050	5.3
36-4	45_X	198	1960	2030	4.9
37-4	45_Y	179	1970	2010	0.8
38-4	45_X	191	1950	2010	3.9
39-4	45_Y	185	1950	2010	0.7

Modul pružnosti tištěných vzorků byl srovnatelný s konvenčními vzorky a pohyboval se ve větším rozptylu (178–205 MPa) oproti vzorkům D10 (176–189 MPa). Vliv orientace nebyl pozorován.

Tažnost byla velmi podobná jako u předchozí fáze (4,9–6,1 %). Díky videozáznamům lze vyloučit červeně označené hodnoty, neboť byl během zkoušky zaznamenán prokluz snímačů způsobený velmi hladkým povrchem vzorků. Rovněž u ostatních (neoznačených) hodnot byl občas zaznamenán drobný prokluz. To nasvědčuje tomu, že skutečné hodnoty tažnosti jsou mírně vyšší. Konvenčně vyrobené vzorky dosáhly cca o 4,5 % vyšších hodnot tažnosti (8,7–9,7 %).

Mez pevnosti tištěných vzorků byla mírně vyšší než mez pevnosti vzorků konvenčních. Není zde již tolik patrný vliv směru tisku, hodnoty se oproti předchozí fázi posunuly k vyšším hodnotám. Totéž platí u hodnot naměřených pro mez kluzu. Drobné nuance jsou patrné z grafu na následujícím obrázku. Nejnižší hodnoty byly zaznamenány u vzorků tištěných pod úhlem 45° z recyklovaného prášku tištěných v jiném tisku než zbývající vzorky, tato skutečnost má dopad na výsledné hodnoty těchto vzorků.



Obr.83 *Vybrané křivky průběhu tahových zkoušek pro D4*

Podle výsledků této fáze není již vliv orientace na mechanické vlastnosti tak výrazný, lze ale stejně jako u žíhaných vzorků potvrdit vliv velikosti průřezu na hodnoty mechanických vlastností.

3.2.3.3 Fáze 3 – Zkouška tahem pro ploché vzorky průřezu 1,5 x 1 mm

Všechna testovaná tělesa byla vytištěna na jedné platformě. Podobně jako u fáze 3 pro žíhané vzorky i zde se projevil vliv kvality prášku, resp. částic, které recyklovaný prášek obsahuje. Důsledkem toho byly snížené hodnoty mechanických vlastností oproti hodnotám deklarovaným. Přes výše zmíněný vliv kvality lze pozorovat mírný vliv směru tisku.

Tab.18 Výsledky zkoušky tahem vzorků u průřezu 1,5 x 1 mm po vytvrzení

Č.vzorku	Ozn.	E [Gpa]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
-	Výrobce - min.		1862	1930	min. 2%
-	Výrobce - směr X, Y, Z	180 ± 20	1990 ± 100	2050 ± 100	4 ± 2
-	Konvenční 1.2709 dle tabulek		1910	1960	min. 6-7
M22	MT_17_V - konvenční	-			
M23	MT_17_V - konvenční	-			
M24	MT_17_V - konvenční	-			
M25	MT_17_0_X	-	1750	1830	10,4
M26	MT_17_0_X	-	1810	1842	10,3
M27	MT_17_0_X	-	1810	1898	10,2
M28	MT_17_0_Y	-	1600	1884	10
M29	MT_17_0_Y	-	1510	1743	10,7
M30	MT_17_0_Y	-	1690	1706	9
M31	MT_17_90	-	1580	1852	11,2
M32	MT_17_90	-	1640	1812	12,2
M33	MT_17_90	-	1710	1848	10,5

3.2.3.4 Sumarizace výsledků zkoušky tahem pro vytvrzené vzorky

Výsledky těchto zkoušek byly podobně jako u žíhaných a tištěných vzorků ovlivněny velikostí průřezu a kvalitou použitého vstupního materiálu.

Zajímavým zjištěním je **vliv orientace dílů na mechanické vlastnosti**, který byl nejvíce patrný především u vzorků D10, u nichž jednoznačně **nejvyšších hodnot meze pevnosti a kluzu dosahovaly vzorky tištěné ve směru X**, přestože výrobce vliv orientace u vytvrzených vzorků neočekává.

Zkušební tělesa D4 vykazovala vyšší pevnosti než tělesa D10, stejně jako u žíhaných vzorků. Meze pevnosti a kluzu konvenčních vzorků byly mírně nižší, srovnatelné s vlastnostmi tištěných vzorků ve směru 45° D4. Naopak tažnost konvenčních vzorků dosahovala v průměru o 4,5 % vyšších hodnot.

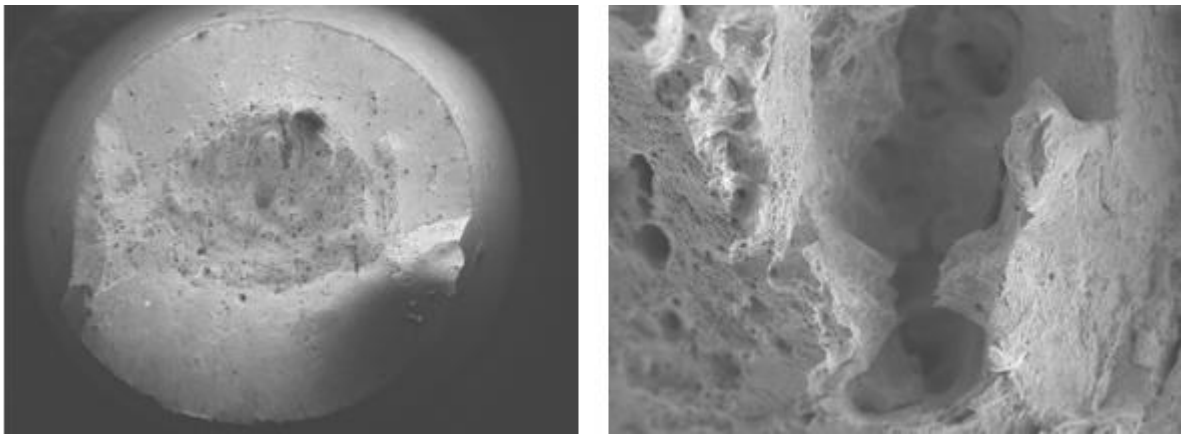
I přesto, že **vzorky obdélníkového průřezu byly ovlivněny přítomností nečistot**, vykazovaly mírný vliv směru tisku.

3.2.4 Fraktografie zatěžovaných těles

Pro komplexní hodnocení se na vybraných přetržených zkušebních tělesech D10 provedla fraktografie a světelná mikroskopie z oblasti pod lomovou plochou a z oblasti závitových hlav. Na všech výbrusech byla na světelném mikroskopu provedena kontrola mikrostruktury z příčných výbrusů ze závitových hlav a následně jejich detailní analýza na elektronovém mikroskopu. Ve vybraných oblastech příčných výbrusů bylo stanoveno lokální chemické složení s použitím EDS analýzy.

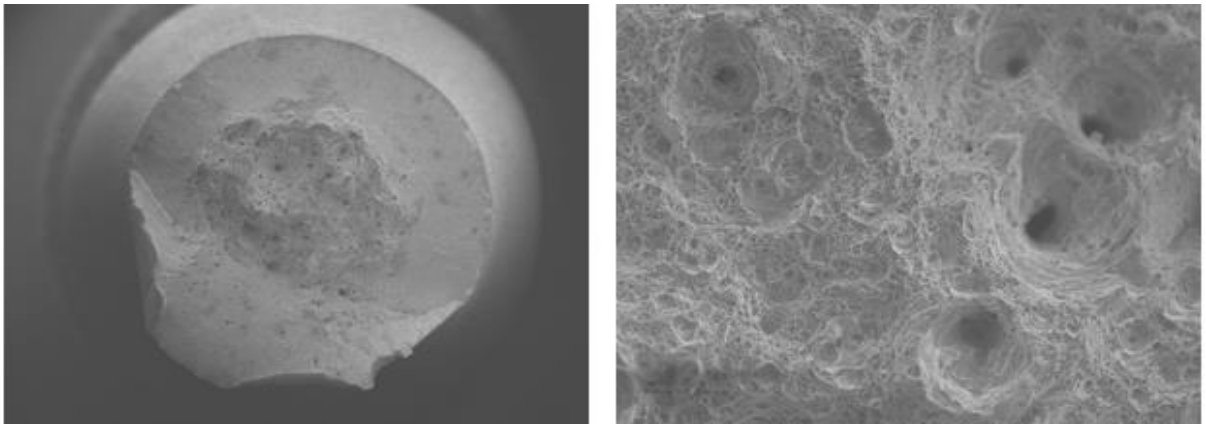
3.2.4.1 Fraktografie žíhaných vzorků

Žíhané vzorky se vyznačovaly tvárnými lomy, pro něž je typické velké množství jamek různých velikostí. Na Obr. 84 je vidět členitá lomová plocha vzorku 6 (směr X) s tvárnou středovou oblastí. Na lomu jsou patrné velké oblasti jamek, které v makropohledu vytváří viditelně pravidelné řetízky. S ohledem na vzhled mikrostruktury lze předpokládat, že drobné pravidelné jamky byly iniciovány na jemných částicích, jež tvoří u buněk s vhodnou orientací ke směru lomové plochy souvislé řádky. Místy jsou, především na přechodu středové a okrajové oblasti lomové plochy, patrné i rozsáhlé kavity s komplexními tvary, z jejichž stěn nebo dna často vybíhají další jamky nebo kavity způsobené pravděpodobně přítomností větších útvarů oxidů titanu. Z detailů SEM struktury je vidět, že tyto oxidy se snadno drobí (nebo se má větší počet drobnějších oxidů tendenci vyloučit na jednom místě) a při lomu se snadno mohly ze svých poloh uvolnit.



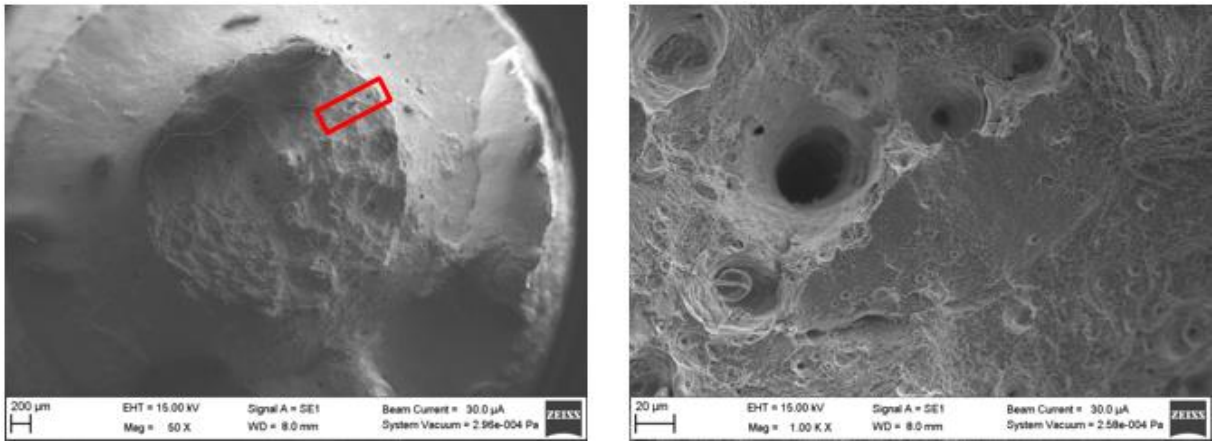
Obr.84 *Vlevo - Makro lomové plochy, SEM – velké množství jamek pravidelného tvaru; vpravo - Detail lomové plochy – kavita na lomové ploše s členitým dnem (vzorek 6)*

Členitá tvárná středová oblast lomu vzorku 15 (směr Y) s řadou hlubokých jamek a velmi jemnou jamkovitou morfologií mezi nimi je dobře patrná z Obr. 85. Na lomu byly kromě převážně sférických oxidů titanu také větší nepravidelné části oxidů železa. Na stěnách a dnech velkých jamek jsou vidět jemné jamky po menších částicích.



Obr.85 *Vlevo - Makro lomové plochy, SEM; vpravo - Detail lomové plochy (vzorek 15)*

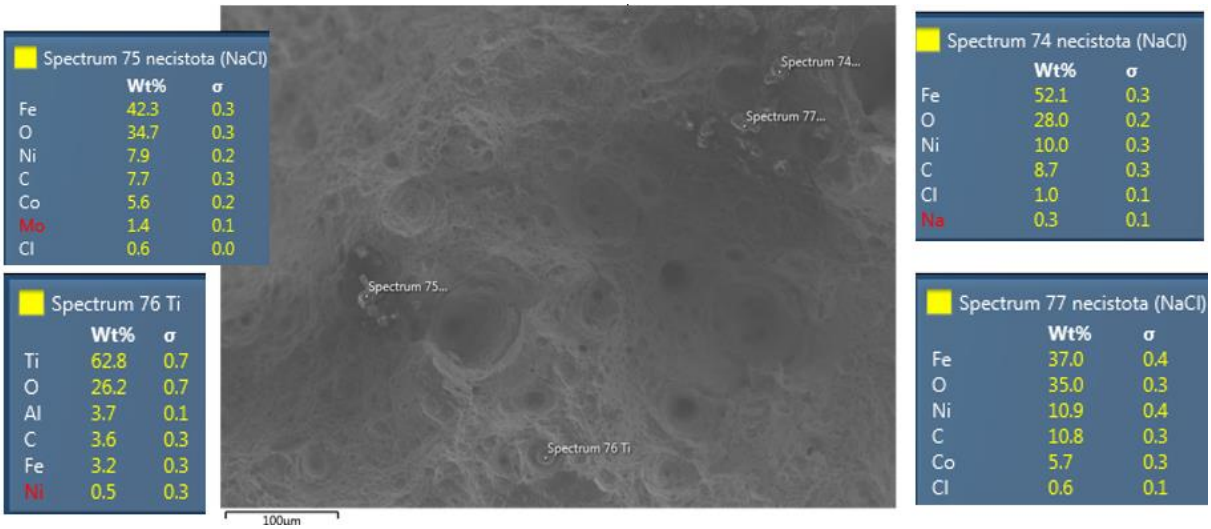
Vyřádkování větších jamek na přechodu středové a okrajové části lomové plochy ukazuje Obr.86 – vzorek 19 (směr Y). Řada jamek na snímcích je prázdná, ale zdá se, že ve všech byly původně částice, které vypadaly při přípravě a leptání.



Obr.86 *Vlevo - Makro lomové plochy, SEM; vpravo - Detail řádku jamek na přechodu středové a okrajové části lomové plochy (vzorek 19)*

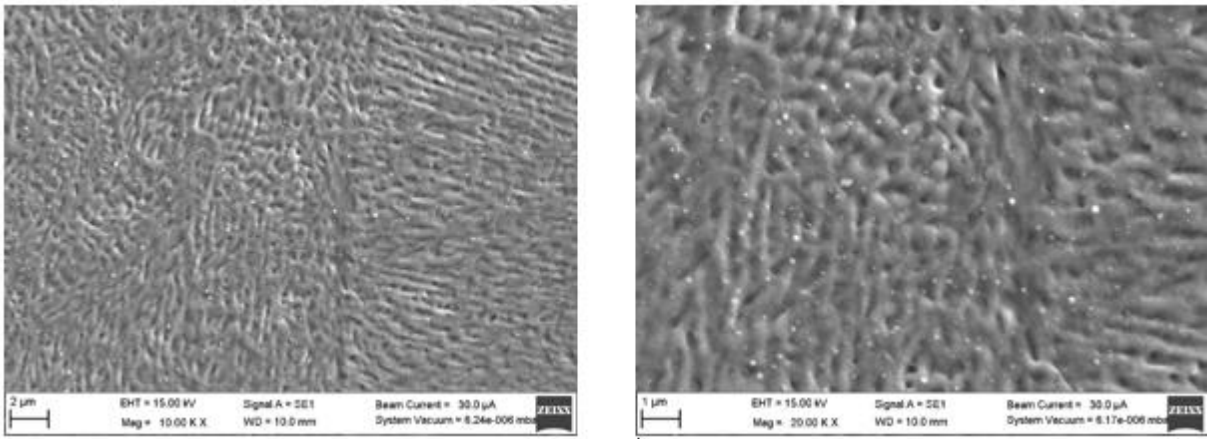
Větší jamky pravděpodobně vznikaly kolem částic Ti a Fe, menší kolem velmi jemných globulárních karbidů. U vzorku 6 (směr X) je na lomové ploše navíc patrné pravidelné vyřádkování jamek, v menší míře je tomu tak i u vzorku 14 (směr XY). Na lomové ploše vzorku 15 (směr Y) se nezdá být výskyt jamek pravidelný. U vzorků 18 (směr Z) a 19 (směr Y) není vyřádkování větších jamek tak výrazné jako u vzorků 6 (směr X) a 14 (směr XY), vyskytuje se jen místně a je to především na přechodu středové a okrajové oblasti lomové plochy nebo přímo v okrajové části lomu.

Následující obrázek ilustruje chemické složení v závislosti na místě měření.



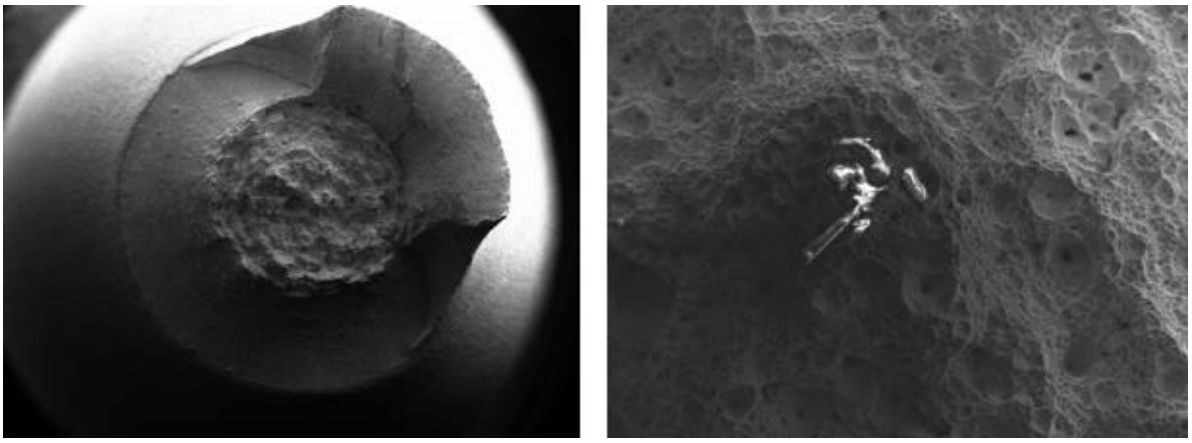
Obr.87 *Chemie lomové plochy*

Mikrostruktura žíhaných vzorků je, stejně jako struktura přímo po tisku, buněčná, ovšem s mnohem menšími a pravidelnějšími buňkami. V buňkách jsou umístěné velmi jemné globulární karbidické částice, ale také drobnější částice titanu nebo železa, pravděpodobně bílé tečky rozmístěné ve feritické buněčné mikrostruktuře (Obr. 86).



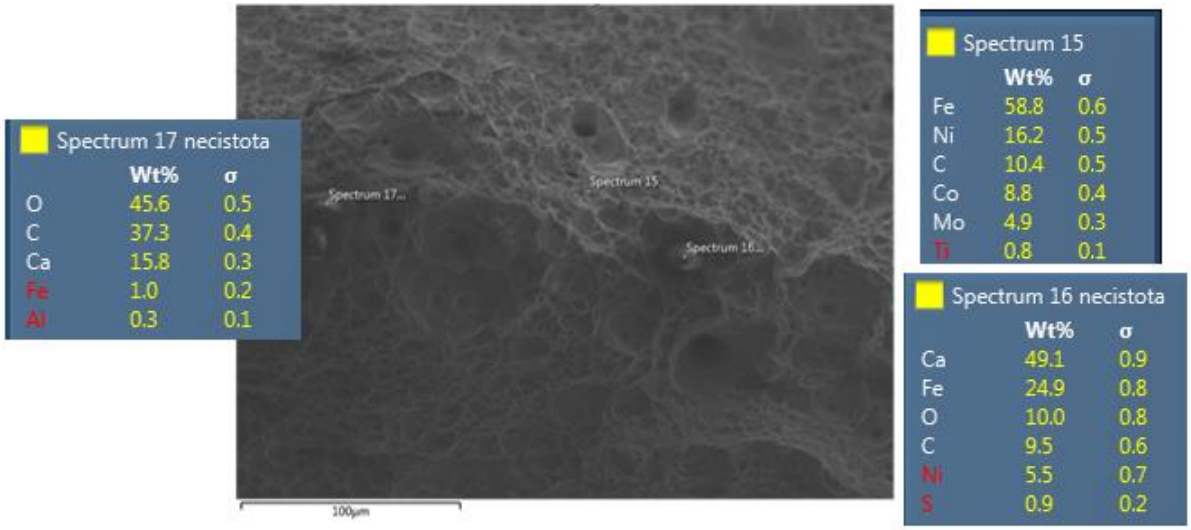
Obr.88 *Feritická buněčná struktura s velmi jemnými částicemi*

Výsledky fraktografie konvenčně vyrobeného vzorku po rozpouštěcím žíhání ukazují následující obrázky. Lom je rovněž tvárný s výraznou jamkovou morfologií, viz Obr. 89.



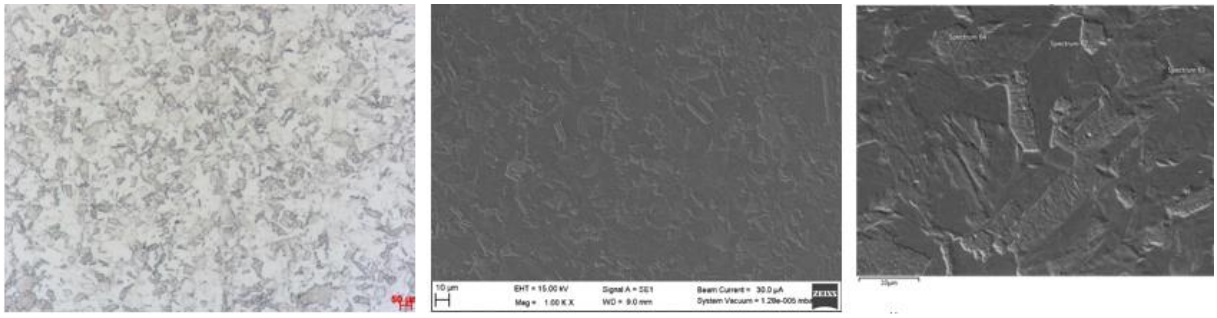
Obr.89 *Tvárný lom s výraznou morfologií konvenčně vyráběného vzorku 3 (T_16_1.2709_1)*

Chemie vybraných míst konvenčně vyrobeného vzorku 3 je ukázána na Obr. 90.



Obr.90 *Chemie lomové plochy konvenčně vyráběného vzorku 3*

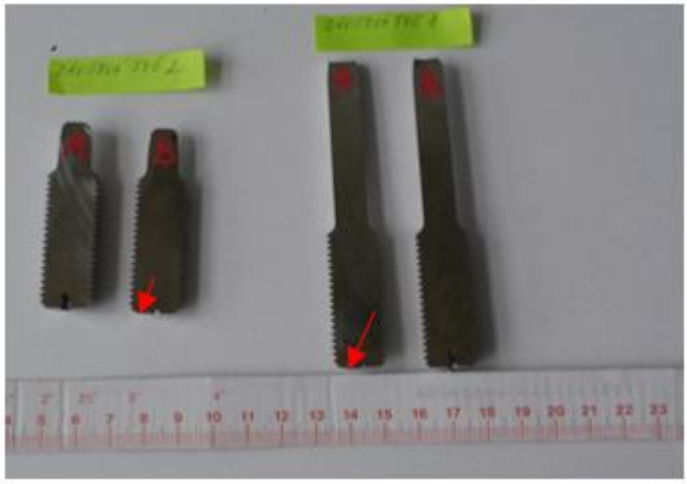
Mikrostruktura konvenčně vyrobeného vzorku je feriticko-perlitická, viz Obr. 91.



Obr.91 *Feriticko-perlitická struktura vzorku 3*

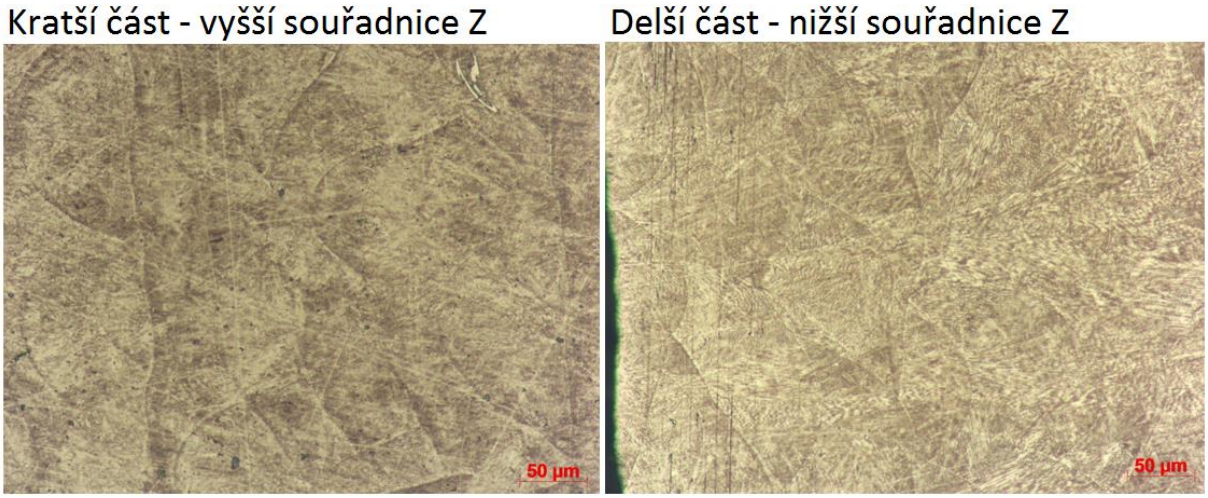
3.2.4.2 Analýza vlivu rozložení prášku v zásobníku na mikrostrukturu

U přetrženého vzorku 18, tištěného ve směru Z, byla provedena analýza s cílem porovnat protilehlé konce tyče (tj. vnější okraje závitových hlav), aby bylo možné posoudit vliv rozložení prášku v zásobníku na vytištěnou mikrostrukturu. Obě části tyče se podélně rozřízly a připravily se z nich markovýbrusy pro zdokumentování srovnávaných oblastí světlenou i elektronovou mikroskopií a pro měření průběhu mikrotvrdosti HV0.01.



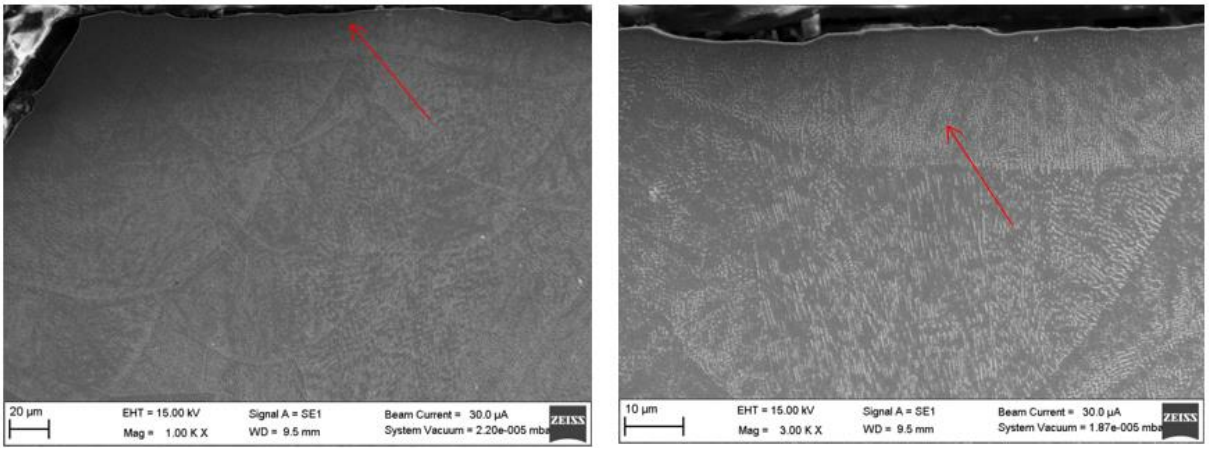
Obr.92 *Podélný řez vzorků; šipky označují analyzované oblasti*

Na Obr. 92 je vidět, že přetržené části nejsou symetrické, porušení nastalo ve zkušební části vzorku s vyššími souřadnicemi Z. Příčinnou porušení byly pravděpodobně nečistoty, které se nacházely převážně v kratší části vzorku, viz tmavé tečky v Obr. 93 vlevo. Delší vzorek vykazoval poměrně dobrou čistotu. Tento rozdíl v množství vměstků potvrzuje dříve popsanou teorii o nerovnoměrnosti rozložení prášku v zásobníku a dopad kvality prášku na kvalitu tisku. Výška horního konce kratší závitové tyče byla vytištěna 156 mm nad platformou, to znamená, že byl použit prášek nacházející se v zásobníku 203 mm od hladiny vrchní vrstvy. V kap. 3.1 je popsán, rozdíl rozložení částic mezi práškem v povrchových vrstvách zásobníku a částic v hloubce 200 mm. Bylo zjištěno, že prášek v nižších polohách zásobníku obsahuje výrazně větší podíl menších částic, než je tomu v povrchových vrstvách zásobníku. Z toho je patrný možný vliv rozdílného rozložení prášku na mechanické vlastnosti tištěného vzorku.



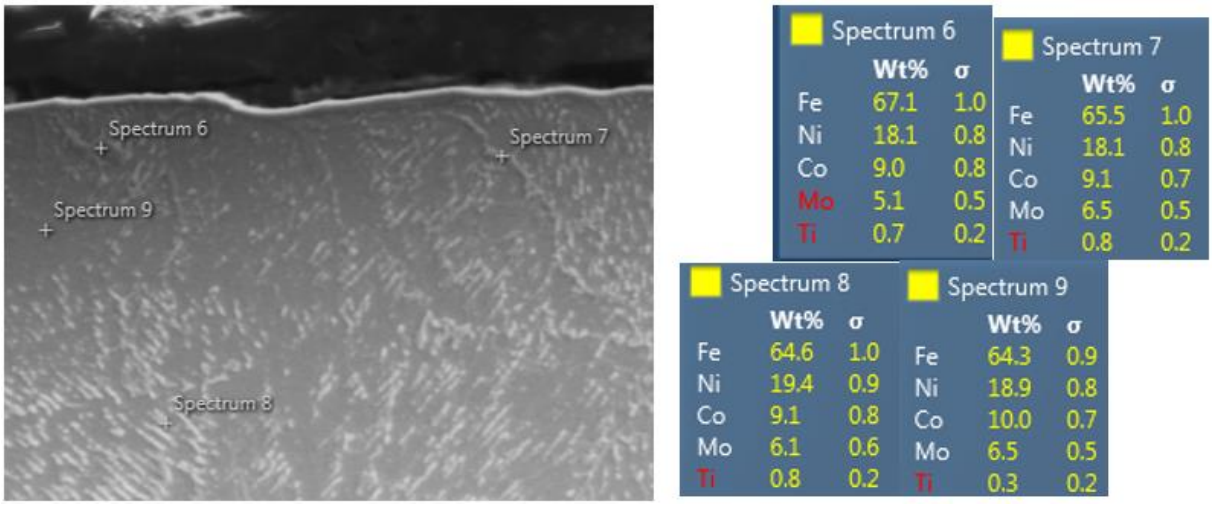
Obr.93 *Okrajová oblast vzorků – vlevo – kratší část s větším množstvím nečistot; vpravo – delší část výrazně lepší čistota*

Celkově lze mikrostrukturu vzorku tištěného ve směru Z popsat jako buněčnou s přítomností sekundární fáze (světlé útvary) na hranicích buněk. Na okraji vzorků jsou patrné odlišné tvary stop. Velmi široké a ploché, viz následující obrázek, které vznikly v důsledku změny procesních parametrů používaných pro povrchové vrstvy součásti.



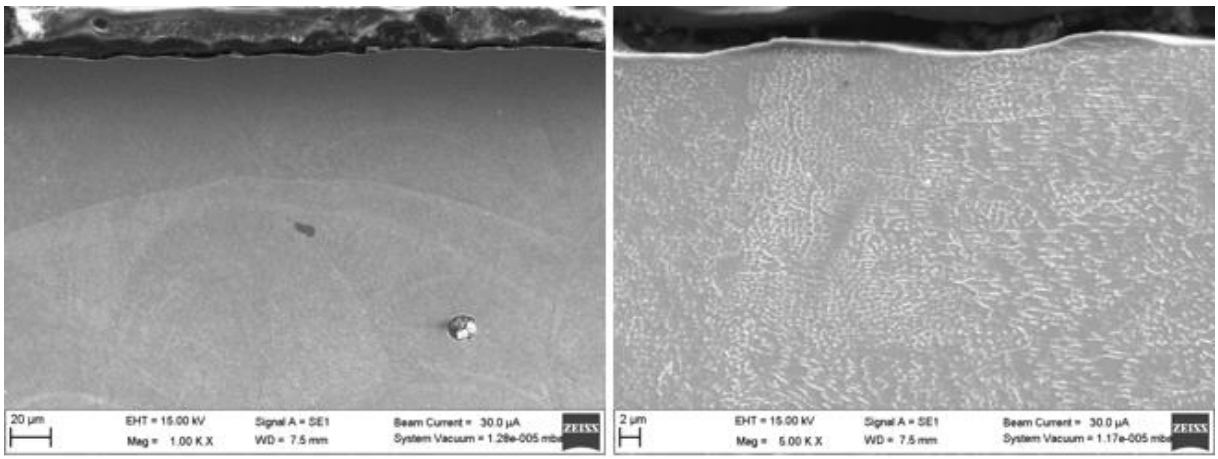
Obr.94 *Odlišný tvar stopy na okraji (označeno šipkou) – vlevo – celkový pohled; vpravo – detaill*

Buněčná mikrostruktura delší části obsahuje na okraji vzorku hrubší útvary sekundárních fází, viz Obr. 94. Bílé oblasti na Obr. 95 (spektrum 6–8) mají mírně snížený obsah kobaltu a zvýšený podíl titanu v porovnání s tuhým roztokem (spektrum 9).



Obr.95 *Buněčná struktura delší části s hrubšími útvary a její chemické složení*

Obr. 96 ukazuje kratší část vzorku s typickou okrajovou částí a s přítomností vměstků. Buněčná mikrostruktura s přítomností sekundární fáze (světlé útvary) na hranicích buněk je podobná jako u delší části. Tato analyzovaná část obsahuje větší hustotu světlých oblastí sekundárních fází, které vytvářejí jemnější substrukturu.



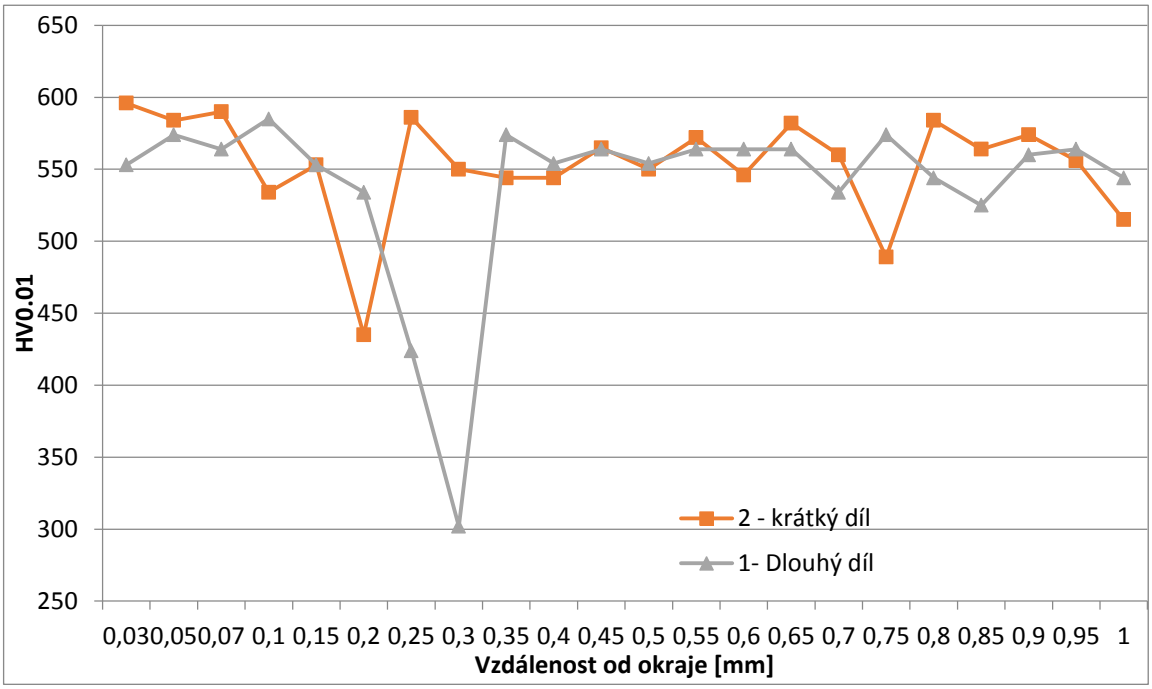
Obr.96 *Mikrostruktura kratší části*

Obecně lze říci, že na obou koncích je buněčná mikrostruktura stejného typu, tvořená tuhým roztokem a sekundární fází umístěnou na hranicích buněk, s občasným výskytem částic. Nejvýraznější odlišností obou zkoumaných konců je různá míra čistoty vzorků. Na delší části tyče je čistota výrazně lepší, než u kratší části tyče.

V bezprostřední blízkosti okraje vzorků byla zjištěna rozdílná mikrotvrdost, a to o 50 jednotek HV0.01, viz graf na Obr. 97. S ohledem na celkově větší rozptyl tvrdostí zjištěný u 3D tisků však není tato hodnota zcela průkazná.

Na povrchu delšího vzorku byly pozorovány rozsáhlejší oblasti s menší hustotou útvarů sekundární fáze, a tím celkově hrubší mikrostrukturou. To by mohlo způsobit menší tvrdost těchto oblastí. Tento jev však může být také pouze projevem náhodné orientace buněk na obou vzorcích vzhledem k rovinám výbrusu, nebo projevem různé míry naleptání mikrostruktury.

Provedená analýza potvrzuje vliv rozložení prášků v zásobníku na výslednou strukturu a na její kvalitu. Podrobněji jsou výsledky popsány v Protokolu o měření, viz [87].

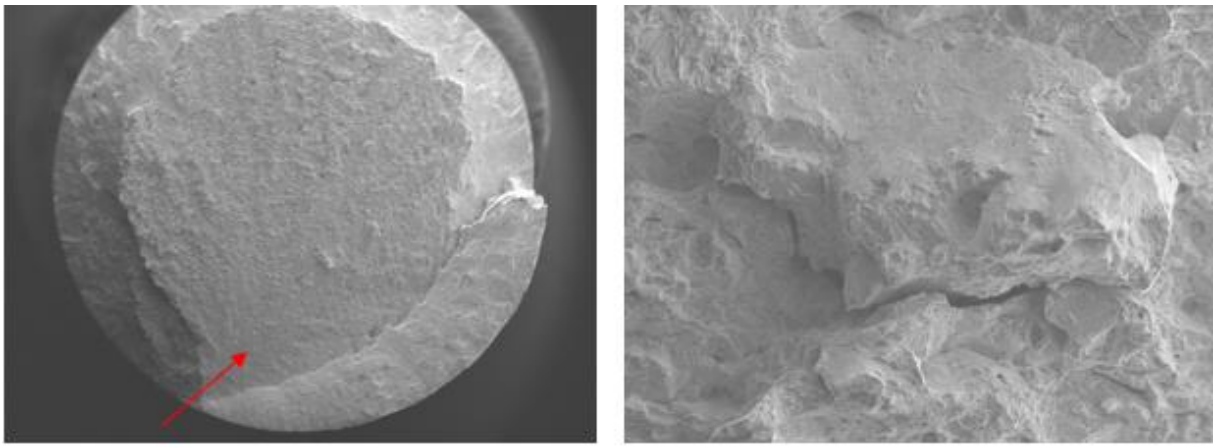


Obr.97 *Průběh tvrdosti obou částí vzorků v závislosti na poloze vtisku*

3.2.4.3 Fraktografie vytvrzených vzorků

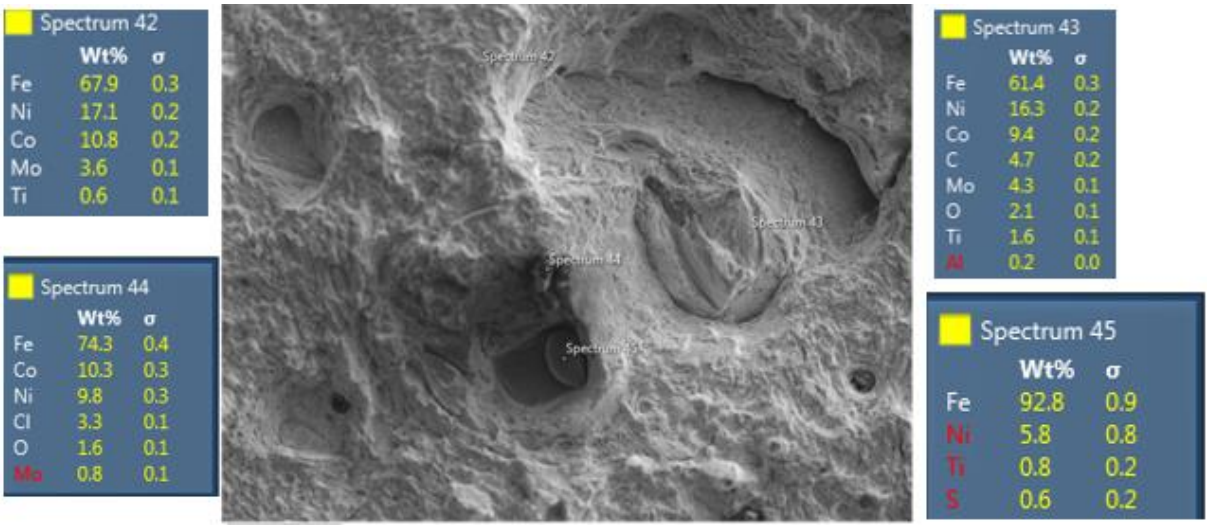
Lomové plochy vytvrzených vzorků jsou si navzájem velmi podobné. Mají rovinné centrální oblasti, ve kterých došlo k iniciaci a prvotnímu šíření trhliny obklopené okružím s oblastí dolomení. Ve středové oblasti je tvárný lom s občasným výskytem jamek na částicích Ti a Fe.

Plochou centrální část tvárného lomu s jamkovitou morfologií označuje šipka na Obr. 98. Místy bylo patrné odlamování částí materiálu z povrchu lomu. Iniciace lomu nastala na okraji rovinné části.



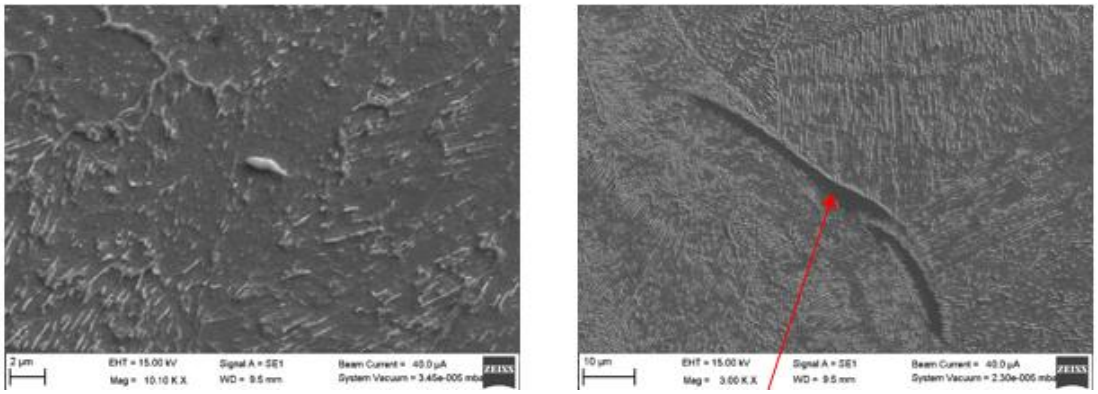
Obr.98 *Vlevo – makrolomové plochy, SEM; vpravo – detail lomové plochy – sekundární trhlina – vzorek 12 (T_16_45_X_2)*

Detail z oblasti iniciace lomu ukazuje následující obrázek. Na lomu byly identifkovány částice bohaté na železo a jamky v místech, odkud částice vypadly. Na dně jamky je patrná částice železa (resp. bohatá na železo), viz Obr. 99 – Spektrum 45.



Obr.99 *Detailní oblasti lomu – vzorek 10 (T_16_0_X_3)*

Mikrostruktury kalených vzorků jsou velmi podobné původní struktuře po 3D tisku. S ohledem na měřené mikrotvrdosti kolem 600 HV0,1 lze tyto buněčné mikrostruktury považovat za martenzitické, přestože žádné charakteristické rysy martenzitické struktury nejsou vidět, a to ani při velkém rozlišení.



Obr.100 *Buněčná feritická mikrosturktura, oxidy titanu a železa – Chemické složení oblasti: Fe (48 %) – C (23 %) – Ni (17 %) – Co (7,4 %) – Mo (3,3 %)*

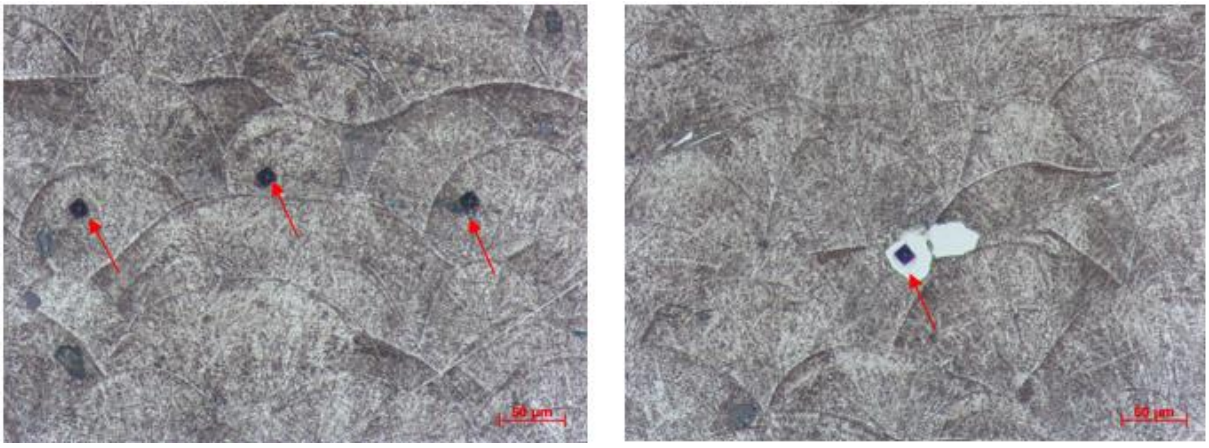
3.2.4.4 Měření mikrotvrdosti a RTG analýza

Jak již bylo zmíněno, byly měřeny mikrotvrdosti vzorků na podélných výbrusech ze závitových hlav a z oblastí pod lomem. Každá z uvedených hodnot v Tab. 19 je průměrem z pěti měření (každé měření bylo provedeno v jedné stopě laseru – viz Obr. 101 vlevo).

Naměřené hodnoty žíhaných vzorků jsou podobné, pohybují se kolem 330 HV 0,1, zatímco tvrdost kalených vzorků je cca 600 HV 0,1. V okolí lomu se zdá, že tvrdost kalených vzorků nepatrně klesá, zatímco tvrdost žíhaných mírně roste. Rozdíly tvrdostí v oblasti pod lomem a v závitových hlavách se pohybují většinou kolem 20 HV0,1, to ale nemá velký význam. U žíhaných i kalených vzorků se ve struktuře vyskytovaly bílé ostrůvky. Mikrotvrdost těchto bílých fází byla totožná u žíhaných i vytvrzených vzorků a pohybovala se okolo 290 HV0. Měření mikrotvrdosti bílé fáze bylo z důvodu velké časové náročnosti provedeno do jednoho kaleného a jednoho vytvrzeného vzorku. Vzhledem k problémům s nalezením dostatečně velkého ostrůvku pro umístění vtisku při zátěži 10 g (viz Obr. 101 vpravo) je každá z hodnot průměrem pouze ze tří měření. Nízká tvrdost vylučuje, že by se mohlo jednat o karbidy legujících prvků, a podporuje identifikaci bílé fáze jako zbytkového austenitu.

Tab.19 Tvrdosti hodnocených vzorků v oblasti pod lomem, pod závitem a v bílé fázi

Č. vzorku – oblast měření - TZ	HV0,1 - matrice	Směrodatná odchylka (σ)
3-závit - žíháno	290	2
3-lom - žíháno	349	4
6-závit - žíháno	328	2
6-lom - žíháno	348	4
14-závit - žíháno	323	3
14-lom - žíháno	339	1
15-závit - žíháno	341	4
15-lom - žíháno	363	2
1-závit - vytvrzeno	567	3
1-lom - vytvrzeno	556	4
9-závit - vytvrzeno	618	3
9-lom - vytvrzeno	575	3
10-závit - vytvrzeno	602	2
10-lom - vytvrzeno	566	3
12-závit - vytvrzeno	593	2
12-lom - vytvrzeno	556	9
	HV0,01 – bílá	
15-závit - žíháno	288	1
9-závit - vytvrzeno	292	4



Obr.101 *Vtisky po měření tvrdosti matrice*

Na dvou vybraných vzorcích (6 a 9) byla provedena RTG analýza za účelem zjištění podílu fází. Oba vzorky se tiskly ve směru X, lišily se v tepelném zpracování. Měření bylo provedeno na automatickém práškovém difraktometru AXS Bruker D8 Discover s plošným, pozičně citlivým detektorem HI-STAR a kobaltovou RTG lampou ($\lambda_{K\alpha}$ = 0,1790307 nm). Přístroj je dále vybaven polykapilárou, která fokusuje primární RTG svazek na kruhovou stopu o průměru 0,5 mm. Měření se provádělo ve středu metalografického výbrusu závitové hlavy a v oblasti těsně pod lomem v intervalu difrakčních úhlů 25 ÷ 110°2ϑ.

U žíhaného vzorku 6 nebyl RTG difrakcí na výbrusu ze závitu ani z okolí lomu zjištěn žádný zbytkový austenit ani minoritní fáze, ve struktuře bylo identifikováno 100 % feritu (BCC mřížka a = 0,28779 nm).

Na obou výbrusech vzorku 9 (podélný a příčný) bylo naměřeno zhruba 8,5 % zbytkového austenitu, matrice je feritická (BCC mřížka s parametrem a = 0,28716 nm). Dále byly identifikovány tři minoritní fáze, na výbrusu závitové hlavy FeNi (6 %) a na výbrusu z lomu $Cu_{0,2}Ni_{0,8}Ti$ (4,7 %) a Al_3FeSi_2 (7 %).

(Pozn. Přesné určení minoritních fází je obtížné, protože mají slabé difrakční linie. V tomto případě lze vyloučit, že by linie byly jen artefakty ze struktury.)

RTG analýza může být zkreslena výběrem oblasti. Pro další zkoumání bude přesně vybrána oblast měření a měření bude zopakováno.

3.2.4.5 Sumarizace výsledků fraktografie zkušebních těles

U žádného vzorku nebyl na světelném mikroskopu pozorován rozdíl mezi strukturou příčného a podélného řezu závitové hlavy a oblasti pod lomem. U všech tištěných vzorků byly v mikrostruktuře pozorovatelné ostře ohraničené bílé ostrůvky pravděpodobně zbytkového austenitu, to zatím nebylo RTG difrakcí jednoznačně potvrzeno.

Lomové plochy kalených vzorků jsou navzájem velmi podobné. Mají rovinné centrální oblasti, ve kterých došlo k iniciaci a prvotnímu šíření trhliny, obklopené okružím s oblastí dolomení. Ve středové oblasti je tvárný lom s občasným výskytem jamek na částicích Ti a Fe.

Žíhané vzorky mají rovněž velmi podobné tvárné lomové plochy, pro které je typické velké množství jamek různých velikostí. Větší jamky pravděpodobně vznikaly kolem částic Ti a Fe, menší kolem velmi jemných globulárních karbidů

Mikrostruktury kalených vzorků jsou velmi podobné původní struktuře po 3D tisku. S ohledem na tvrdosti kolem 600 HV0,1 lze tyto buněčné mikrostruktury považovat za

martenzitické, přestože žádné charakteristické rysy martenzitické struktury nejsou vidět, ani při velkém rozlišení.

Mikrostruktura žíhaných vzorků je také buněčná, ovšem s mnohem menšími a pravidelnějšími buňkami. V buňkách jsou umístěné velmi jemné karbidické částice, ale také drobnější částice titanu nebo železa. Matrice je feritická.

Naměřené tvrdosti žíhaných vzorků se pohybují 330 HV 0,1, tvrdost vytvrzených vzorků je cca 600 HV 0,1. Zdá se, že v okolí lomu tvrdost kalených vzorků nepatrně klesá, zatímco tvrdost žíhaných mírně roste. Rozdíly tvrdostí v oblasti pod lomem a v závitových hlavách jsou zanedbatelné. U žíhaných i kalených vzorků byla zjištěna stejná tvrdost bílé fáze cca 290 HV0,01. Nízká tvrdost podporuje myšlenku identifikace bílé fáze jako zbytkového austenitu. Tento předpoklad bude dále ověřován.

3.2.5 Závěr výzkumu mechanických vlastností při zkoušce tahem

Tato podkapitola si kladla za cíl ověřit výrobcem udávané hodnoty při statické zkoušce tahem, zjistit, zda jsou hodnoty konstantní pro různé velikosti zkušebních těles, a zjištěné mechanické vlastnosti porovnat s vlastnostmi konvenčně vyráběného materiálu a rozšířit tuto problematiku o nové poznatky.

Pro naplnění výše uvedených cílů byla testována zkušební tělesa rozdílných velikostí (D10, D4, s obdélníkovým průřezem 1,5 x 1 mm), s různým tepelným zpracováním (po tisku, po rozpouštěcím žíhání a po vytvrzení) vyrobená 3D tiskem a konvenční výrobou. Po mechanickém zatěžování následovaly materiálové analýzy – fraktografie lomů, hodnocení mikrostruktury, měření tvrdosti a rentgenová difrakce. Výstupem je komplexní hodnocení s četnými dosud nezveřejněnými závěry. Projevil se vliv velikosti vzorku, vliv kvality prášku, vliv tepelného zpracování i vliv směru tisku, který se ovšem v drtivé většině případů projevil jinde, než udává výrobce. To je také jedním z hlavních nalezených nesouladů.

Při porovnání získaných hodnot s hodnotami udávanými výrobcem se dospělo k závěru, že tištěné vzorky D4 vykazovaly shodu s hodnotami, které udává výrobce, s výjimkou hodnot meze kluzu, které se pohybovaly cca o 200 MPa výše, než je stanovená střední hodnota pro tento směr. Výrobce udává pro tištěný materiál rozdílné mechanické vlastnosti pro směry X a Y a pro směr Z. To však nebylo v rámci provedených experimentů potvrzeno.

Vliv směru tisku měl být nalezen rovněž u tištěných vzorků po rozpouštěcím žíhání, po kterém by dle výrobce měl díl dosahovat srovnatelných mechanických vlastností jako po tisku. Mírný trend orientace byl pozorován pouze u D4, u ostatních velikostí se neprojevil. Mechanické vlastnosti žíhaných těles byly celkově nižší než u vzorků bez TZ, a to velmi výrazně u meze kluzu – až o 200 MPa.

Přestože jsou v materiálových listech udávané pro všechny směry stejné mechanické vlastnosti, vykazovaly vytvrzené vzorky vliv orientace na výsledné mechanické vlastnosti, nejvýrazněji u D10.

Vliv velikosti vzorku se projevil u všech variant výroby a tepelného zpracování, a to nejvíce v mezi kluzu. Zatímco u tištěných vzorků mez kluzu se zmenšujícím se průřezem rostla, u konvenčně vyrobených klesala. Nejvyšší hodnoty mechanických vlastností pro tisk byly naměřeny pro D4. Vzorky obdélníkového průřezu se porušovaly v závislosti na kvalitě spékaného prášku, která ovlivňovala velikost síly potřebnou pro porušení.

Rozložení velikosti a kvalita prášku byla sledována na žíhaném vzorku tištěném ve směru Z, přičemž nejvýraznější odlišností sledovaných oblastí (v blízkosti platformy a nejdále od platformy) byla různá čistota. U platformy byla pozorována hrubší mikrostruktura s nepatrně nižší tvrdostí povrchové vrstvy a výrazně lepší čistotou než na opačném konci tyče s jemnější mikrostrukturou. Provedená analýza potvrdila vliv rozložení prášků v zásobníku na výslednou strukturu a na její kvalitu.

Mikrostruktura žíhaných i vytvrzených vzorků byla stejně jako po tisku buněčná s feritickou matricí, ovšem u žíhaných vzorků s mnohem menšími a pravidelnějšími buňkami. V buňkách byly umístěné velmi jemné karbidické částice, ale také drobnější částice titanu nebo železa. Mikrotvrdost se pohybovala okolo 330 HV0,1. Vytvrzené vzorky (naměřené mikrotvrdosti cca 600 HV0,1) se podobaly původní struktuře po 3D tisku a jejich strukturu lze považovat za martenzitickou.

U žíhaných i kalených vzorků byla zjištěna přítomnost bílé fáze o mikrotvrdosti cca 290 HV0,01. Nízká tvrdost podporuje myšlenku identifikace bílé fáze jako zbytkového austenitu. To bylo u vytvrzených vzorků potvrzeno RTG analýzou. U žíhaných vzorků bude tato myšlenka dále ověřována.

Při porovnávání konvenčně vyrobených vs. tištěných vzorků lze vycházet ze způsobu výroby, který je zcela odlišný. Konvenční materiál vyrobený odlitím, následným překováním a na závěr zpracovaný rozpouštěcím žíháním pro zjemnění struktury musí být z principu zmíněných postupů zcela jistě homogennější, než je tomu u tištěného materiálu stejného označení, který vzniká z prášku postupným natavováním jednotlivých vrstev procesem laserového spékání. Pro tento proces je typický opakující se prudký nárůst teploty a postupné chladnutí, bez následného prokování. To je příčinou vyšší porozity (cca 1,5 %) oproti konvenčně vyráběnému materiálu a odlišné struktury (konvenční – feriticko-perlitická, tištěné – feritická). Důsledkem toho je nižší tažnost tištěných vzorků po vytvrzení (o 4,5 %). Mez pevnosti aditivně vyráběných vzorků byla bez ohledu na způsob následného TZ vyšší. Hodnota meze kluzu závisela na velikosti vzorků. Pro vzorky D4 byla srovnatelná, ale u D10 byla vyšší u konvenčních vzorků, přestože jejich mez pevnosti byla nižší. To je v důsledku slabým místem této technologie, neboť u větších nebo naopak příliš tenkých vzorků klesá spolehlivost jeho použití. Významný vliv na výsledek procesu tisku má z pohledu mechanických vlastností zcela jistě příprava stroje a kvalita použitého materiálu.

Cíle stanovené v úvodu kapitoly 3.2 byly naplněny a získané výsledky mají přínos nejen pro akademickou sféru, ale i pro praktické použití při výrobě reálných dílů.

4 Ověření všeobecných zásad a pravidel 3D tisku

Cílem této kapitoly bylo prakticky ověřit všeobecně uznávané zásady a pravidla 3D tisku s ohledem na nové poznatky zjištěné v kapitole 3. Ověření proběhlo na konkrétním dílu dle zadání firmy Škoda Machine Tool, a.s.

Úkolem bylo provést návrh a výrobu zadaného dílu s deklarováním jeho spolehlivého provozu min. 10 000 hodin ve výrobním procesu. V rámci vlastního řešení bylo potřeba řešit celou řadu technologických otázek a ověřit tak teoreticky získané znalosti a zároveň i znalosti získané v experimentální části práce.

Zadaným dílem byl kryt mazání hlavního pohonu (převodového mechanismu) jednoúčelové frézky pro výrobu příruby lopatky větrné elektrárny (průměr příruby 2 m, dl. lopatky 100 m) o celkovém rozměru finálního dílu 287 x 417 x 210 mm během 10 kalendářních dní. Jednalo se tedy o poměrně velkou součást, jejímž hlavním úkolem bylo chránit převodový mechanismus stroje, přivést k němu mazací médium a zamezit jeho rozptylu do dalších částí, přenést vibrace a teplotní zatížení vznikající při obrábění a především zabezpečit bezpečný provoz min. 10 000 hodin.

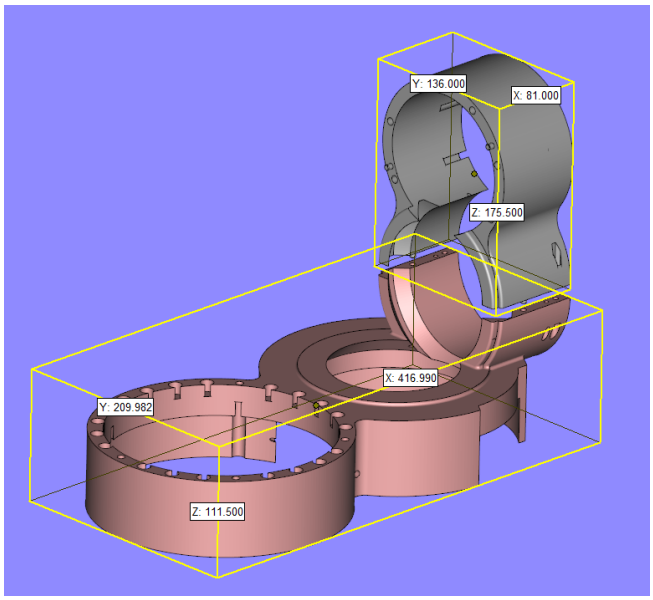
Velmi krátký dodací termín byl dán tím, že nešlo tzv. o zakázku od nuly, ale zákazník musel do daného termínu repasovat díl, který byl původně vyroben z plastu a nesplnil výše zmiňované požadavky. Následkem jeho porušení došlo k poškození celého převodového mechanizmu. Zákazník zjišťoval možnosti výroby různými technologiemi jako např. výroba z plechu, odlitek, konvenční obrábění atd. Žádná z nich ale nebyla schopná splnit zadané požadavky v tomto krátkém časovém termínu.

4.1 Výchozí stav

Původní kryt byl vyráběn 3D tiskem polyamidového prášku PA 2200 na zařízení EOSINT P 385 od firmy EOS GmbH. Prášek byl spékán laserovým paprskem po vrstvách 0,1–0,15 mm (metoda SLS). Výhodou této technologie je především možnost výroby součástí bez podpor, protože případný podpůrný materiál tvoří neexponovaný prášek[82].

Modul pružnosti pro materiál PA 2200 je 1700 MPa a uváděný bod měknutí je 165°C, další mechanické vlastnosti tohoto polyamidu jsou uvedeny v Příloze 5 [83].

Finální výrobek, viz model na Obr. 102, byl zákazníkovi dodáván ve dvou dílech, přičemž rozměrnější díl byl ve střední části předělen rybinovým spojem a po vytištění následně slepen dohromady.



Obr.102 *Model zadaného dílu původně vyráběného z plastu*

Jak již bylo zmíněno, kryt sloužil k zabezpečení mazacího média v převodové sestavě a zároveň k zamezení jeho prostupu mimo převodový mechanismus. Opakovatelnost dodržení rozměrů nebyla při této technologii spolehlivě zaručená a při montáži součástí často docházelo k jejich úpravě na míru. Namontovaný díl je vidět na Obr. 103. Hlavní nedostatek plastového dílu byl odhalen až po několika stovkách hodin práce frézky. Při dvousměnném provozu docházelo k přehřívání plastu, jeho následnému změknutí a deformaci krytu. Příčinnou poruchy stroje bylo velmi často zatavení mazacího kanálku, které v konečném důsledku způsobilo zvýšení teploty v převodovém mechanismu vlivem tření ozubených kol, tím došlo až k degradaci krytu, viz Obr. 103, a často i k porušení ozubených kol. S přihlédnutím k uváděnému bodu měknutí 165 °C je zřejmé, že teplota při porušení musela být vyšší.

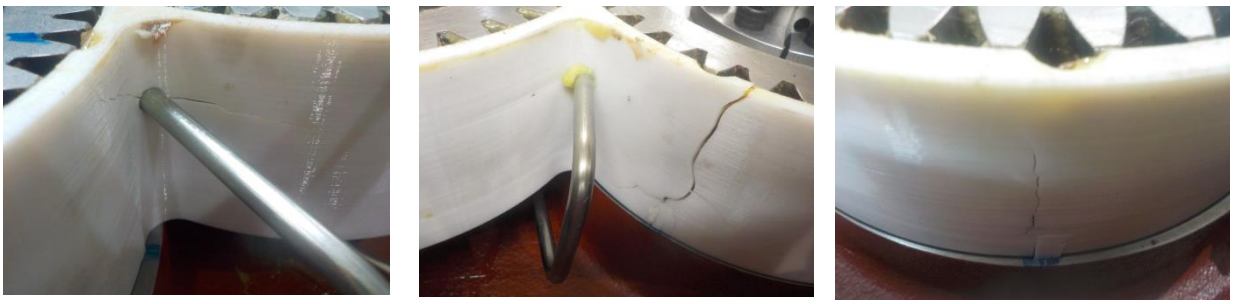
Obr.103 *Namontovaný plastový kryt (vlevo); plastový kryt deformovaný v průběhu provozu (vpravo)*

Přestože výroba trvala pouze několik hodin a vstupní náklady na výrobu krytu byly cca 25 000 Kč, nebyla z důvodu spolehlivosti provozu tato varianta vhodná. V konečné fázi muselo dojít k opravě sestavy, tím vznikly vícenáklady v ceně cca 150 000 Kč, které mimo jiné zahrnovaly transport do výrobního podniku, výměnu dílu a výměnu porušených kol.

Z důvodu nesplnění zadaných požadavků byla v druhé fázi provedena výroba dílu z jiného materiálu, rovněž plastu vyráběného 3D tiskem, ale nikoliv technologií SLS, ale FFF,

známou také jako FDM, jehož teplotní stabilita byla do 250°C. V současné době se jedná o jednu z nejpoužívanějších technologií pro 3D tisk. Materiálem pro tisk je tisková struna (plastové vlákno jedné barvy namotané na cívce) přiváděná do tiskové hlavy pod tlakem. Poté dojde k roztavení materiálu a jeho následnému vytlačování tenkou tryskou. Celá soustava se pohybuje nad tiskovým stolem, na němž se z vytlačovaného materiálu po jednotlivých vrstvách tvoří výsledný objekt [84].

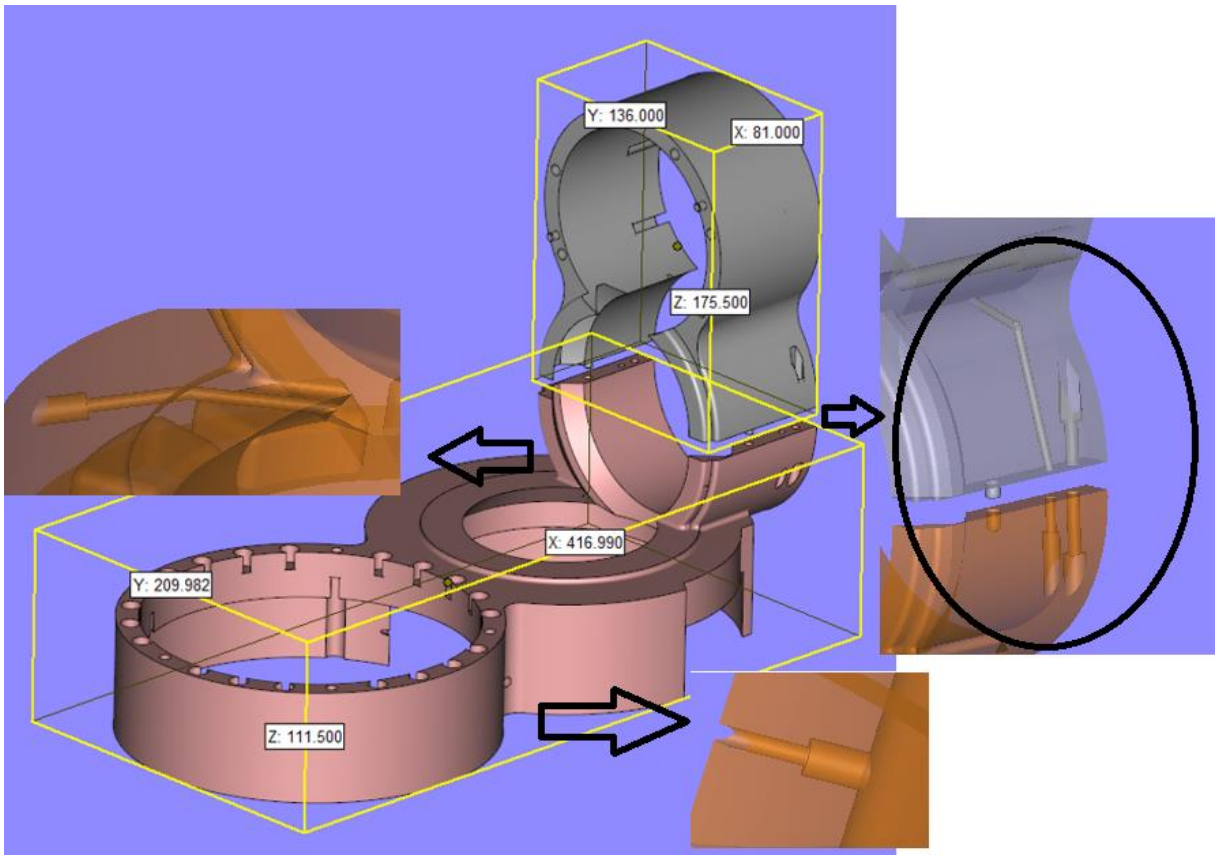
Tato varianta byla zavržena již po smontování sestavy, neboť vlivem velkého vnitřního pnutí docházelo ke vzniku prasklin, a tím k nesplnění požadovaných kritérií, viz Obr. 104.



Obr.104 *Ukázka popraskání dílu po smontování – materiál polykarbonát - technologie výroby FDM*

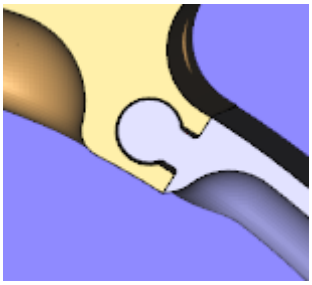
4.2 Výroba 3D tiskem kovů

Díly připravené pro technologii výroby SLS byly zákazníkem zadány pro tisk z kovu, konkrétně z materiálu MS1. Celkově by odhadovaná váha sestavy bez podpor dle SW Magics byla 9,8 kg. Přestože se konstruktéři již u tisku z plastu snažili součást odlehčit, byl zde stále prostor pro další redukci hmotnosti dílu. Sestava obsahující různá odlehčení a několik mazacích kanálků, viz Obr. 105, se skládala ze dvou částí. Menší z nich měla rozměry 136 x 175 x 81 mm a rozměrnější díl byl o velikosti 209 x 417 x 112 mm, to znamenalo nutnost jeho rozdělení min. na dvě části, neboť velikost pracovního prostoru stroje je 250 x 250 x 325 mm.



Obr.105 *Sestava tištěná metodou SLS*

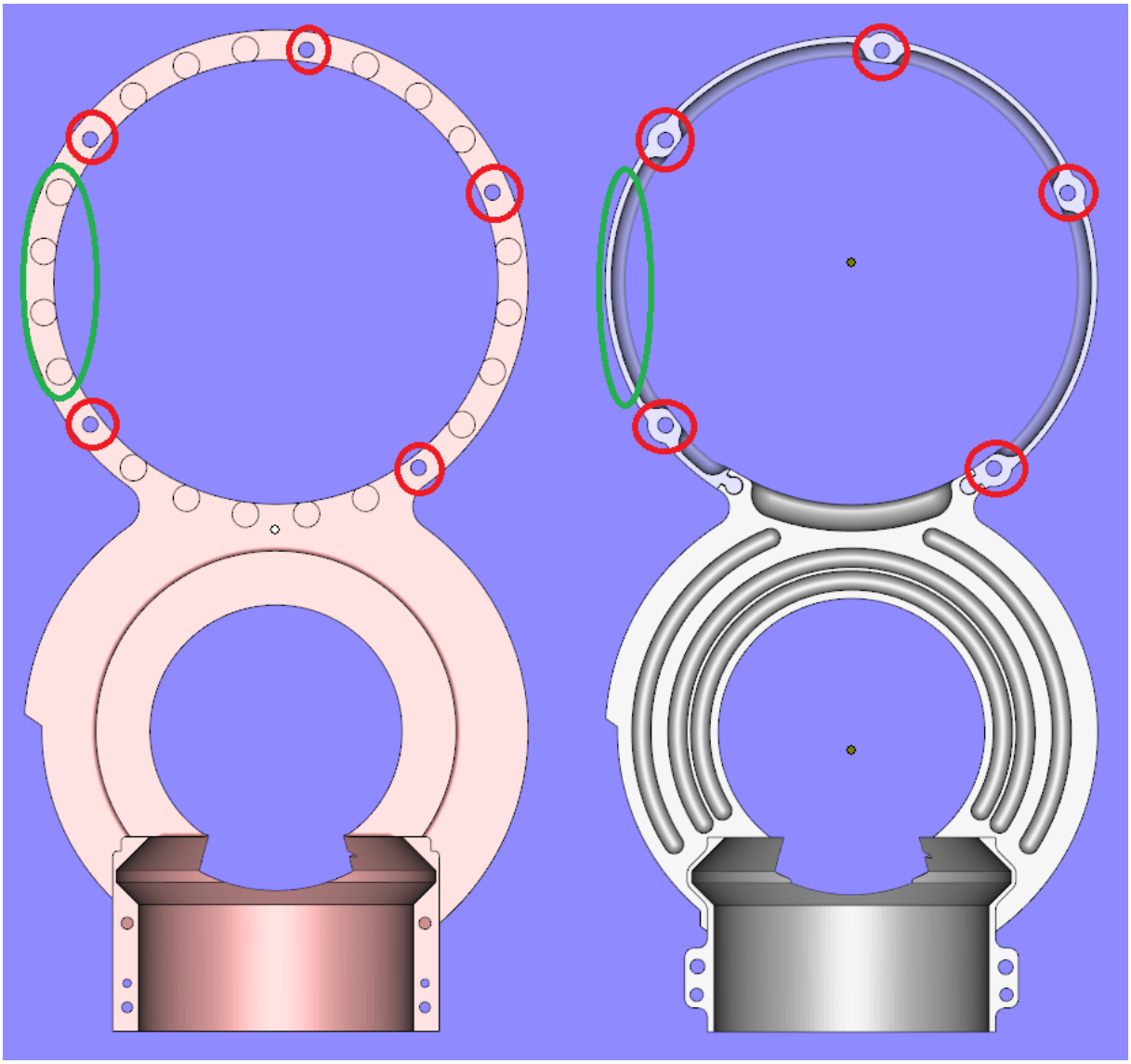
K rozdělení došlo v zúžení. Otázkou bylo, jak zajistit spolehlivé spojení sestavy v jeden funkční celek. Finálně bylo spojení vyřešeno tzv. puzzle spojem (Obr.106), který zamezuje posunutí součásti v rovině XY.



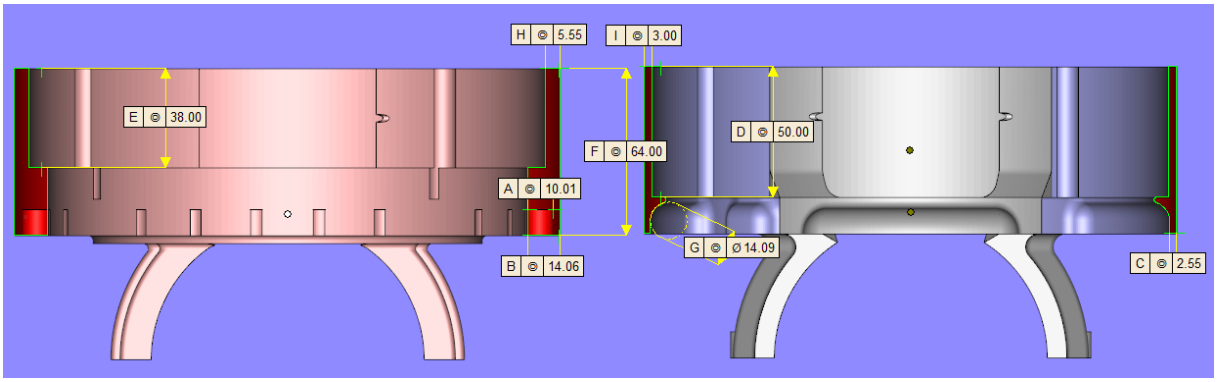
Obr.106 *Navržený spoj „puzzle“*

Pro efektivní a ekonomicky přijatelné řešení 3D tiskem z kovového prášku muselo dojít k úpravě prakticky celé konstrukce dílu. Následující obrázek ukazuje úpravu většího dílu při pohledu na spodní stranu součásti. V levé části je zobrazen původní stav a vpravo stav upravený. Červeně jsou v obrázku označeny otvory sloužící pro připojení krytu k dalším částem frézky. Tyto prvky byly pevně dané a musely být zachovány. Zelená barva označuje jednu ze sekcí děr pro hlavy šroubů umístěných v sestavě frézky. Zde bylo provedeno odebrání materiálu po celém obvodě rozděleného dílu, výsledek úpravy je dobře patrný z řezu na Obr. 107. Původní stěna o tloušťce 14 mm byla ztenčena na 2,5 mm, což je minimální bezpečná šířka stěny s ohledem na její výšku. Zároveň byl ubrán i materiál pro krytí hlav šroubů z vrchní části, zde byla ušetřena výška 12 mm po celém obvodě. Spodní strana sloužící ke krytí hlav šroubů byla zakončena rádiem o poloměru 7 mm tak, aby byla splněna podmínka pro stavbu bez nutnosti použití podpor. Tím opět došlo k úspoře materiálu pro tisk. Stěna krytu chránící samotná ozubená kola byla ztenčena z 5,55 mm na 3 mm. Tato hodnota

byla považována za limitní spolehlivou s přihlédnutím k výšce stěny a především k rozměrům součásti.



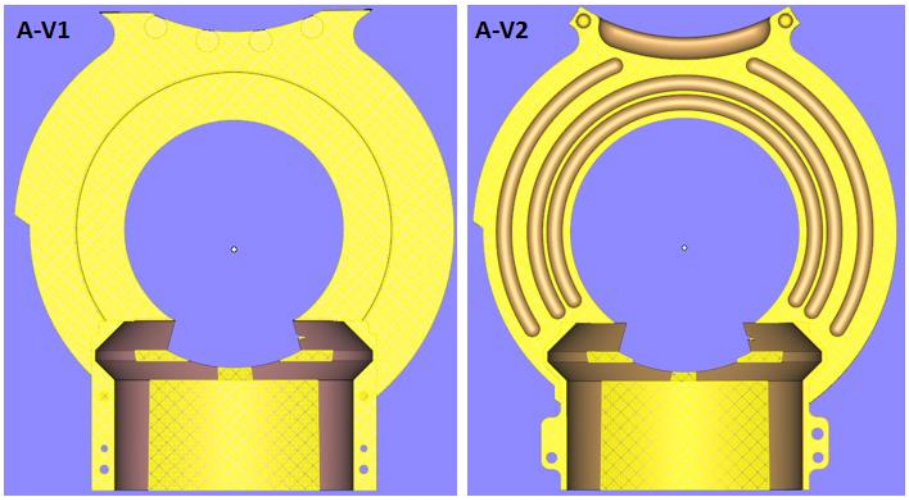
Obr.107 *Pohled na spodní část většího dílu sestavy – původní (vlevo), upravený (vpravo)*



Obr.108 *Původní (vlevo) a upravený (vpravo) díl v řezu*

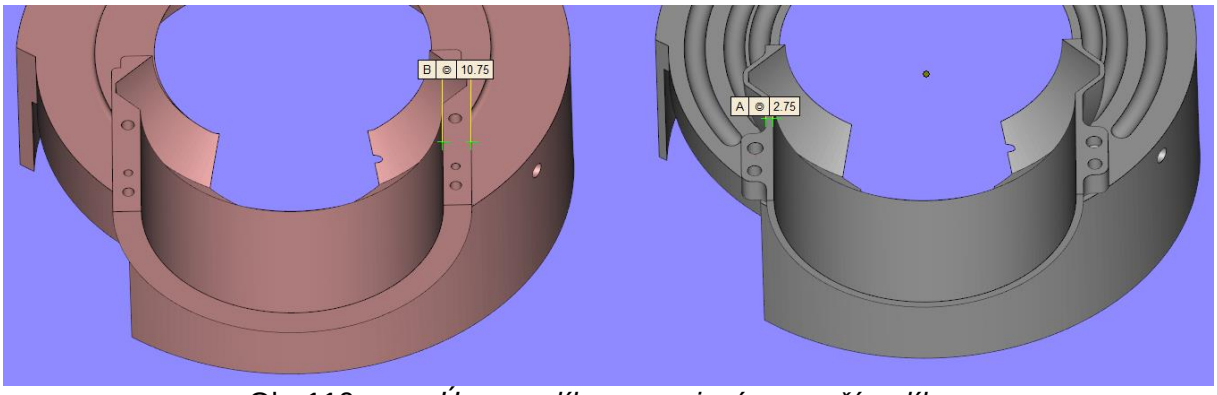
Další úprava spočívala ve vytvoření drážek s půlkruhovým profilem ze spodní i horní strany součásti. Došlo tak nejen k úspoře materiálu součásti samotného dílu, ale i k úspoře materiálu použitého pro stavbu podpor, neboť tyto vyduté drážky nebylo, z důvodu použitého

poloměru 8 mm, nutné vypodporovat. To je patrné z Obr. 109, na němž jsou žlutou barvou označeny podpory. Vzhledem k tomu, že tyto podpory byly stavěny až do výšky 66 mm, jednalo se o úsporu jen v objemu podpor upravených vůči původní variantě o 33 %. Pro zjednodušení značení bude dále tento díl označován jako díl A, původní stav bude značen jako V1, upravený stav jako V2. Druhá část většího dílu bude dále označována jako díl B.



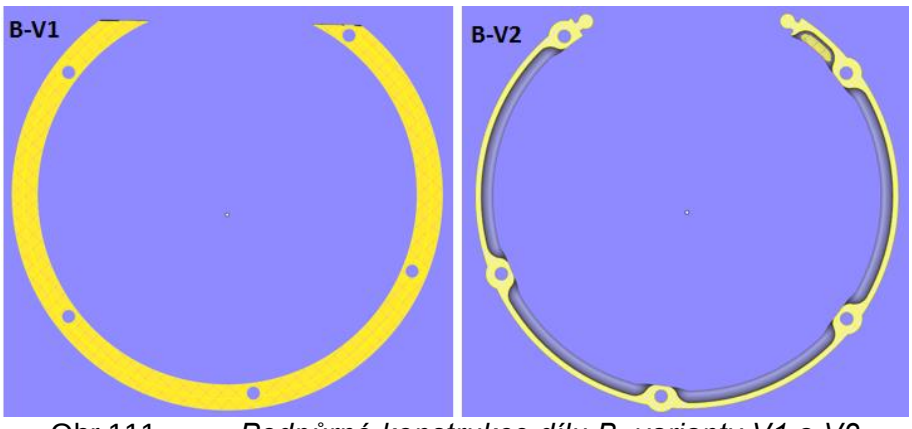
Obr.109 *Podpůrné konstrukce dílu A varianty V1 a V2*

Ve spojovací části mezi dílem A a menším z dílů sestavy došlo rovněž k úspoře materiálu. Jak ukazuje Obr. 110, bylo zde provedeno ztenčení stěny o 8 mm.



Obr.110 *Úprava dílu ve spojení s menším dílem*

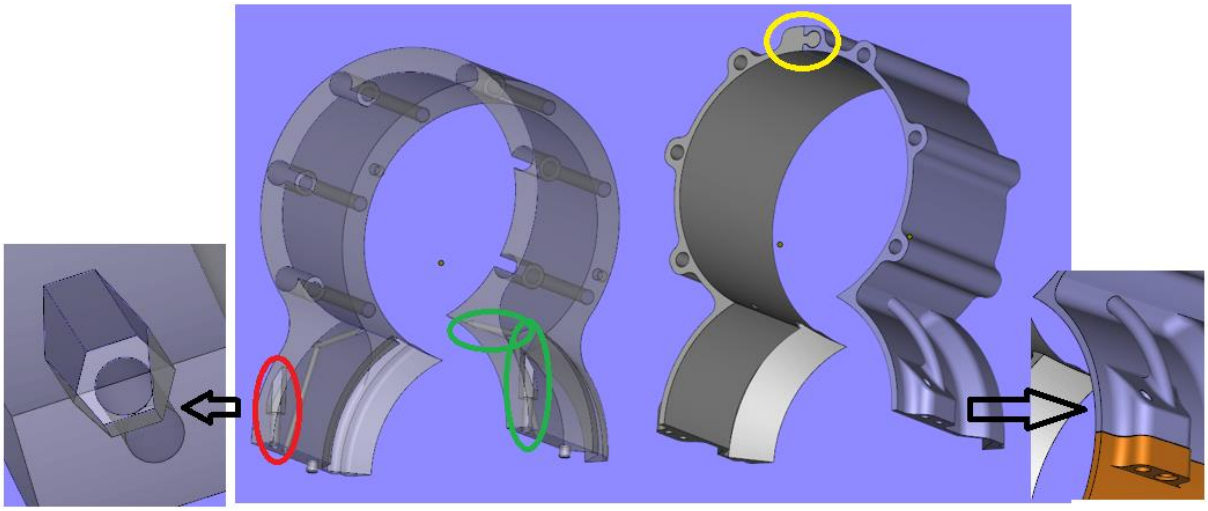
Následující obrázek ukazuje vypodporování dílu B v původní a upravené variantě. Zde došlo výše popsanými konstrukčními úpravami k úspoře materiálu podpor o 90 % a celkově pro díl + podpory o 65 %.



Obr.111 *Podpůrné konstrukce dílu B, varianty V1 a V2*

Úpravou dílů A a B došlo ke snížení hmotnosti většího dílu sestavy ze 7,143 kg na 3,508 kg, tím je ovšem brán v potaz pouze samotný díl. Sečteme-li váhu dílu a podpor automaticky vygenerovaných SW Magics, nelze ji brát jako finální, neboť je potřeba myslet na to, že tyto podpory by bylo pro reálný tisk nezbytné dále optimalizovat a celková hodnota by byla zcela jistě větší. Tato hodnota je proto uvedena pouze pro relativní porovnání (přesná hodnota podpor inovovaného dílu bude uvedena dále). Celkový teoretický objem původního rozměrnějšího dílu 1 672 cm^3 a teoretický objem upraveného dílu 903,4 cm^3. To se samozřejmě ovlivní jak čas tisku, tak i čas potřebný pro postprocesing součásti.

Menší ze zadaných dílů, dále označovaný jako díl C, rovněž prošel úpravou, která směřovala k redukci objemu dílu s ohledem na výhody a omezení technologie 3D tisku, viz Obr. 112. Jednalo se především o ztenčení stěny krytu z původních 10,75 mm na 2,75 mm, o úpravu spojení obou dílů sestavy, úpravu mazacího kanálku a rozdělení dílu na dvě poloviny (dále označované C1 a C2), z toho důvodu, aby bylo možné díly tisknout na jedné platformě s dílem B, podrobněji bude popsáno dále.

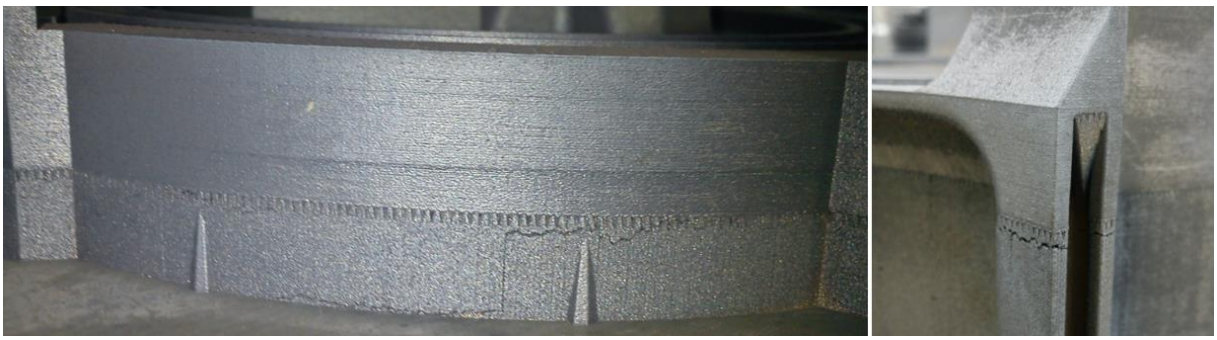


Obr.112 *Úprava dílu C*

Původní spojení sestavy bylo zajištěno pomocí čepu a šroubu s maticí, která byla zalepena do předvytištěného šestihranného otvoru (označeno v Obr. 112 červeně). V inovovaném řešení byl navržen a vytištěn závit v dílech C1 a C2. Mazání převodové soustavy (označeno v Obr. 112 zeleně), původně vedené stěnou dílu, bylo zalomené, přestože výroba metodou SLS dovoluje zcela jiné řešení. Konstruktéři bohužel zatím nemají dostatek zkušeností s touto technologii a často je pro ně problém změnit myšlení v duchu možností 3D tisku. V upravené variantě V2 kopíruje kanálek plynule vnější stěnu součásti se zohledněním principů technologie DMLS. Úpravami byl objem původního dílu zredukován o 51 %.

Pro reálný tisk bude dále pracováno pouze variantou V2. Jak již bylo zmíněno, došlo k významné úspoře objemu tištěného dílu, a to celkově pro všechny díly o 60 %. Rozdělením dílů se zároveň zredukoval počet tisků ze tří na dva. To představuje významnou úsporu nejen času, ale i nákladů. Důvodem snížení počtu tisků byla skutečnost, že tisk dílu B-V2 by samostatně trval 14,6 hodin a tisk dílu C 17 hodin, to dohromady činí 31,6 hodin. K této době je nutné připočíst čas přípravy stroje a čas vyndávání tisku a čištění stroje cca 2 hod. Další časovou i finanční položku tvoří tepelné zpracování součásti z důvodu eliminace pnutí, které je u takto velkých dílů nezbytností. Již při prodlevě cca 2 hodiny mezi ukončením procesu spékání a vložením do pece nastává vlivem velkého pnutí v součásti k deformacím, to má za následek vznik trhlin v oblasti podpůrných struktur, viz Obr. 113. Samozřejmě je možné zesílit podpůrné struktury, popř. je plnoobjemově nahradit, ale pnutí je tak velké, že dochází

k deformaci dílu včetně platformy upevněné čtyřmi šrouby do stroje. Bohužel zatím se nepodařilo najít spolehlivou metodu, která by tuto hodnotu pnutí vyjádřila číselně a ani v celosvětové databázi vědecko-výzkumných prací není tato problematika řešena.



Obr.113 *Ukázka vzniku trhlin při nevčasném tepelném zpracování*

Varianta úpravy sestavy V2, jak už bylo uvedeno, řešila podpůrné struktury jen velmi teoreticky s minimálními úpravami návrhu podpor dle SW Magics. Pro reálný tisk je nutné tyto podpory dále optimalizovat. Pokud by však byl požadavek reálného tisku V1 i u V2, zcela jistě by tím byl navýšen objem materiálu potřebného pro jejich tisk, zároveň by tím byla ovlivněna i doba tisku. Jak významně, bude ukázáno dále. Celkové hodnocení původní a upravené varianty ukazuje Tab. 20.

4.2.1 Sumarizace výsledků

Původní varianta V1 byla řešena konvenčně, příkladem jsou tvary mazacích kanálků, částečně s přihlédnutím k možnostem tisku metodou SLS, např. úpravy prostorů pro hlavy šroubů. Varianta V2 řešila součásti z hlediska možností 3D tisku, např. odlehčovací drážky, závity, mazací kanálky a další. Došlo tak k významné redukci objemu dílů, a tím i k významné časové úspoře, z čehož plyne i úspora finanční. Souhrnně lze říci, že úprava vedla k úspoře objemu V1 oproti V2 o 50,5 % objemu a celkového času tisku z 173,9 hodin na 83,8 hodin. Zároveň místo původních 3 tisků je možné V2 vytisknout pouze na dvou platformách, což je významné z hlediska redukce času pro přípravu, vyndání tisku a tepelného zpracování. S redukcí počtu tisků je spojeno i množství prášku potřebného pro kontinuální proces tisku (pro bezpečné dokončení tisku je potřeba mít v zásobníku 3x větší výšku upěchovaného prášku, než je celková výška tisku) a množství prášku označeného jako odpadní, neboť při každé jednotlivé výrobě dojde k tzv. nedobrovolnému vzniku prášku, který již nelze recyklovat. Tím je prášek zakrývající hlavy šroubů pro upevnění platformy, zbylý prášek v přepadním kolektoru (prášek, který již nelze vybrat), prášek, který je i přes důkladné čištění platformy a dílu vyndán ze stroje a nelze jej již vracet zpět do stroje, prášek uvnitř součásti a mezi podporami atp. Tyto ztráty jsou obtížně vyčíslitelné, ale za zkušenosti lze říci, že odpadní prášek tvoří cca 25 % z váhy vytištěné součásti. To se značně liší od hodnoty 2–4 % udávané výrobcem zařízení. To by mohlo představovat množství prášku, který zůstane při přesívání prášku na sítě.

Tab.20 Sumarizace výsledků V1 vs. V2

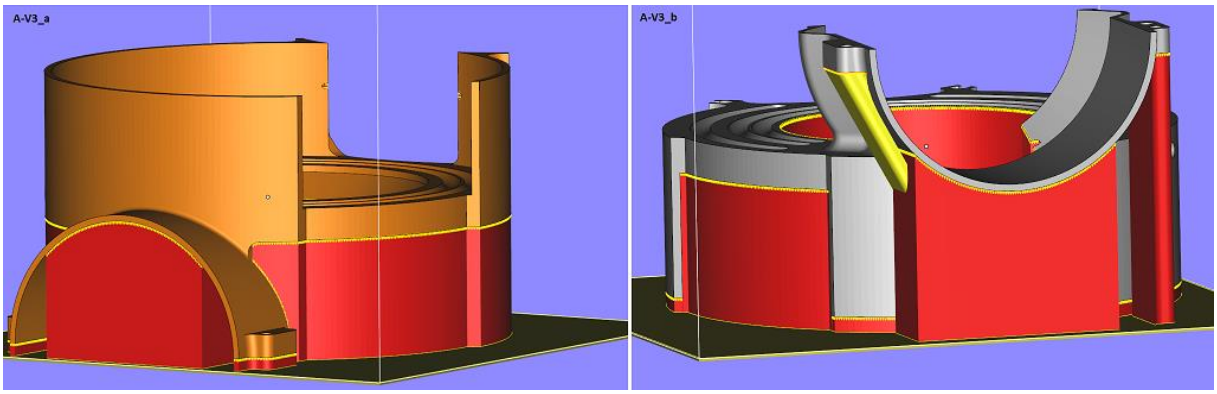
	V1	V2	Úspora V2 vůči V1 [%]
Objem dílu A - Magics [cm3]	642,00	323,49	49,6
Objem podpor A - Magics [cm3]	682,8	457,4	33,0
Objem celkem A - Magics [cm3]	1325,0	780,9	41,1

Objem dílu B - Magics [cm3]	246,8	112,5	54,4
Objem podpor B - Magics [cm3]	101,1	10,0	90,1
Objem celkem B - Magics [cm3]	348,0	122,6	64,8
Objem dílu C - Magics [cm3]	325,0	151,0	53,5
Objem podpor C - Magics [cm3]	36,2	54,4	-50,3
Objem celkem C - Magics [cm3]	361,2	205,5	43,1
Objem dílů A + B +C - Magics [cm3]	1213,8	484,5	60,1
Objem podpor A + B +C - Magics [cm3]	821,3	521,9	36,4
Objem celkem A + B +C - Magics [cm3]	2035,1	1006,5	50,5
Čas tisku platforma 1 - 50um [hod]	123,3	55,3	55,2
Čas tisku platforma 2 - 50µm [hod]	23,6	32,2	-36,2
Čas tisku platforma 3 - 50µm [hod]	27,0	0,0	100,0
Čas tisku platformy 2 + 3 - 50µm [hod]	50,6	32,2	36,5
Čas tisku celkově - 50µm [hod]	173.9	83.8	49,7

4.3 Úprava V2 pro reálný tisk

Upravená varianta V2 byla navržena s ohledem na princip technologie, myšleno úprava dílu, ale z důvodu relativního porovnání s původní variantou, bylo navržení podpor u obou zmíněných variant provedeno pouze minimálním zásahem do SW Magics. Pro reálný tisk je třeba navržené podpůrné konstrukce dále upravit s ohledem na velikost dílu a z toho vyplývajícího pnutí a s ohledem na 100% spolehlivost výroby součástí, neboť jak je uvedeno v tabulce výše, pouze proces tisku by trval 84 hodin (cca 3,5 dne) oproti původním 173,9 hodin (cca 7,3 dne). Dále je třeba započítat čas spojený s přípravou dat, obsluhou stroje, tepelným zpracováním, chladnutím součástí, odříznutí z platformy a postprocesingem součástí tak, aby byla sestava připravena pro předání zákazníkovi. Z toho je patrné, že 10 dní pro realizaci zadaného úkolu je velmi hraničních a je nutné všechny procesy provádět s jistotou výsledku. S tím bylo k zadanému úkolu přistupováno. Výsledkem těchto úprav je varianta pro reálný tisk, označovaná dále jako varianta V3.

Časově nejnáročnější a zároveň objemově největší je součást A. V první fázi byla řešena orientace součásti. Zvažované možnosti ukazuje následující obrázek. Dále budou tyto dvě možnosti označovány jako V3_a a V3_b, viz Obr. 114.



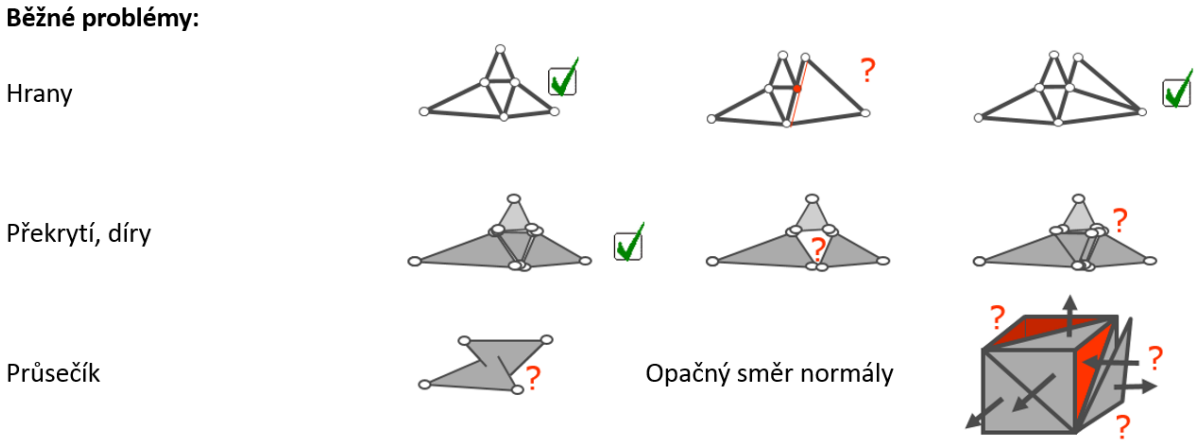
Obr.114 *Možnosti polohování součásti A pro reálný tisk – vlevo V3_a; vpravo V3_b*

Rozdíl mezi těmito variantami spočívá v jejich otočení o 180°. Obě součásti byly umístěny do výšky 5,5 mm nad platformu pro bezpečné odříznutí dílu na rámové pile.

Z obrázků je patrné, že pro orientaci V3_a jsou podpory nižší a tužší, zatímco druhý způsob obsahuje vyšší podpory, z nichž některé nejsou dostatečně tuhé, viz Obr. 114 A-V3_b. SW SG+, který je nadstavbou SW Magics (není standardně dodávaný), dovoluje změnit úhel stavby podpor a současně je napojit do jiných podpor, popř. k samotné součásti, tzn, nemusí „růst“ přímo z platformy, ale může „růst“ rovnou z výrobku, to v mnoha případech velmi zjednodušuje volbu orientace dílu a navrhování podpěrných struktur. Tato úprava je ukázána na Obr. 114 A-V3_b (označeno žlutě).

A-V3_a je tedy z hlediska spolehlivosti tisku vhodnější a zároveň je objem podpor pro tuto variantu o cca 9 % nižší. Na základě těchto důvodů byla vybrána tato varianta, která se dále upravovala.

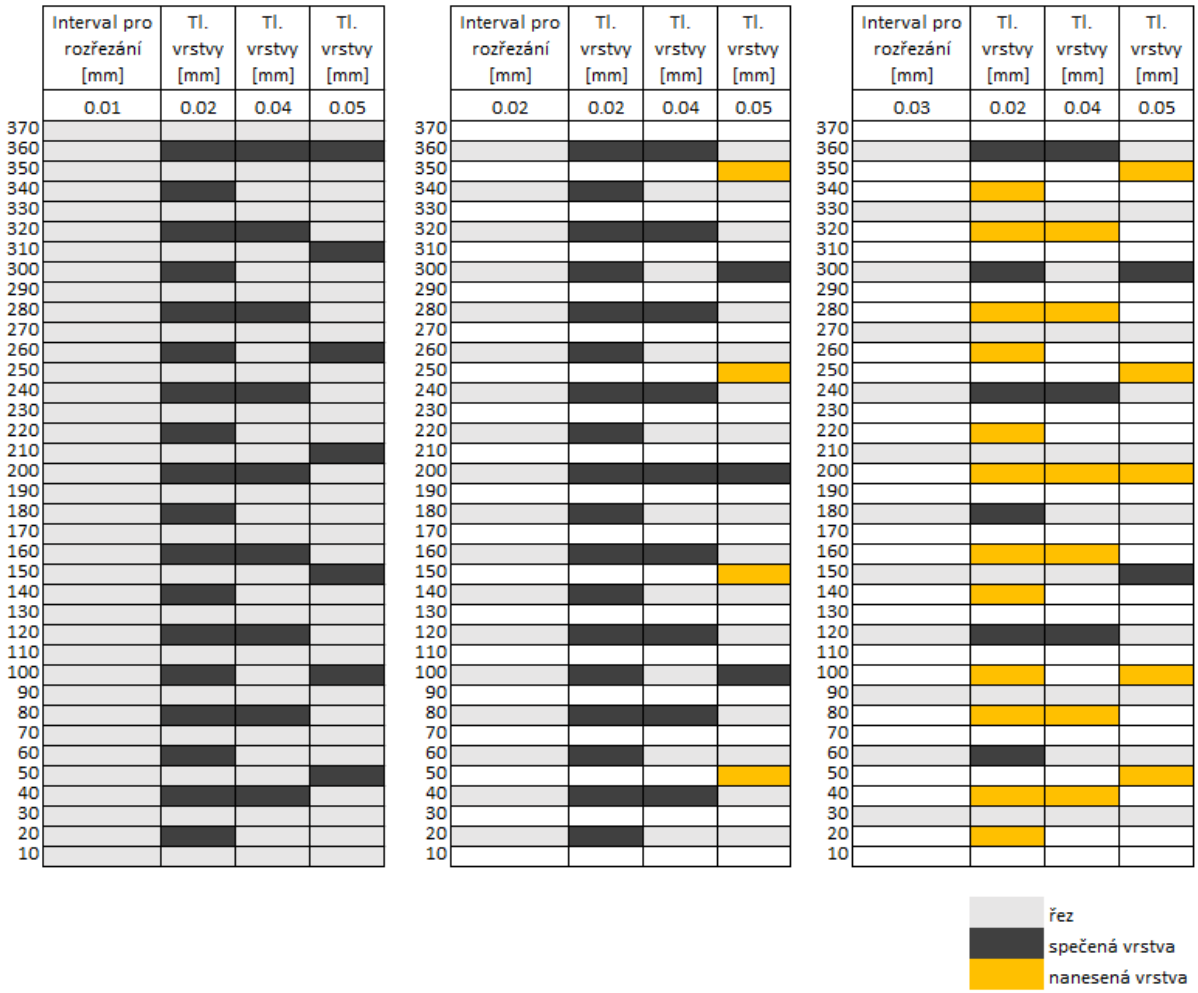
Nejprve byl vybraný díl ve formátu .stl otevřen v SW Magics, umístěn 5,5 mm nad stavěcí platformu a poté byl pomocí funkce Fix Wizard „zafixován“. Úkolem této funkce je prověřit jednotlivé trojúhelníky souboru .stl. Není výjimkou, že soubory vygenerované z CAD je nutné upravovat, a to zejména u tvarově složitých ploch. Nejčastější problémy zachycuje Obr. 115.



Obr.115 *Nejčastější problémy ploch modelu .stl*

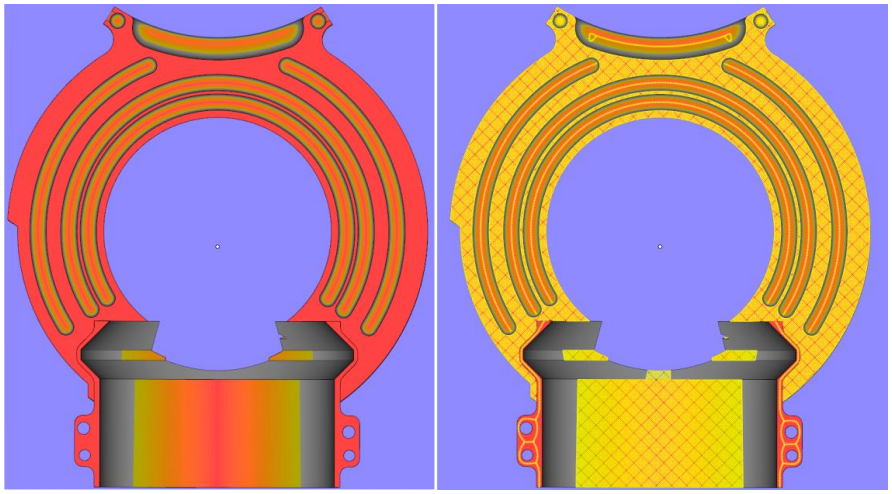
Jedná se především o „neukončené trojúhelníky“, překrývání, díry a křížení. Tyto problémy jsou díky funkci Fix Wizard rozpoznány a většinou je SW dokáže sám opravit. Nastávají však i případy, kdy je nutný zásah operátora, to je často časově náročná operace, která prodlužuje proces přípravy dat pro tisk, protože je nutné každý z chybně označených trojúhelníků vyhodnotit a ručně opravit.

Po úspěšné fixaci musí být díl uložen ve formátu .stl, to je nezbytné pro budoucí synchronizaci podpor a součásti v SW EOS Print. Tento soubor dále projde SW RP Tools, který má za úkol součást rozřezat po zvoleném intervalu ve směru výstavby dílu (Z). Bylo nastaveno rozsliceování po výšce 0,01mm. Tato hodnota se nerovná tloušťce spékané vrstvy. Z následujícího obrázku je patrné, jak volba intervalu rozřezání dílu ovlivňuje spékání vrstev po zvolených tloušťkách. Je-li hodnota rozřezání .stl modelu nastavena na 0,01, dojde ke spečení každé nanesené vrstvy v případě tl. vtstvy 0,02 mm, 0,04 mm i 0,05 mm. Pokud je hodnota rozřezání nastavena na 0,02 mm, pak je spečená každá vrstva pouze pro nastavenou tl. tisku 0,02 mm a 0,04 mm díky tomu, že se „potká“ řez modelu s tloušťkou vrstvy. U tl. 0,05 mm dojde ke spečení každé druhé nanesené vrstvy – tzn. tam, kde se „potká“ řez modelu s tloušťkou vrstvy. Při nastavení hodnoty na 0,03 mm je exponovaná u všech zvolených tlouštěk vrstvy pouze každá třetí vrstva.



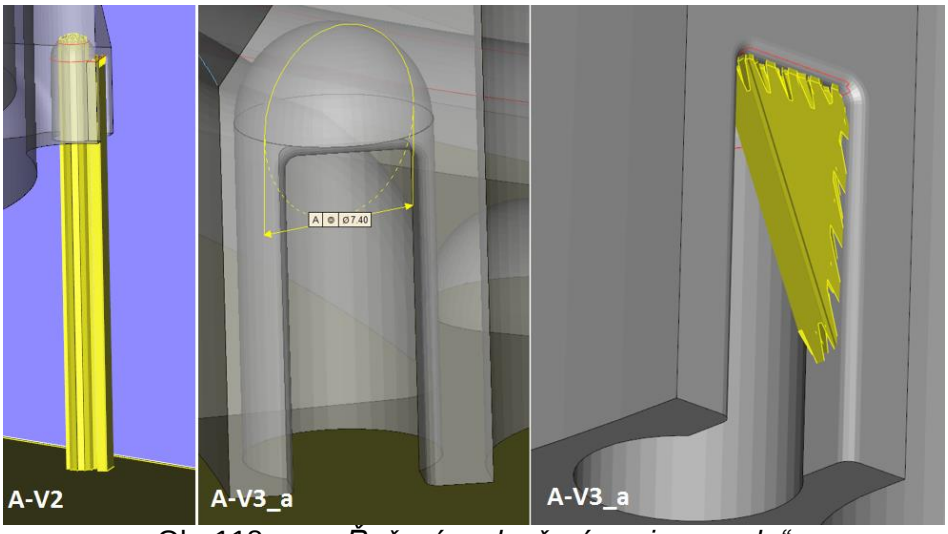
Obr.116 *Ukázka vlivu změny intervalu rozřezání .stl modelu na spékání vrstev*

Po fixaci a uložení dílu v požadované poloze byly funkcí Support Generation vygenerovány podpory SW Magics. Na Obr. 117 vpravo lze vidět výsledek této operace. V levé části obrázku jsou označeny plochy, které s platformou svírají úhel menší než 45° a SW je vyhodnocuje jako plochy, jež je nutné podpírat, a dle odstínu barev navrhuje pro zvýrazněné oblasti typ podpor. To je dobře patrné z obrázku vpravo.



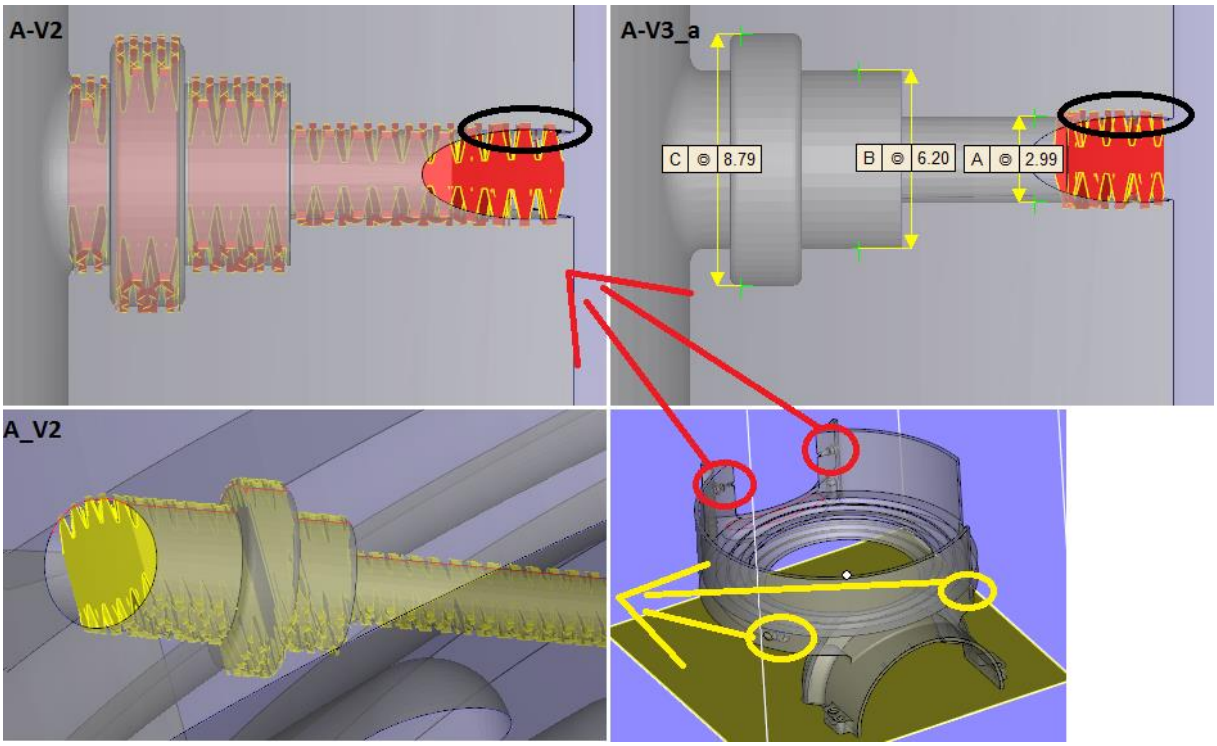
Obr.117 *Vlevo – SW návrh ploch pro podepření dílu; vpravo – SW vygenerované podpory*

Kapsovitá část spoje „puzzle“ byla zkonstruována úmyslně jako vydutá o průměru 7,4 mm z toho důvodu, aby nemuselo dojít k podepření. Podepřena zůstala pouze hrana, do níž se po smontování opírá druhá část zámku s využitím SW SG+ a podepřením do stěny součásti. V původním řešení byla podpora vystavěna od stavěcí platformy. Toto softwarově navržené řešení by nezabezpečovalo dostatečnou tuhost podpory a při dané výšce 66,5 mm by došlo k jejímu vyvrácení dříve, než by dospěla k určenému místu.



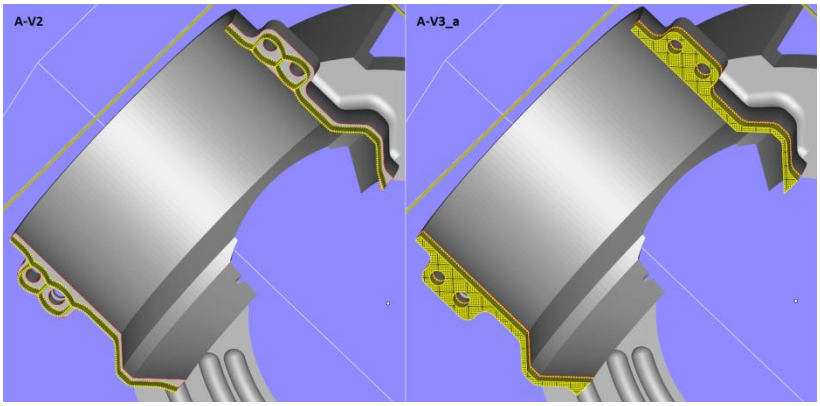
Obr.118 *Řešení podepření spoje „puzzle“*

Dále byly podpory odstraněny ze všech vydutých drážek na spodku součásti, neboť jak již bylo zmíněno, jejich poloměr umožňuje samonosnou výstavbu. Další úprava proběhla u mazacích kanálků, u nichž došlo k odstranění všech navržených podpor s výjimkou konců kanálků umístěných mezi díly A a B. Zde byl částečný support nutný z toho důvodu, že horní část (v Obr. 119 označeno černě) začínala růst tzv. z prášku, a to u technologie DMLS není možné. Hlavním cílem této operace nebylo snížit objem materiálu, ale především využitím předností této technologie zjednodušit postprocesing po vytištění. Do otvoru o průměru 6,2 mm je při montáži do sestavy frézky přivedena trubička s mazivem, která je pomocí gumového O kroužku, uloženého v drážce o průměru 8,8 mm, pojištěna proti vysunutí. Tento průměr je o 0,8 mm větší, než dovolují pravidla pro bezpečný tisk. Z důvodu ověření tisku daného průměru v experimentální části a z důvodu funkce této drážky, bylo provedeno toto konstrukční řešení jako samostavitelné. Díra o průměru 3 mm sloužila jako přívodní pro mazací médium do určeného místa.



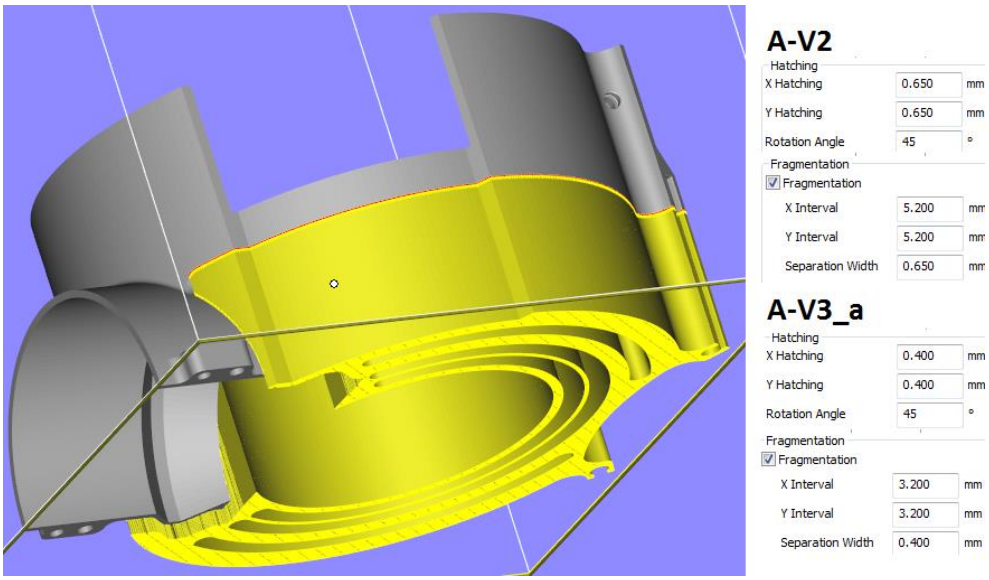
Obr.119 *Ukázka původního řešení otvorů pro mazací kanálky a jejich optimalizace (vpravo nahoře)*

Další úpravu vůči SW Magics ukazuje Obr. 120. Zde není vyhovující návrh podpor typu Line, a to z důvodu nedostatečného upevnění dílu a odvodu tepla do platformy. Takto vystavěné podpory by neobstály již při spečení několika prvních vrstev. Z důvodu zmiňovaných velkých pnutí, vznikajících během ohřívání a chladnutí, je nezbytné díl důkladně ukotvit do platformy. Na základě zajištění pevného spojení s platformou bylo zvoleno limitní nastavení podpor typu Block (Hatching 0,4 mm, což je minimální hodnota doporučená výrobcem pro materiál MS1) a následně bylo provedeno ještě další kotvení plnoobjemovými podporami typu Cone, které zabezpečily odvod tepla z dílu a minimalizovaly deformace vznikající během tisku.



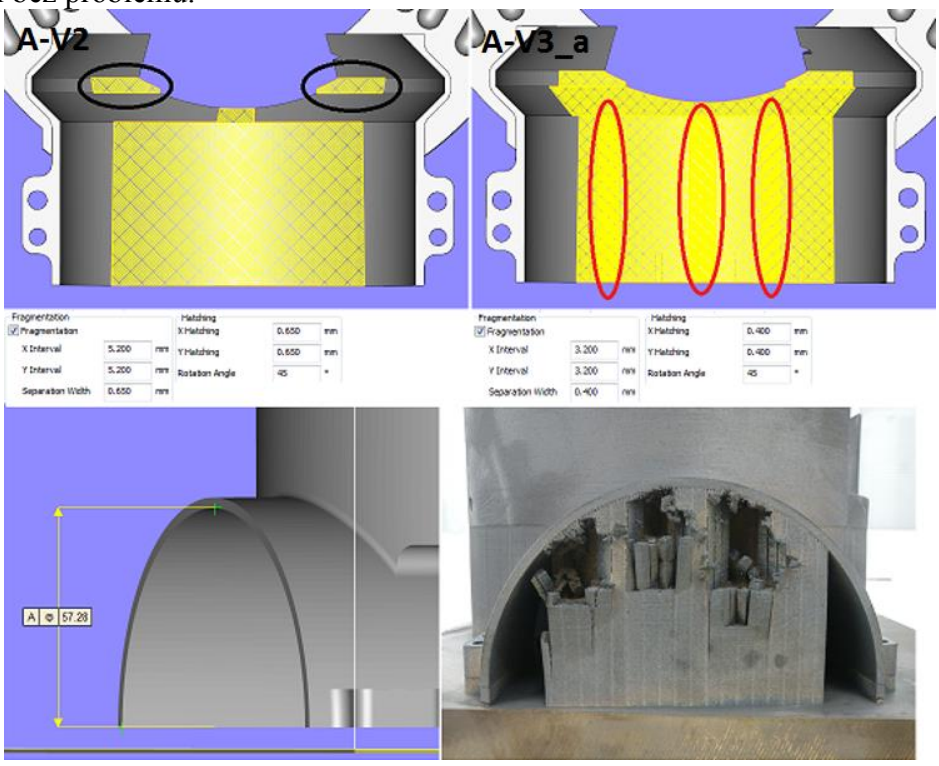
Obr.120 *Ukázka navržení podpor SW Magics (vlevo) a jejich úprava dle zkušeností operátora (vpravo)*

Podpěrné struktury na Obr. 121 a 122 jsou stěžejní pro výrobu celého dílu, neboť musí zabezpečit stabilitu tvaru, rozměrů a zároveň odvod tepla. Z toho důvodu byly zvoleny podpory typu Block s parametry Hatching 0,4 mm a pro ukotvení dílu do platformy podpory typu Cone a Volume.



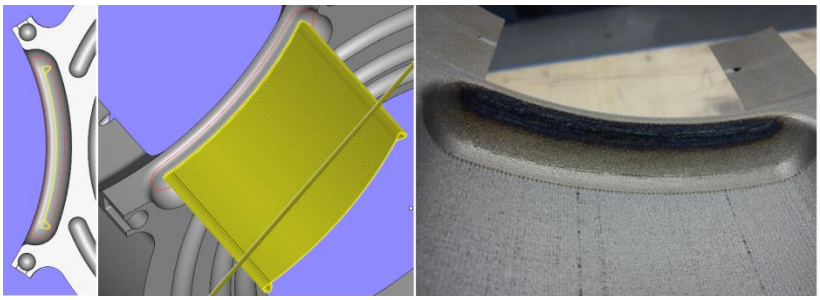
Obr.121 *Ukázka stěžejních podpor dílu A typu Block a jejich parametrů pro V2 a V3_a*

Předposlední úprava proběhla na podpěrných strukturách v půlkruhové části dílu. Černě označené podpory, viz Obr. 122, u varianty V2 jsou samostatně stojící o výšce přes 70 mm. Toto řešení je však z hlediska stability tisku velmi nespolehlivé. Bylo tedy nutné propojit tuto část s objemově stabilnější částí a zároveň tuto část „posílit“ (na Obr. 122 označeno červeně), neboť byla na stavěcí platformě zorientována čelem k nanášecímu pravítku, natočená o 10° (dle doporučení výrobce by měla být hrana natočena min o 5°). Následující obrázek ukazuje, že ani tento rozměrný blok podpor nemusí odolat a může dojít k jeho destrukci. Ze snímku je patrné, že podpory, které byly posíleny (dublovány), podržely konstrukci oblouku a tisk doběhl úspěšně. Tato situace je však velmi nahodilá a závisí na mnoha aspektech. Při prvním tisku součásti proběhlo vytištění této části se stejnými podporami bez problémů.



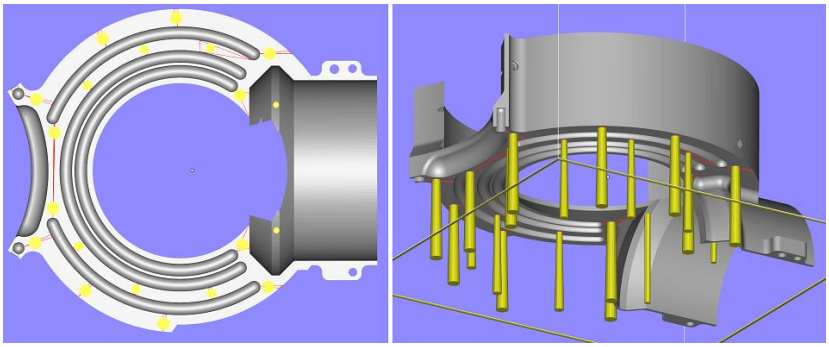
Obr.122 *Ukázka úpravy navržených podpěrných struktur a jejich destrukce*

Poslední upravovanou částí dílu A bylo vybrání pro hlavy šroubů. SW návrh ukazuje Obr.123. Z rádiusu o poloměru 10 mm došlo v tomto případě, s ohledem na orientaci dílu na platformě a s ohledem na výsledky experimentálního tisku otvorů, k odstranění podpor typu Line. Díl byl na stavěcí desku umístěn, jak již bylo zčásti předesláno, vypodporovaným kruhovým obloukem (zobrazeným v předchozím obrázku) čelem k nanášecímu pravítku s pootočením 10° kvůli plynulému náběhu pravítka na díl. Z toho plyne, že část pro krytí hlavy šroubů byla zorientována tak, aby v průběhu spékání nedocházelo k zastavování pravítka vlivem případného zvedání dílu v této oblasti, a tím i celého procesu, ale aby nanášecí pravítko vyjíždělo po oblouku. Kvalita spodní strany oblouku nebyla dle očekávání ideální. To ale nebylo podstatné vzhledem k tomu, že nešlo o funkční plochu.



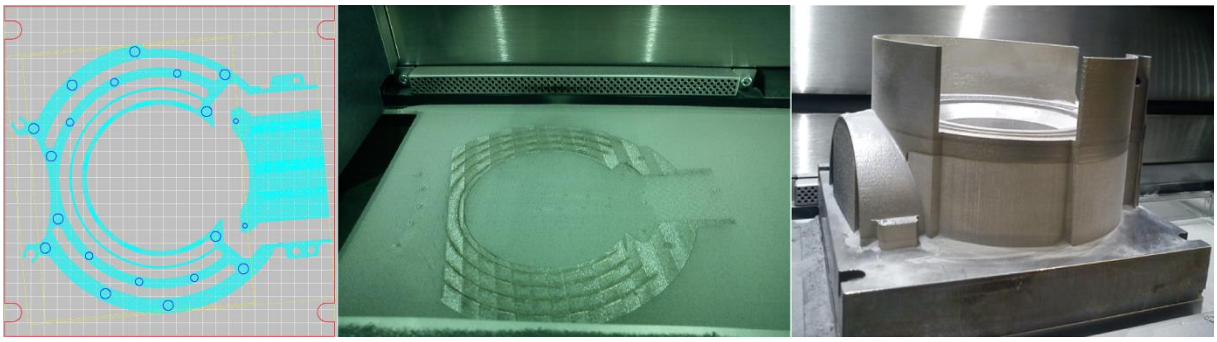
Obr.123 *SW navržené podpory vybrání pro hlavy šroubů a reálný stav po tisku bez podpor*

Jak již bylo několikrát opakováno, kvůli velikosti dílu bylo nezbytné pro zajištění spolehlivého procesu spékání zabezpečit jednak minimalizaci deformací před samotným tepelným zpracováním, jednak odvod tepla do platformy. Pro splnění tohoto úkolu bylo použito podpor typu Cone, viz Obr. 124. Tyto podpěrné struktury jsou konstruované plnoobjemově, proto lépe zabezpečují zmiňované požadavky.



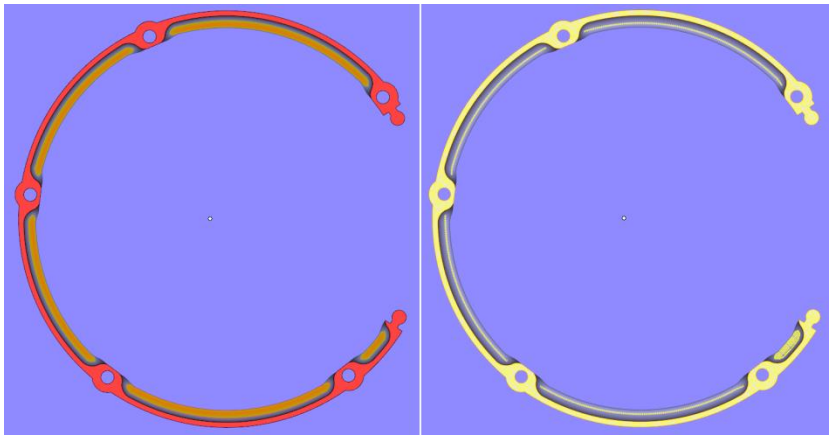
Obr.124 *Náhled podpor typu Cone pro A-V3_a*

Použití podpor typu Cone s sebou přináší nejen výše zmíněné výhody, ale také nevýhody v podobě vyššího opotřebování pravítka, neboť jsou vystavovány velkému zatěžování teplem. Objemové změny způsobené roztažností materiálu vedou k vynoření těchto podpor nad rovinu naneseného prášku. Pravítko, které nanáší novou vrstvu, o tyto podpory drhne a dochází k jeho opotřebovávání. Problém s roztažností se neobjevuje jen u podpor typu Cone, ale obecně při tisku jednotlivých částí dílu, u kterých nedochází k dostatečnému odvodu tepla do platformy.



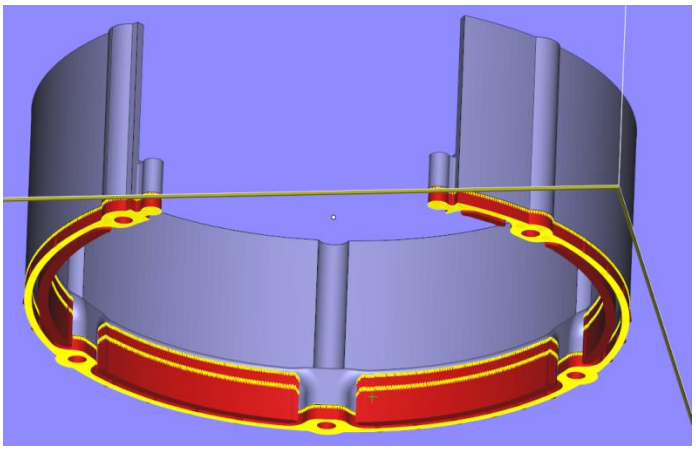
Obr.125 *Díl A ustavený na platformu v SW EOS Print (vlevo); pří procesu spékání (uprostřed); po vytištění (vpravo)*

Na základě sledování procesu tisku součásti A byla připravena varianta V3 pro díl B. Na Obr. 126 je vidět oblast, kterou doporučuje SW podpírat (vlevo), a automaticky vygenerované podpory (vpravo). V podstatě se jedná o support ložné plochy a plochy kryjící hlavy šroubů.



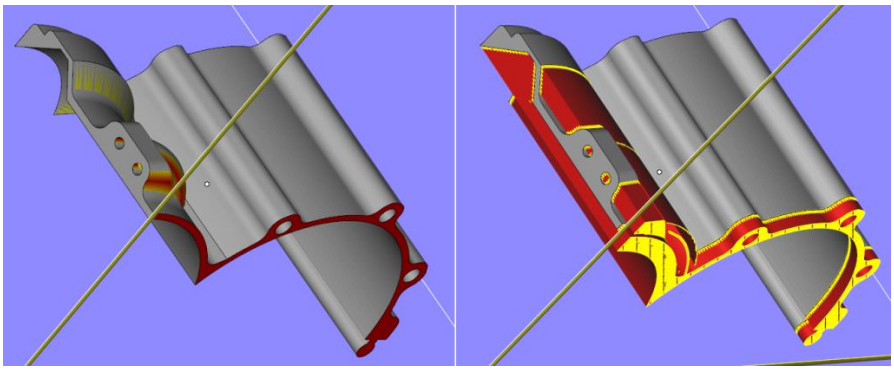
Obr.126 *Vlevo – SW návrh ploch pro podepření dílu; vpravo – SW vygenerované podpory*

Spodní plocha, označená na obrázku vlevo červenou barvou, byla finálně pro V3 vypodporována typem Block s fragmentací a doplněna podporami typu Cone a Volume. Plocha s rádiem byla na základě předchozí zkušenosti vypodporována, a to do výšky 11,5 mm typem Volume a od této výšky až po samotnou součást podporami typu Block namísto SW navržené podpory typu Line. Tato úprava byla navržena z důvodu tenké oblasti (4 mm), kterou bylo nutné podepřít, navíc podpory netvořily monolitní celek, ale byly rozděleny na menší, poměrně vysoké segmenty (17,5 mm), u nichž bylo nutné zajistit tuhost. U dílu A nebyla plocha pro krytí hlav šroubů podpírána vůbec. Tam bylo možné toto řešení provést díky tomu, že se díl mohl zvedat jen po směru pohybu pravítka a zásadně neovlivňoval spolehlivost tisku, kdežto v tomto případě byly při jakékoli orientaci některé segmenty v nevýhodné poloze. Následující obrázek ukazuje navržené řešení pro variantu V3.



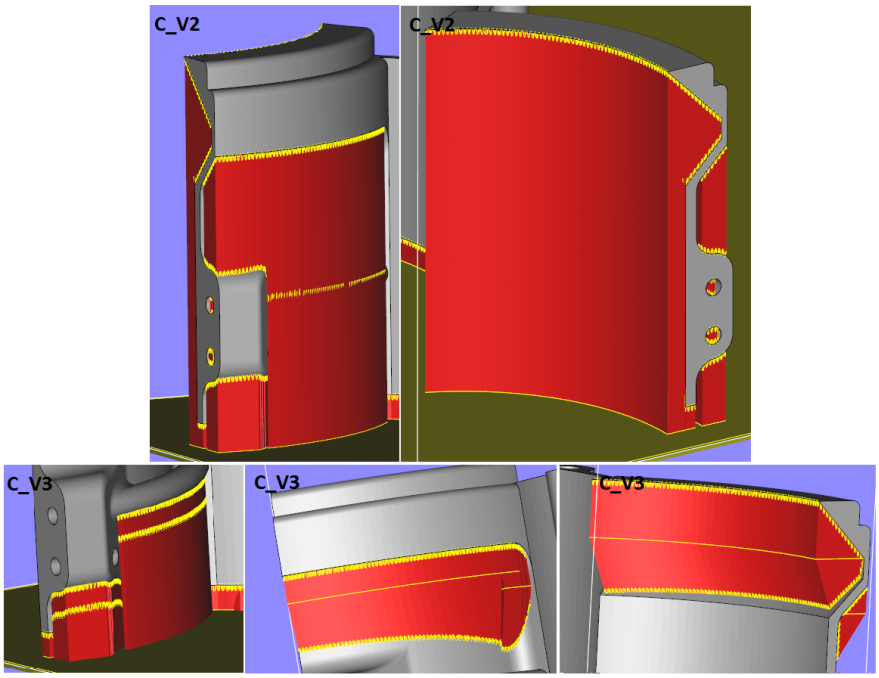
Obr.127 *Návrh ploch pro podepření dílu B*

Díly C1 a C2 se vzájemně odlišují pouze v tom, jakou částí zámku jsou opatřeny, proto bude úprava podpor vůči variantě 2 popsána pouze pro díl C1. V levé části Obr. 128 se nacházejí označené plochy, které je doporučeno podepřít. V pravé části obrázku jsou vidět podpory vygenerované SW Magics, jejichž návrh je objemově rozsáhlý (30,2 cm^3) a pro tisk časově neefektivní. Kanálek pro přívod mazacího média je podepřen pouze podporou typu Line, to je ale je nereálné, protože by podpora neodolala přejezdům pravítka a ulomila by se.



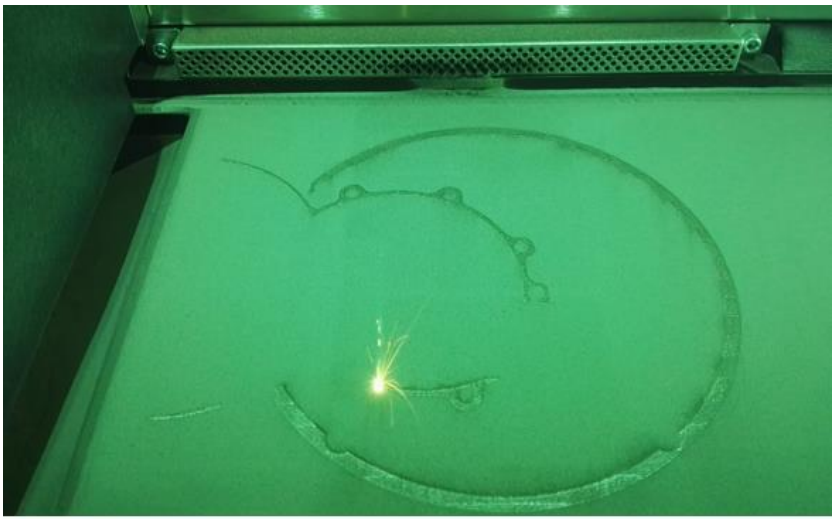
Obr.128 *Vlevo – SW návrh ploch pro podepření dílu; vpravo – SW vygenerované podpory*

Úprava SW řešení spočívala v tom, že plochy nacházející se ve vyšších Z souřadnicích byly podepřeny do dílu, tím došlo k výraznému snížení jejich délky, viz Obr.129. Dále došlo k úplné eliminaci podpor v kanálcích, které jsou samostavitelné, a zároveň by jejich odstranění nebylo dostupnými metodami reálné. Vnější podpory kanálku a příruby pro napojení k dílu A byly ve spodní části řešeny typem Volume a posledních několik mm mezi Volume a plochou dílu typem Block, aby bylo možné jejich manuální odstranění. Celkový objem podpor vyčíslený SW Magics pro tuto variantu je 67 cm^3, to je cca o 12,6 cm^3 více než u varianty V2. Při srovnávání je ale třeba brát v úvahu i to, že SW vypočítává jen objem spečených dílů a podpor, který bude v rámci podpor Volume výrazně vyšší než u podpor typu Block. Je však třeba počítat s tím, že prášek vyplněný ve „čtverečcích“ jednotlivých bloků nelze recyklovat, protože po vyndání platformy s díly je stále uvnitř bloků a k jeho vysypání dojde až po tepelném zpracování a odříznutí součástí z platformy. Díky tomu bude reálný objem spotřebovaného prášku celkově vyšší než u V3 a zároveň může být tisk i časově náročnější díky nutným přejezdům laseru. Poslední úpravou bylo přidání podpor typu Cone mezi spodní plochu dílu a platformu.



Obr.129 *Ukázka úpravy dílů V3 oproti SW navržené V2*

Jak již bylo zmíněno, stejně proběhla i úprava podepření dílu C2. Poté bylo možné připravit pro tisk druhou platformu. Rozložení a orientace součástí jsou zřejmé z Obr. 130.



Obr.130 *Tisk součástí B, C1 a C2 pro variantu úpravy V3*

4.3.1 Sumarizace varianty V3

Následující tabulka sumarizuje vývoj variant tisku od původního (zadaného) dílu až po variantu dílu připraveného pro reálný tisk. Je zřejmé, že se potvrdila domněnka, že úpravou podpůrných struktur pro reálný tisk dojde k nárůstu objemu tištěného materiálu o cca 48 %, a tím i k prodloužení celkového času tisku cca o 32 %.

Problém SW řešení byl nastíněn již dříve v textu. SW často navrhuje vysoké štíhlé podpory náchylné k ulomení, které jsou z principu technologie náročné na spotřebu prášku, neboť mezery blokových podpor vyplňuje nespečený prášek, který nemůže být recyklován. Upravená varianta tisku V3 tyto podpory řeší vykloněním větším než 45° a zakotvením do již vytištěné části dílu. Nárůst objemového podílu podpor u této varianty je dán použitými

plnoobjemovými variantami typu Volume. Spečený materiál tedy v této variantě vykazuje vyšší objem, avšak vezme-li se v úvahu množství prášku, který nelze recyklovat, hodnoty objemů spotřebovaného prášku pro obě varianty se velmi přiblíží. Dále je potřeba vzít v úvahu to, že často byly SW navržené podpory typu Line, které by byly s reálnou výstavbou součásti naprosto neslučitelné.

V Tab. 21 jsou vyčísleny také úspory ve vztahu k původnímu SW návrhu V1, které výsledně ukazují redukci objemu spečeného materiálu o cca 26 % a času tisku o cca 34 %. Sumárně lze říci, že při zdařilých procesech tisku bude sestava vytištěna na dvě platformy s časovým fondem 83,4 a 32 hodin, tedy sumárně s přípravou tisku a postprocesingem za 153 hodin (6,4 dne).

Tab.21 Sumarizace výsledků V3 vs. V2 a V1

	V1	V2	V3	úspora V3 vůči V2 [%]	úspora V3 vůči V1 [%]
Objem dílu A - Magics [cm3]	642.0	323.5	323.5	**0.0**	**49.6**
Objem podpor A - Magics [cm3]	682.8	457.4	809.0	**-76.9**	**-18.5**
Objem celkem A - Magics [cm3]	1325.0	780.9	1132.5	**-45.0**	**14.5**
Objem dílu B - Magics [cm3]	246.8	112.5	112.5	**0.0**	**54.4**
Objem podpor B - Magics [cm3]	101.1	10.0	38.0	**-278.5**	**62.4**
Objem celkem B - Magics [cm3]	348.0	122.6	150.5	**-22.8**	**56.7**
Objem dílu C - Magics [cm3]	325.0	151.0	151.0	**0.0**	**53.5**
Objem podpor C - Magics [cm3]	36.2	54.4	67.0	**-23.0**	**-84.8**
Objem celkem C - Magics [cm3]	361.2	205.5	218.0	**-6.1**	**39.7**
Objem dílů A + B +C - Magics [cm3]	1213.8	491.7	587.0	**-19.4**	**51.6**
Objem podpor A + B +C - Magics [cm3]	821.3	521.9	914.0	**-75.1**	**-11.3**
Objem celkem A + B +C - Magics [cm3]	2035.1	1013.6	1501.0	**-48.1**	**26.2**
Čas tisku platforma 1 - 50um [hod]	123.3	55.3	83.4	**-51.0**	**32.3**
Čas tisku platforma 2 - 50µm [hod]	23.6	32.2	32.0	**0.5**	**-35.6**
Čas tisku platforma 3 - 50µm [hod]	27.0	0.0	0.0	**0.0**	**100.0**
Čas tisku platformy 2 + 3 - 50µm [hod]	50.6	28.5	32.0	**-12.2**	**36.8**
Čas tisku celkově - 50µm [hod]	173.9	87.4	115.4	**-32.0**	**33.6**

4.3.2 Postprocesing dílů

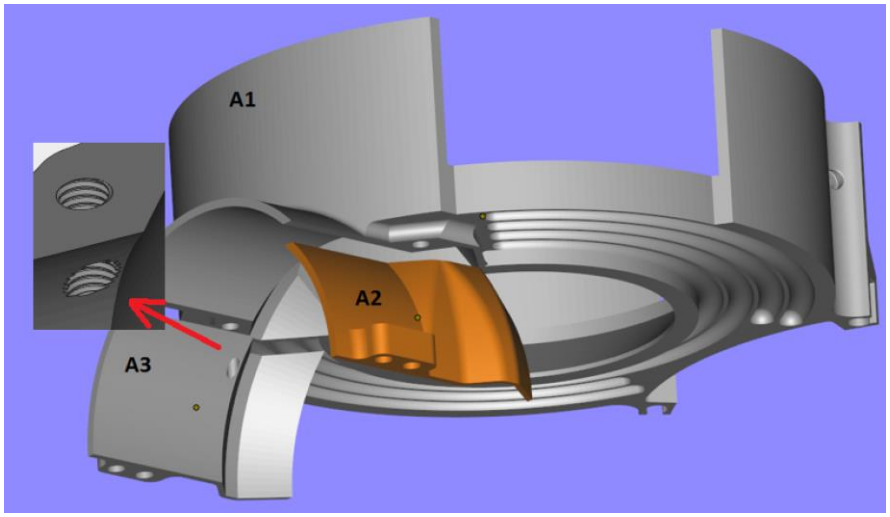
Po tisku dílů následovalo již mnohokrát zmiňované TZ s cílem snížení pnutí, dle výrobcem doporučeného postupu v kap. 3. Po dochlazení na vzduchu proběhlo odříznutí dílů z platformy a frézování spodních ploch součástí, ostatní podpory byly odstraněny pomocí pneumatického a ručního nářadí. Finální úprava povrchu byla provedena pískováním. Celková časová náročnost postprocesingu součásti byla 55 hod.

Na základě procesu tisku a postprocesingu byla vytipována slabá místa, která by bylo vhodné dále upravit. Z důvodu spokojenosti zákazníka byla tato sestava s drobnými úpravami dílů tištěna opakovaně. V průběhu opakování docházelo k postupným úpravám a změnám vedoucím k časovým a materiálovým úsporám při zajištění relativně spolehlivého procesu výroby.

Obr.131 *Finální sestava dle V3*

4.4 Úprava – V4

Současná varianta výroby krytu označovaná jako V4 je výsledkem úprav. V následujícím textu budou zachyceny nejvýznamnější z nich. Asi nejzásadnější úpravou prošel díl A, jehož hlavním problémem byly vysoké podpory, které byly dány výškou půlkruhového oblouku. Z toho důvodu bylo řešeno, jak zkrátit dobu tisku podpěrných struktur a zefektivnit proces výroby. Výsledné řešení spočívalo v rozdělení dílu A na tři díly, dále označované jako A1, A2, A3, viz Obr. 132, tím došlo ke snížení výšky ve směru Z. Dalšími konstrukčními úpravami tohoto dílu bylo přidání jedné půlkruhové drážky na spodní plochu pro snížení objemu podpor a vytvoření příruby na spodní části. Jednotlivé díly byly po vytištění vzájemně propojeny šrouby s hlavou zapuštěnou do části A1 a v menších dílech (A2 a A3) byly vytvořeny závity M4.

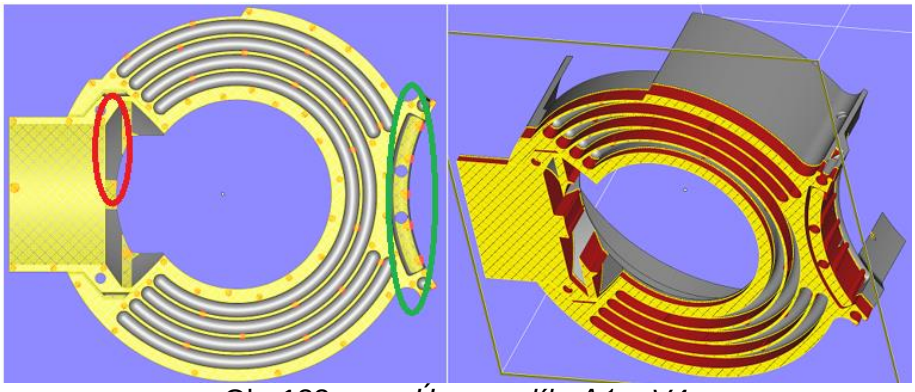


Obr.132 *Rozdělení dílu A na tři části – A1, A2, A3*

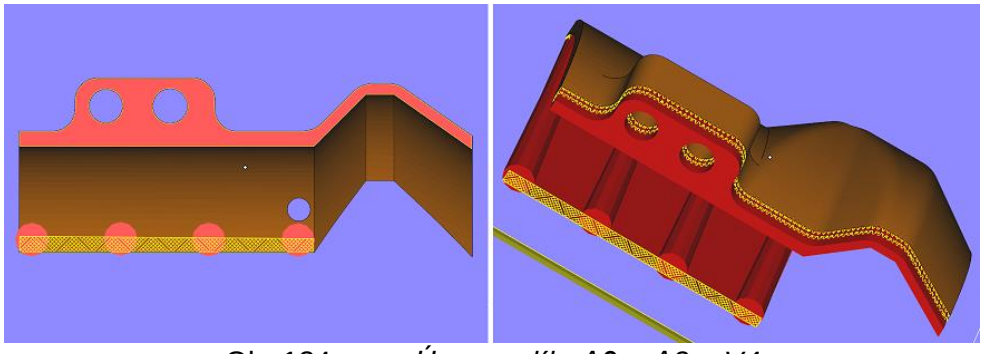
Výsledný vliv úprav varianty V4 na objemy dílů a podpor v porovnání s předchozími variantami je podrobně uveden v Tab. 22. Úpravy řešení podpor jsou patrné z následujících obrázků.

V rámci úprav dílu A byly provedeny následující významné změny:

1) úprava obloukové části – Snížením výšky oblouku svírá celá jeho spodní plocha úhel s platformou menší než 40°, proto se navržené podpory Block propojily se zbytkem podpor, tím se zvýšila jejich tuhost. Snížením výšky oblouku došlo zároveň ke snížení většiny podpor. Tím mohly být zrušeny některé přídavné podpůrné konstrukce – příklad označen v Obr. 133 červeně
2) přidání půlkruhové drážky na spodní plochu dílu → zmenšení půdorysné plochy podpor
3) podepření oblouku pro krytí hlav šroubů podporami typu Block +Cone (v Obr. 133 označeno zeleně) z důvodu snížení opotřebování pravítka. Dle očekávání docházelo během tisku ke zvedání se této části dílu nad rovinu prášku a docházelo ke zvýšenému namáhání pravítka.

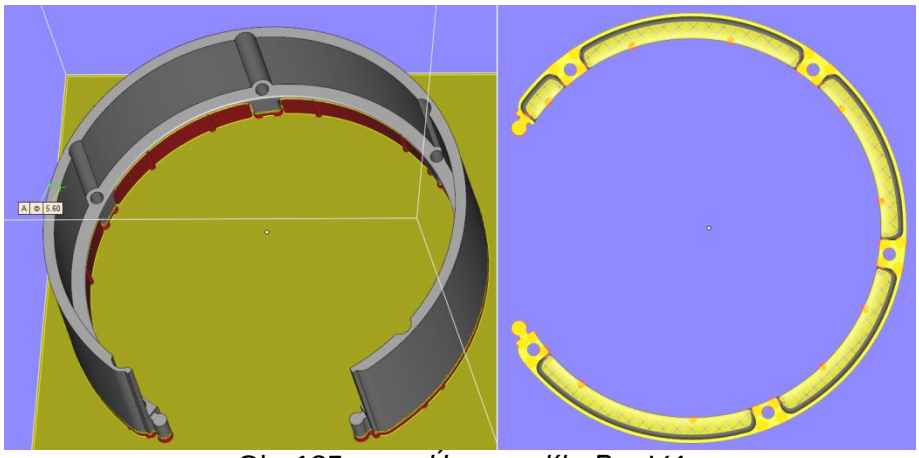


Obr.133 *Úprava dílu A1 – V4*



Obr.134 *Úprava dílu A2 a A3 – V4*

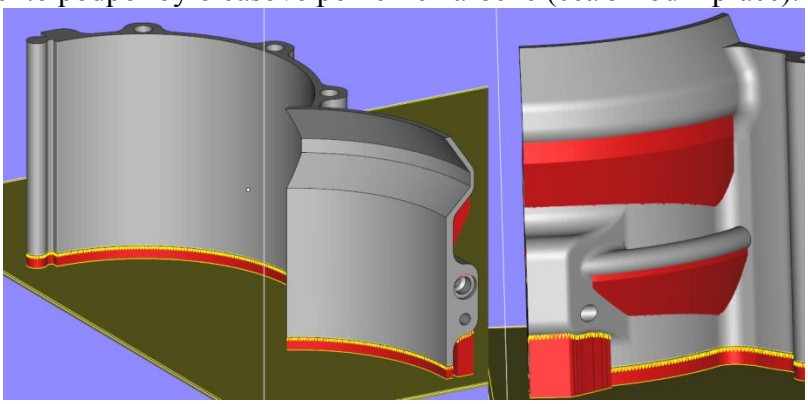
U dílu B došlo na základě přání zákazníka k rozšíření stěny dílu o 1 mm. V konstrukci podpor došlo k odlehčení o podpory typu Volume, které byly na základě zkušeností z předchozího tisku odstraněny. Navržené podpory Block byly místně vyztuženy podporami Cone, viz Obr. 133.



Obr.135 *Úprava dílu B – V4*

Díly C1 a C2 rovněž prošly drobou konstrukční úpravou, která spočívala v odebrání nefunkčního materiálu v horní části a v návrhu vybrání pro pojistný kroužek pro fixaci trubičky a s mazacím médiem. Z hlediska úprav podpůrných struktur došlo k odstranění podpor v drážce pro ozubené kolo, které byly velmi obtížně odstranitelné. Touto úpravou došlo k mírnému zhoršení povrchu, to ale nebylo vzhledem k funkci upraveného elementu podstatné.

Ostatní podpory ukotvené do dílu, viz Obr. 136, nebyly v rámci postprocesingu z dílu odstraňovány, neboť při smontování sestavy byl v těchto částech dostatek prostoru a ruční odstraňování těchto podpor bylo časově poměrně náročné (cca 5 hodin práce).



Obr.136 *Úprava dílu C1 – V4*

4.4.1 Sumarizace výsledků

Výsledky úprav varianty V4 ve srovnání s ostatními variantami jsou uvedeny v Tab. 22. Jednotlivé vyráběné sady krytů se od sebe mírně odlišovaly, i proto je řešení technologií 3D tisku nejen výrobně rychlým, ale i jednoduše modifikovatelným řešením ve srovnání s jinými technologiemi. Odlišnosti dílů jsou patrné z červených čísel v tabulce. U V4 je vidět objemový nárůst dílů A a B oproti předchozím variantám. Přes tento přírůstek materiálu je však u všech jednotlivých dílů vidět celková úspora vytištěného materiálu i redukce výrobních časů, která se promítla nejen do časů tisku, ale i do časů postprocesingu.

V důsledku rozdělení dílu A na tři části došlo k zefektivnění práškového hospodářství. To vychází z pravidla potřeby prášku v zásobníku pro kontinuální tisk (trojnásobek výšky součásti). Výška tisku pro V4 byla o 40 mm nižší než pro V3, to je rozdíl cca 13 kg prášku nasypaného do zásobníku. Díly této sestavy jsou objemově velké ve srovnání s většinou ostatních tisků probíhajících na zařízení EOS M290 v RTI, tzn., že prášek během tisku

objemově menších dílů není v celém objemu zásobníku obměňován. A zvětšují se tak rozdíly rozložení velikosti prášku, viz kapitola 3, tím je ovlivňována kvalita tisku.

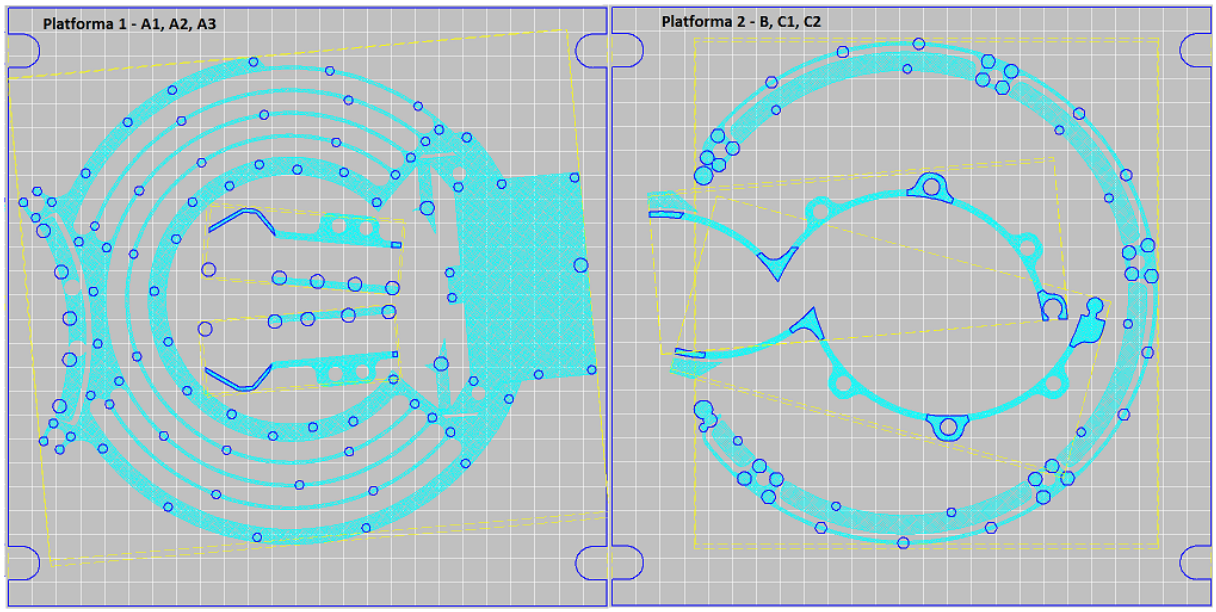
Tab.22 Sumarizace výsledků V4 vs. V3, V2 a V1

	V1	V2	V3	V4	úspora V4 vůči V3[%]	úspora V4 vůči V2 [%]	úspora V4 vůči V1 [%]
Objem dílu A - Magics [cm3]	642.0	323.5	323.5	353.1	**-9.2**	**-9.2**	**45.0**
Objem podpor A - Magics [cm3]	682.8	457.4	809.0	133.6	**83.5**	**70.8**	**80.4**
Objem celkem A - Magics [cm3]	1325.0	780.9	1132.5	486.7	**57.0**	**37.7**	**63.3**
Objem dílu B - Magics [cm3]	246.8	112.5	112.5	177.0	**-57.3**	**-57.3**	**28.3**
Objem podpor B - Magics [cm3]	101.1	10.0	38.0	39.3	**-3.3**	**-290.9**	**61.2**
Objem celkem B - Magics [cm3]	348.0	122.6	150.5	216.3	**-43.7**	**-76.4**	**37.8**
Objem dílu C - Magics [cm3]	325.0	151.0	151.0	142.4	**5.7**	**5.7**	**56.2**
Objem podpor C - Magics [cm3]	36.2	54.4	67.0	24.1	**64.0**	**55.8**	**33.5**
Objem celkem C - Magics [cm3]	361.2	205.5	218.0	166.5	**23.6**	**19.0**	**53.9**
Objem dílů A + B +C - Magics [cm3]	1213.8	491.7	587.0	672.6	**-14.6**	**-36.8**	**44.6**
Objem podpor A + B +C - Magics [cm3]	821.3	521.9	914.0	196.9	**78.5**	**62.3**	**76.0**
Objem celkem A + B +C - Magics [cm3]	2035.1	1013.6	1501.0	869.4	**42.1**	**14.2**	**57.3**
Čas tisku platforma 1 - 50um [hod]	123.3	55.3	83.4	42.4	**49.2**	**23.3**	**65.6**
Čas tisku platforma 2 - 50µm [hod]	23.6	28.5	32.0	33.0	**-3.2**	**-2.7**	**-39.9**
Čas tisku platforma 3 - 50µm [hod]	27.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**	**0.0**	**100.0**
Čas tisku platformy 2 + 3 - 50µm [hod]	50.6	28.5	32.0	33.0	**-3.2**	**-15.8**	**34.7**
Čas tisku celkově - 50µm [hod]	173.9	87.4	115.4	75.4	**34.6**	**13.7**	**56.6**

Použitím varianty V4 došlo oproti předchozí tištěné variantě V3 k úspoře objemu spečeného materiálu o 42 % a k úspoře času tisku o přibližně 35 %. Zatímco pro V3 bylo potřeba pro výrobu vč. všech doprovodných operací 153 hodin (6,4 dne), výroba upravenou variantou V4 trvala 112 hodin (4,7 dne).

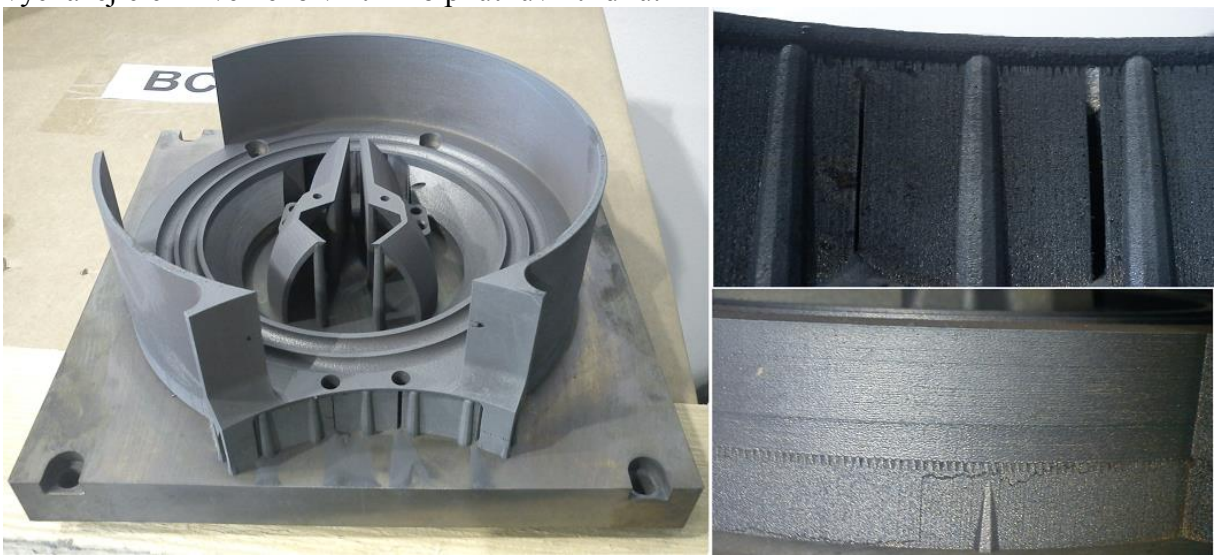
Ve srovnání s původně zadanou variantou došlo k úspoře materiálu i času tisku minimálně o 60 % .

Následující obrázek ukazuje rozložení V4 na stavěcí platformy. Během tisku bylo použito parametrů tisku EOS_Direct Part, EOS_Direct Tool, EOS_External support s nastavením pootáčení drah dvou po sobě jdoucích vrstev o 67°.

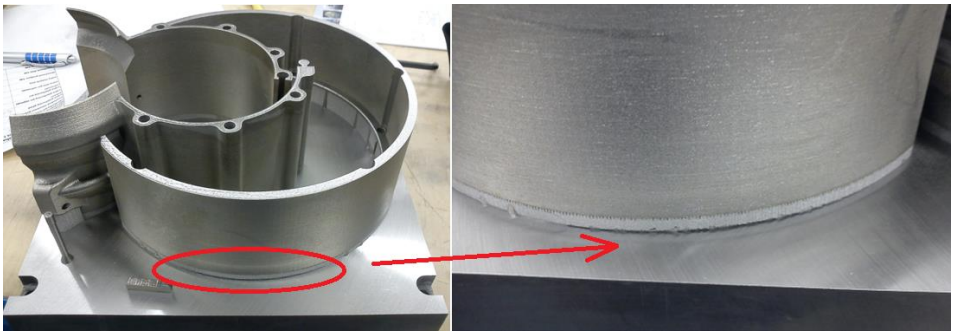


Obr.137 *Ustavení dílů na platformy - vlevo díly A1, A2, A3; vpravo díly B, C1 a C2*

Podle připravených platforem v SW EOS Print se může zdát, že je zde použito nadměrné množství podpor typu Cone (tmavě modré kruhy na Obr. 137). Z následujícího obrázku je zřejmé, že i přes toto relativně silné připojení k platformě dochází ke vzniku trhlin vycházejících z velkého vnitřního pnutí uvnitř dílu.

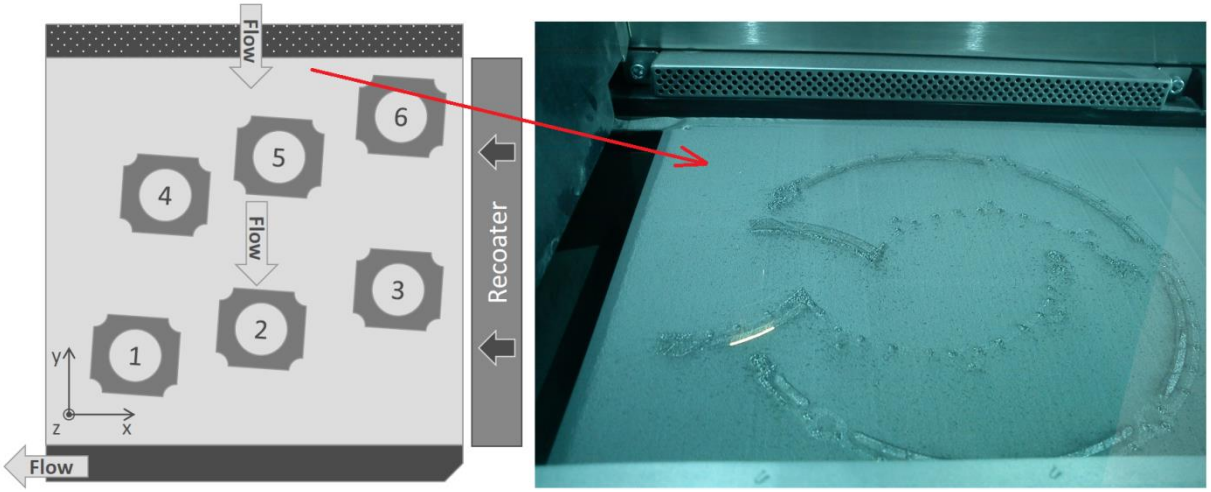


Obr.138 *Vytištěné součásti A - V4*



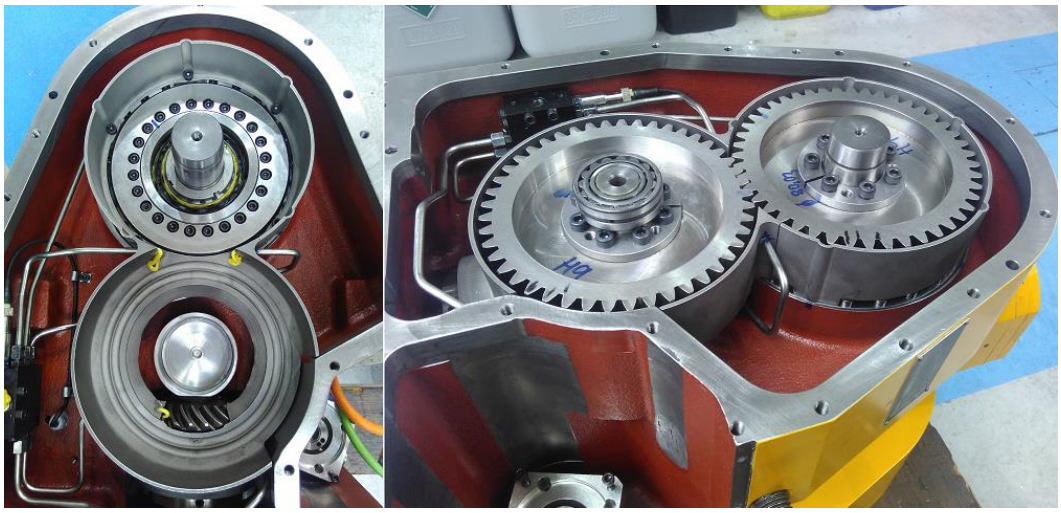
Obr.139 *Vytištěné součásti B, C - V4*

V průběhu tisku vzniká při spékání jednotlivých vrstev poměrně velké množství odletujících částic, viz Obr. 140 vpravo. Jednou ze zásad 3D tisku je umisťovat součásti na platformu v pořadí, které ukazuje Obr. 140 vlevo. V zadní části komory je umístěn ofuk, jímž proudí do komory ochranný plyn, který má odnášet nežádoucí části mimo spékanou součást. Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, některé tyto drobnější částice propadnou okem síta a kontaminují původní prášek.



Obr.140 *Vpravo – pravidlo umisťování dílů na platformu; vlevo – tisk dílů B a C – viditelné odletující částice*

Po vytištění a postprocesingu sestavy jsou díly vloženy do sestavy frézky a osazeny ozubenými koly. Na následujícím obrázku je vidět vytištěný kryt po montáži a otestování funkce mazacích kanálků.



Obr.141 *Vytištěné díly po montáži a otestování mazacích kanálků*

Pro tisk sestavy V4 bylo spotřebováno cca 9,8 kg prášku, přičemž celková váha finálních kusů byla 5,7 kg a váha podpor 2,1 kg. Zhruba 1/5 spotřebovaného prášku skončila v odpadní nádobě vysavače a ve filtračních jednotkách stroje. Z Tab. 23 je patrný drobný rozdíl mezi reálnými údaji o hmotnosti sestavy a údaji generovanými SW.

Tab.23 Porovnání reálných a SW údajů o hmotnosti sestavy V4

	SW	Realita
Hmotnost dílů [kg]	5,4	5,7
Hmotnost podpor [kg]	1,6	-
Hmotnost podpor, vč. prášku v konstrukci podpor	-	2,1
Celková hmotnost	7	7,8 (vč. prášku mezi podporami)
Hmotnost spotřebovaného prášku [kg]	-	9,8

4.5 Závěr praktického ověření

Cíl vytyčený v úvodu této kapitoly byl splněn. Výsledkem jsou plně funkční díly krytu převodového mechanismu jednoúčelové frézky navržené a vyrobené v souladu s požadavky společnosti Škoda Machine Tool. V průběhu řešení došlo k ověření všeobecně uznávaných zásad a pravidel 3D tisku a zároveň k využití znalostí získaných při práci se zařízením EOS M290, částečně popsaných v předchozích kapitolách.

Nejprve proběhly konstrukční úpravy dílů z hlediska technologičnosti konstrukce pro aditivní výrobu. Tím došlo k významné úspoře hmotnosti jednotlivých součástí, a tedy i drahého materiálu pro tisk, jehož cena se pohybuje okolo 3400 Kč/kg. Dalším konstrukčním řešením bylo rozdělení dílů tak, aby se eliminoval počet tisků. Následně se provedla orientace dílů a jejich vypodporování s ohledem na minimalizaci finančních nákladů a na spolehlivost tiskové úlohy. Popsané inovativní varianty vedly k významnému snížení časové i finanční náročnosti výroby.

Finální variantu V4 je možné vyrobit ve dvou tiskových procesech s celkovým časovým fondem cca 112 hod, z čehož 75,5 hod je čas tisku. Minimální úspora oproti původnímu zadání je cca 57 % z hlediska času a 57 % z hlediska množství spotřebovaného prášku, skutečná úspora by však byla významně vyšší, neboť původní varianta V1 je připravena dle SW návrhu, který nepočítá s velikostí dílů.

Pro kontinuální výrobu V4 je potřeba naplnit zásobník cca 60 kg prášku, přičemž spotřeba prášku pro výrobu sestavy krytů je přibližně 10 kg. Hmotnost odhadovaná SW je srovnatelná s hmotností reálných dílů, ale bohužel v ní není nijak zohledněno množství prášku, které zůstává v prostorách mezi podporami, případně v dutinách dílu a prášek, který se v rámci čištění stroje dostane do vysavače. Reálná spotřeba prášku je o cca 26 % větší, než je skutečná váha dílů.

5 Závěr

V úvodu byly na základě teoretických poznatků o progresivně se vyvíjející technologii 3D tisku stanoveny cíle disertační práce, které byly naplněny v průběhu jejího řešení. Výsledky zkoumání budou publikovány v rámci celosvětových konferencí a budou sloužit k rozšíření celosvětové znalostní databáze o nové informace v oblasti aditivních technologií. Veškerý výzkum, včetně praktického ověření, byl proveden na materiálu Wr-N.1.2709.

Prvním cílem bylo provést výzkum vstupního materiálu pro aditivní výrobu, který je považován za zásadní pro kvalitu finálního dílu, ale v odborné literatuře se neuvádí, čím je toto tvrzení podloženo. V první etapě došlo k ověření základních informací udávaných výrobcem zařízení, jako je velikost zrna a rozložení velikosti prášku v určeném objemu. U obou sledovaných indikátorů byl nalezen nesoulad. Výrobce udává, že distribuční rozdělení velikosti prášku je dle Gausse, přičemž 90 % prášku by mělo mít velikost cca 50 μm a zbývajících 10 % by mělo obsahovat prášek o velikosti 10–50 μm a 50–63 μm. Reálně se velikost zkoumaného prášku pohybovala od několika μm až do cca 70 μm, přičemž 85 % velikosti sledovaného objemu v rozmezí leží 1–30 μm, z toho cca 15 % je menší než 10 μm. Tato skutečnost posouvá riziko práce s těmito materiály na jinou úroveň. Pro tuto velikost již nepostačuje kategorie filtrů jemnosti P3, jež jsou výrobcem doporučeny z hlediska BOZP, a je tedy nutné provést přezkoumání, do které kategorie práce dle § 43 zákona č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, tato pracoviště zařadit.

Výsledky provedených experimentů na vzorcích z transportního barelu a zásobníku prášku ukázaly, že rozložení částic je nerovnoměrné a neodpovídá rozložení dle Gausse. Obecně lze říci, že s přibývající hloubkou klesal podíl větších částic. Dno sledovaného objemu mírně vybočovalo z trendu z důvodu nedostatečné obměny prášku. Rozložení odpovídalo Weibullově distribuční funkci. Pro bližší určení této funkce byly na základě vytvořeného programu v SW Matlab nalezeny parametry pro sledované hladiny a byly zobrazeny křivky těchto funkcí.

Proces hodnocení velikosti prášku a jeho rozložení zahrnoval celou řadu měření, přípravných prací a programování. Díky velmi dobré opakovatelnosti měření s max. odchylkou cca 3 %, a to u největšího procentuálního zastoupení velikosti, byl vytvořen metodický postup pro hodnocení rozložení velikosti částic ve vybraném objemu prášku převážně kulovitého tvaru, kterým by bylo možné hodnotit vybrané vzorky prášku bez ohledu na materiál, tím došlo k naplnění druhého cíle této disertační práce.

V rámci hodnocení velikosti částic byly objasněny některé otázky týkající se vstupního materiálu. Jak bylo výše zmíněno, uvádí se, že kvalita prášku předurčuje výsledek tisku, ale tyto závěry nejsou podloženy konkrétními výsledky. Při prvotní analýze nového a recyklovaného prášku nebyl mezi těmito dvěma vzorky pozorován rozdíl v tvaru ani velikosti. Jediná nalezená odlišnost se projevila ve struktuře povrchu některých zrn recyklovaného prášku. Nový prášek obsahoval pouze zrna se šupinkovou strukturou na povrchu, ale v přesetém prášku se ojediněle objevovala i zrna s hladkým povrchem bez této topografie. Metalografie částic se „sloní kůží“ a s hladkým povrchem ukázala, že zrna tvoří dendritická struktura prorůstající na povrch u nového prášku a dendritická struktura zakončená obalovou vrstvou u prášku recyklovaného, tedy neprorostlá k povrchu. Tento poznatek nebyl doposud nikde publikován. Na základě této informace bylo sledováno, jak zmíněné částice vznikly a jaký byl jejich dopad na strukturu a mechanické vlastnosti, to se rovněž nikde neuvádí.

Monitorování procesu tisku vysokorychlostní kamerou pomohlo objasnit vznik částic s hladkým povrchem. V průběhu spékání vznikaly částice různých velikostí kulovitého tvaru bez typické šupinkovité struktury. Menší z nich během přesívání prášku propadly zpět do

zásobníku a byly spékány v dalším tisku. Bohužel ne vždy došlo k jejich spečení. Tyto nespečené částice se ve struktuře projevovaly jako vměstky, které se při zatěžování vzorků často stávaly iniciátorem vzniku trhlin vedoucích k lomu.

Analýzou vzorku tištěného ve směru Z (výška 156 mm) bylo zjištěno, že v horní části tisku se objevuje podstatně více těchto částic bez „sloní kůže“, které snižují jak čistotu struktury, tak především její mechanické vlastnosti. Jemnější struktura konce vzdálenějšího od stavěcí platformy byla způsobena tím, že se níže v zásobníku vyskytovalo více částic menšího průměru, než tomu bylo v povrchových vrstvách. Výsledky potvrdily nerovnoměrné rozložení velikosti prášku v zásobníku.

Předkládané závěry mohou být v oblasti aditivní výroby považovány za velmi cenné, neboť popisují dosud neprobádané skutečnosti a objasňují teoretické spekulace o dané problematice.

Pro naplnění třetího cíle této práce se testovala a analyzovala zkušební tělesa rozdílných velikostí s různým tepelným zpracováním. Během zkoumání a ověřování mechanických vlastností bylo zjištěno i několik odlišností od údajů, které jsou udávány výrobcem. Projevil se vliv velikosti vzorku, vliv kvality prášku, vliv tepelného zpracování i vliv směru tisku, který se ovšem v drtivé většině objevoval jinde, než udává výrobce, což bylo jedním z hlavních nalezených nesouladů.

Při porovnání hodnot mechanických vlastností s hodnotami udávanými výrobcem se dospělo k závěru, že tištěné vzorky D4 vykazovaly shodu s deklarovanými hodnotami, až na hodnoty meze kluzu. Ty se pohybovaly cca o 200 MPa výše, než je stanovená střední hodnota pro tento směr. Výrobce udává pro tištěný materiál rozdílné mechanické vlastnosti pro směr XY a pro směr Z, to však nebylo v rámci provedených experimentů potvrzeno u vzorků po tisku bez TZ, ani u žíhaných vzorků, vykazujících až o 200 MPa nižší mez kluzu, než připouští výrobce. Naopak vytvrzené vzorky vykazovaly vliv orientace na výsledné mechanické vlastnosti – nejvýrazněji u D10, i přestože v materiálových listech jsou pro všechny směry udávány stejné mechanické vlastnosti.

Vliv velikosti vzorku se projevil u všech variant výroby a tepelného zpracování, a to nejvíce v mezi kluzu. Zatímco u tištěných vzorků mez kluzu se zmenšujícím se průřezem rostla, u konvenčně vyrobených klesala. Vzorky obdélníkového průřezu se porušovaly v závislosti na kvalitě spékaného prášku, jež ovlivňovala velikost síly potřebnou pro porušení.

Mikrostruktura žíhaných i vytvrzených vzorků byla stejně jako po tisku buněčná s feritickou matricí, ovšem u žíhaných vzorků s menšími a pravidelnějšími buňkami. V buňkách byly umístěny velmi jemné karbidické částice, ale také drobnější částice titanu nebo železa. Mikrotvrdost se pohybovala okolo 330 HV0,1. Vytvrzené vzorky (naměřené mikrotvrdosti cca 600 HV0,1) se podobaly původní struktuře po 3D tisku a jejich strukturu lze považovat za martenzitickou.

U žíhaných i kalených vzorků byla zjištěna přítomnost bílé fáze o mikrotvrdosti cca 290 HV0,01. Nízká tvrdost podporuje myšlenku identifikace bílé fáze jako zbytkového austenitu, což bylo u vytvrzených vzorků potvrzeno RTG analýzou.

Při porovnávání konvenčně vyrobených vs. tištěných vzorků lze vycházet ze zcela odlišného způsobu výroby. Důsledkem rozdílných principů výroby je nižší tažnost tištěných vzorků po vytvrzení (o 4,5 %). Mez pevnosti aditivně vyráběných vzorků byla bez ohledu na způsob následného TZ vyšší. Hodnota meze kluzu závisela na velikosti vzorků. Pro vzorky D4 byla srovnatelná pro obě technologie výroby, ale u D10 byla vyšší u konvenčních vzorků, přestože jejich mez pevnosti byla nižší. Mez kluzu je v konečném důsledku slabým místem

této technologie, neboť u větších nebo naopak příliš tenkých vzorků klesá spolehlivost použití. Významný vliv na výsledek procesu tisku má z pohledu mechanických vlastností zcela jistě příprava stroje a kvalita použitého materiálu.

Naplnění prvních třech cílů bylo spolu s teoreticky získanými poznatky vstupem pro praktické ověření všeobecně uznávaných zásad a pravidel 3D tisku. Ověření proběhlo na ne zcela typické součásti pro 3D tisk specifické svými rozměry, tvarem a funkcí. V průběhu řešení reálného případu bylo využito poznatků popsaných v této práci.

Během vlastního řešení bylo nutné v první řadě upravit model tak, aby z hlediska technologičnosti konstrukce došlo k využití předností aditivní technologie s ohledem na časovou a především ekonomickou náročnost.

Vhodným použitím všeobecných zásad a pravidel 3D tisku bylo dosaženo požadovaného výsledku za bezkonkurenčně krátký výrobní čas se spolehlivou opakovatelností a poměrně jednoduchou editovatelností výrobních kusů. Oproti původní variantě došlo k významné úspoře času i financí. Bylo zjištěno, že reálná spotřeba prášku je o cca 26 % větší, než je skutečná váha dílů.

Cíle stanovené v úvodní kapitole byly naplněny. Získané výsledky mají přínos nejen pro akademickou sféru, ale i pro praktické použití při výrobě reálných dílů. Práce přináší řadu zajímavých závěrů podložených reálnými experimenty, které nebyly dosud publikovány, a upozorňuje na nebezpečí při práci s prášky. Při vlastním řešení práce vyplynuly další směry výzkumu, viz další kapitola, na něž budou orientovány další akademické práce.

Výsledky zkoumání budou publikovány v rámci celosvětových konferencí a budou sloužit k rozšíření celosvětové znalostní databáze o nové informace v oblasti aditivních technologií. Veškerý výzkum, včetně praktického ověření, byl proveden na materiálu Wr-N.1.2709.

6 Směr budoucího výzkumu

Při řešení této disertační práce vyplynulo několik stěžejních oblastí, kterými se autorka a její tým bude dále intenzivně zabývat a prohlubovat svoje znalosti o aditivních technologiích. Tím bude zároveň přispívat do celosvětových publikačních databází, v nichž je téma 3D tisku velmi žádané a atraktivní. Konkrétně se jedná o tyto směry:

1) Výzkum dalších mechanických vlastností vypovídajících o tištěném materiálu – Pro komplexní znalost materiálu a pro ověření jeho chování v reálných podmínkách je zapotřebí provést další mechanické zkoušky a analýzy, např. zkoušku rázem v ohybu při různých teplotách, zkoušku cyklické únavy, zkoušku tahem za zvýšených teplot, zkoušku kombinovaného zatížení, statickou zkoušku v ohybu…
2) Výzkum tepelných jevů při tisku – Během výzkumu vstupního materiálu byly zjištěny dosud nepopsané jevy a děje ovlivňující výsledek tisku. Vlivem vysoké rychlosti ohřevu a postupného ochlazování vzniká v tištěném dílu velké pnutí, které musí být redukováno tepelným zpracováním, ideálně neprodleně po výrobě. S tím je spojena logistika přípravy, spuštění a vyndání tisku, předehřev pece a tepelné zpracování. Pokud by se změnou tepelných dějů v pracovní komoře podařilo zajistit snížení nežádoucího pnutí při zachování vlastností materiálu, byla by hodnota tohoto výzkumu zcela převratná.
3) Výzkum parametrů tisku pro typické představitele tenkostěnných, objemových dílů s cílem dosáhnout požadovaných vlastností (mechanických i kvalitativních) při minimalizaci potřeby podpůrných struktur – Tento bod dalšího výzkumu je velmi aktuálním tématem. Jeho naplnění spočívá v pokročilých znalostech procesu tisku a spékaných materiálů. První kroky k tomuto cíli byly provedeny výzkumem popsaným v této disertační práci a další budou provedeny v rámci řešení předchozích bodů.
4) Ověřování vytvořené metodiky a dosud zjištěných poznatků na dalších materiálech – Veškerá dosavadní práce byla řešena v souladu s jasně stanoveným plánem, na jehož vrcholu je definovaná změna procesních parametrů pro výrobu definovaného dílu s konkrétními požadavky (kvalita povrchu, mechanické vlastnosti, struktura, tvar, funkčnost…). Všechny kroky vedoucí k tomuto stěžejnímu cíli jsou prováděny tak, aby bylo možné nasazené postupy efektivně použít pro výzkum dalších materiálů, a to s rychlým získáváním kvalitních výsledků, které budou přispívat k vytváření znalostní databáze materiálů pro aditivní výrobu.

Směry budoucího výzkumu jsou stanoveny s ohledem na požadavky trhu a na spolehlivé začlenění této technologie do výrobních procesů s cílem odstraňovat a redukovat současné omezení aditivních technologií.

Použitá literatura

[1] Čtvrtá průmyslová revoluce aneb Jsme připraveni na soužití s chytrými stroji? [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: https://www.zcu.cz/pracoviste/rk/events.html

[2] Selective Laser melting. Wikipedia [online]. [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting

[3] Hanzl, P. Využití metody spékání kovových prášků laserem pro konstrukci řezných nástrojů. V Plzni 2014. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html, Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[4] Shellabear, M., Nyrhilä, O. 2004. DMLS - Development history and state of the art. Proceedings of the 4th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering. LANE 2004. Erlangen, p. 393-404.

[5] Islam , M. , Taimisto , L. , Piili , H. , Salminen , A. and Nyrhilä , O. Comparison of theoretical and practical studies of heat input in laser assisted additive manufacturing of stainless steel. In Proc. 37th International MATADOR Conference. Manchester , 2012. Springer , 2012 , 365–368.

[6] Direct Metal Sintering. Custom Part Net [online]. [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering

[7] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. (2010) Additive Manufacturing Technologies: Generalized Additive Manufacturing Process Chain. pp 59-77. ISBN 978-1-4419-1119-3

[8] INNOMIA. Konformní chlazení. [online]. [cit. 2017-02-20] Dostupný z http://www.innomia.cz/sluzby/konformni-chlazeni

[9] 14220.cz. 3D tisk [online]. 2013 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-uvod/

[10] D. Wang , Y. Yang , R. Liu , D. Xiao , and J. Sun , " Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM)," J. Mater. Process. Technol. 213(10), 1734–1742 (2013)

[11] EOS. Školící materiály - EOS basic training. Interní dokumentace.

[12] A.K. Mishra , S. Thirumavalan, A Study of Part Orientation in Rapid Prototyping. Middle-East Journal of Scientific Research 20 (9): 1197-1201. 2014. ISSN 1990-9233

[13] Allen, S. and D. Dutta, On the computation of part orientation using support structures in layered manufacturing, Technical Report. UM-MEAM-TR-94-15, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbour. (1994)

[14] Frank, D. and G. Fadel, Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes. Journal of Intelligent Manufacturing, 6 (5) (1995), pp. 339-345

[15] A Study of Part Orientation in Rapid Prototyping. A Study of Part Orientation in Rapid Prototyping. 2014.

[16] Masood, S.H., W. Rattanawong and P. Iovenitti, 2000. Part build orientations based on volumetric error in fused deposition modelling, Int. J. Advan. Manuf. Technol., 16(3): 162-168.

[17] SENTHILKUMARAN. Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering

[18] Rapid prototyping and manufacturing technology [online]. 2014 [cit. 2014-11-18]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6075759

[19] TURKER, M. D. GODLINSKI, D. PETZOLDT, F. Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. Materials Characterization, Volume 59, Issue 12, December 2008, Pages 1728–1735

[20] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. Materials & Design, Volume 64, December 2014, Pages 203–213

[21] Introduction to Additive Manufacturing Brochure. Epna [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.epma.com/additive-manufacturing

[22] Dawes, J., Bowerman, R., Trepleton, R., Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Johnson Matthey Technol. Rev., 2015, 59, (3), 243-256

[23] Materialise Software. User manual Magics 20. Interní dokumentace.

[24] EOS. Školící materiály – Follow up training. Interní dokumentace.

[25] BINELI A. R. R. PERES A. P. G., JARDINI A. L., FILHO R. M. DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS): In technology for design and construction of microreactors. Brasil 2011. 6th brazilian conference on manufacturing engineering. ISSN: 0100-7386

[26] Metal 3D Printing is Helping Nasa. 3D PRINTING INDUSTRY [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://3dprintingindustry.com/2015/10/19/metal-3d-printing-is-helping-nasa-blast-off-into-space/

[27] Ten ways 3D printing could change space. KURZWEIL [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.kurzweilai.net/ten-ways-3d-printing-could-change-space

[28] Metal Additive Manufacturing. Manufacturing [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: https://manufacturing.llnl.gov/additive-manufacturing/metal-additive-manufacturing

[29] 10 Cool 3D Printed Objects. Make [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://makezine.com/2013/11/21/10-cool-3d-printed-objects/

[30] Metal Jet Engines. True Activist [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.trueactivist.com/monash-university-just-3d-printed-two-metal-jet-engines/

[31] First 3D Printed Jet Engine. ENGINEERING [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/9726/First-3D-Printed-Jet-Engine.aspx

[32] Leichtbau für turbomaschinen. Fraunhofer [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.innovationscluster-lce.de/content/dam/lce/de/documents/LCE_Simugen.pdf

[33] Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://journal.hep.com.cn/fme/EN/10.1007/s11465-013-0248-8

[34] Oberflächennachbearbeiten eines SLM-Ventils mit Tauchgleitläppen. MASCHINENMARKET [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=7502&pk=471187&fk=0&type=article#1

[35] INNOMIA. Konformní chlazení. [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.innomia.cz/sluzby/konformni-chlazeni

[36] Sekyra V. Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnávání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti. V Brně 2011. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41825, Diplomová práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

[37] Misan. Souhrnný katalog [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://www.misan.cz/download/concept-laser/Katalog_Concept_Laser.pdf

[38] INNOMIA. Opravy forem. [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.innomia.cz/sluzby/konformni-chlazeni

[39] Mapal Mass Manufactures Drills to Perfection with 3D Printing. [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.notey.com/external/5302972/mapal-mass-manufactures-drills-to-perfection-with-3d-printing-technology-3d-printing-industrial-production-metal-3d-printing-slm-mass-3d-printing.html

[40] 3D printing industry. Cancer Patient Receives 3D Printed Sternum & Ribs in First of its Kind Surgery. cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.notey.com/external/6055875/cancer-patient-receives-3d-printed-sternum-ribs-in-first-of-its-kind-surgery-news-technology-australia-3d-printing-medical-amp-dental-metal-3d-printing-ebm.html

[41] Want a new knee? Print one in 3D [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://bizwest.com/wp-content/uploads/2014/11/knee23.-ConforMIS-v-OTS.jpg

[42] Surgeons In Brazil Successfully Implant a 3D-Printed Titanium Skull [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.cbmwales.co.uk/surgeons-in-brazil-successfully-implant-a-3d-printed-titanium-skull/

[43] Computer world. Printed gun. [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.computerworld.com/article/2475617/emerging-technology/need-a-last-minute-christmas-gift--how-about-a--12-000-3d-printed-gun-.html

[44] World's first 3D-printed metal gun successfully fired. Dezeen magazine [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.dezeen.com/2013/11/08/worlds-first-3d-printed-metal-gun-manufactured-by-solid-concepts/

[45] World's first 3D-printed bicycle frame launchen. Dezeen magazine [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.dezeen.com/2014/02/07/worlds-first-3d-printed-bicycle-frame/

[46] Digitální domácnost. Miláčku, vytiskl jsem děti ve 3D aneb 3D tiskárny už i na doma. [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.digitalnidomacnost.cz/milacku-vytiskl-jsem-deti-ve-3d-aneb-3d-tiskarny-uz-i-na-doma/

[47] Computer world. Printed gun. [cit. 2015-11-20] Dostupný z: http://www.computerworld.com/article/2475617/emerging-technology/need-a-last-minute-christmas-gift--how-about-a--12-000-3d-printed-gun-.html

[48] Francis Bitonti's collections: Integrating 3D printing into architectural design. 3ders [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.3ders.org/articles/20130106-francis-bitonti-collections-integrating-3d-printing-into-architectural-design.html

[49] SMART ART. CARTWHEEL ART [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.cartwheelart.com/2012/07/24/smart-art-a-new-trend-incorporating-and-celebrating-how-science-meets-art/

[50] Francis Bitonti's collections: Integrating 3D printing into architectural design. 3ders [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: http://www.3ders.org/articles/20130106-francis-bitonti-collections-integrating-3d-printing-into-architectural-design.html

[51] Misan. Souhrnný katalog [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://www.misan.cz/download/concept-laser/Katalog_Concept_Laser.pdf

[52] Čapková, V. Omezující parametry 3D tisku. V Plzni 2015. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html, Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[53] Hao, L., Raymont, D., Yan, C., Hussiein, A., Young, P. Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures. Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 2011. Pages 249–254. ISBN: 978-0-203-18141-6

[54] Sekyra, V. Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnávíní s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti. V Brně 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41825, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

[55] Yan, Ch., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Huang, J. Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering, Published by Elsevier Ltd, Materials Science & Engineering A 628 ,Volume 628, 25 March 2015, Pages 238–246

[56] Příručka EOS Základní bezpečnostní instrukce EOS

[57] EOS. Školící materiály – Follow up training. Interní dokumentace.

[58] 3D printing industry. A Look into Powder Materials for Metal 3D Printing. [online]. 2013 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: https://3dprintingindustry.com/news/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing-57788/

[60] Macek, K., Steidl, J. Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení, studijní podklad k předmětu Nauka o materiálu, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství. Dostupný z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-1_makrostruktura-a-mikrostruktura.pdf

[61] Samek, P. Struktura a vlastnosti slitin hliníku na odlitky, bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce. Ing. Martin Juliš. Brno 2008. Dostupný z: https://core.ac.uk/download/pdf/30290327.pdf

[62] Murr, L. E., Martinez, E. all et. (2012) Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manfacturing: Examples of 3D Materials Science, Journal of Materials Research and Technology, Volume 1, Issue 1, 2012, Pages 42-54, ISSN 2238-7854.

[63] Kucerova, L. Zetkova, I. (2016) Metallography of 3D Printed 1.2709 Tool Steel. In MANUFACTURING TECHNOLOGY. February 2016, Vol. 16, No.1. s. 140 -144. ISSN 1213–2489.

[64] Kempen, K. et al. (2011) Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel, Physics Procedia, Volume 12, 2011, Pages 255-263, ISSN 1875-3892.

[65] Yasa E., Kempen K., Kruth J.P., Thijs L., Humbeeck J. V. (2010) Microstructure and mechanical properties of maraging steel 300 after Selective Laser Melting, International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2010, pp.383-396.

[66] Shamantha, C.R., Narayanan, R., Iyer, K.J.L. et al. (2000) Microstructural changes during welding and subsequent heat treatment of 18Ni (250-grade) maraging steel, Materials

Science and Engineering: A, Volume 287, Issue 1, 15 July 2000, Pages 43-51, ISSN 0921-5093.

[68] Stanford, M. et al. (2008) An investigation into fully melting a maraging steel using direct laser sintering, Metal forming conference, 79: 847-852 (2008). [online]. 2013 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z http://impact.ref.ac.uk/CaseStudies/CaseStudy.aspx?Id=1393

[69] Dai, D., Gu, D. (2013) Thermal behaviour and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: Simulation and experiments, Materials & Design, Volume 55, March 2014, Pages 482-491, ISSN 0261-3069

[70] Hussein,A., Hao, L., Yan, Ch., Everson, R. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting. Materials & Design , Volume 52, December 2013, Pages 638–647

[71] Protokol o Měření -MET – vlastnosti zrna prášku pro 3D tisk. Interní dokumentace.

[72] Longhitano G.A, Larosa M.A, Munhoz A.L.J, Zavaglia C.A.C, Ierardi M.C.F. Surface Finishes for Ti-6Al-4V Alloy Produced by Direct Metal Laser Sintering. In: Materials Research. vol.18 no.4. ISSN 1980-5373

[73] Additive Manufacturing. EOS. [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupný z: https://www.eos.info/

[74] Atomization proces. Slideshare. [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/NikhilBorale/pm-14886129

[75] Powder production. Xsecpro. [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: http://www.xsecpro.biz/powder-production

[76] Metal powders – the raw materials. Metal AM. [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupný z:

http://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-powders-the-raw-materials/

[77] Daňa M., Zetková I., Hanzl P. Need for support structures depending on overhang size. In MM (Modern Machinery) Science Journal, December 2016. [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupný z: http://www.mmscience.eu/content/file/archives/MM_Science_2016192.pdf

[78] Zetek, M., Daňa, M., Zetková, I., Hanzl, P. Need for support structures depending on overhang size. Prezentace na konferenci 3D Trends. 2016. Liberec.

[79] Materialise Software. User manual Magics 20. Interní dokumentace.

[80] Pokročilé typy podpor, Po

[81] EOS. Školící materiály – Follow up training. Interní dokumentace.

[82] Rapid prototyping. 3D tisk [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: http://www.rapidprototyping.cz/3d-tisk/

[83] EOS Plastic Materials for Additive Manufacturing. EOS. [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupný z: https://www.eos.info/material-p

[84] Informace o technologiích 3D tisku. EASYCNC. [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupný z: https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/

[85] Bolzano. Materiálový list VACO 180. [online]. 2013 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/Vaco%20180(1).pdf

[86] Mentl, V., Volák, J., Bunda, Z., Procházka, M., Mach, J. Výsledky mechanických zkoušek zkušebních tyčí vyrobených 3D tiskem, Protokol o měření. Interní dokumentace.

[87] PROTOKOL O MĚŘENÍ, Číslo: RTI/MET/2017/12, Vliv velikosti prášku (hladiny tisku) na mikrostrukturu

Seznam příloh

Příloha 1 - Materiálový list oceli MS1

Příloha 2 - Materiálový list oceli Vaco 180

Příloha 3 – Program Prášky

Příloha 4 – Výkresy zkušebních těles pro statické zkoušky tahem

Příloha 5 - Materiálový list PA 2200